

# Étude de dangers de la digue de Bertignolles (37)

Rapport A 85656 vA

Avril 2018



**Conseil Départemental d'Indre-et-Loire**  
Direction générale adjointe « Territoires »  
Direction des déplacements  
Service Politiques des Infrastructures  
Place de la préfecture  
37 000 TOURS CEDEX

*Cette opération est cofinancée par l'Union européenne.  
L'Europe s'engage sur le bassin de la Loire avec le Fonds Européen de  
Développement Régional*

**Antea Group**  
**Direction Régionale Île-de-France Centre Normandie**  
Pôle Eau  
2-6 place du Général de Gaulle  
92 160 ANTONY  
Tél.: 01 57 63 14 00  
Fax.: 01 57 63 14 01

# SOMMAIRE

	Pages
<b>PREAMBULE</b> .....	<b>11</b>
<b>0. RESUME NON-TECHNIQUE DE L'ETUDE DE DANGERS</b> .....	<b>12</b>
0.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE DE DANGERS .....	12
0.2. COMPOSITION DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT .....	12
0.2.1. <i>Système d'endiguement</i> .....	12
0.2.2. <i>Constitution des ouvrages</i> .....	13
0.3. POTENTIELS DE DANGERS LIES AU SYSTEME D'ENDIGUEMENT .....	14
0.4. NIVEAU DE PROTECTION APPARENT ET NIVEAU DE SURETE DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT .....	14
0.4.1. <i>Niveau de protection apparent</i> .....	15
0.4.2. <i>Défaillance du système d'endiguement et niveau de sûreté</i> .....	15
0.5. CARACTERISATION DE LA GRAVITE DU RISQUE ASSOCIE A LA DEFAILLANCE DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT .....	16
0.6. MESURES DE REDUCTION DES RISQUES.....	17
0.6.1. <i>Mesures de gestion</i> .....	17
0.6.2. <i>Mesures structurelles</i> .....	18
0.6.3. <i>Mesures fonctionnelles</i> .....	18
0.6.4. <i>Amélioration des connaissances</i> .....	18
0.6.5. <i>Conclusion sur l'étude de réduction des risques</i> .....	19
<b>1. RENSEIGNEMENTS ADMINISTRATIFS</b> .....	<b>20</b>
1.1. PROPRIETAIRE DE L'OUVRAGE.....	20
1.2. GESTIONNAIRE DE L'OUVRAGE.....	20
1.3. REDACTEURS DE L'ETUDE DE DANGERS .....	20
1.4. CLASSEMENT DE LA DIGUE .....	21
<b>2. OBJET DE L'ETUDE</b> .....	<b>23</b>
2.1. CONTEXTE DE L'ETUDE.....	23
2.2. PERIMETRE DE L'ETUDE.....	23
2.2.1. <i>La levée de Bertignolles (val de Véron)</i> .....	23
2.2.2. <i>La zone protégée</i> .....	24
2.2.3. <i>Le milieu extérieur eau</i> .....	25
<b>3. ANALYSE FONCTIONNELLE DE L'OUVRAGE ET DE SON ENVIRONNEMENT</b> .....	<b>26</b>
3.1. DESCRIPTION DE L'OUVRAGE.....	26
3.1.1. <i>Principe de discrétisation du système d'endiguement</i> .....	26
3.1.2. <i>Définition du système d'endiguement étudié</i> .....	26
3.1.3. <i>Description de l'objectif de protection du système d'endiguement étudié</i> .....	28
3.1.4. <i>Principaux résultats de l'analyse fonctionnelle hydraulique</i> .....	32
3.1.5. <i>Analyse fonctionnelle structurelle interne du système d'endiguement étudié</i> .....	32
3.1.6. <i>Désordres, anomalies et singularités constatées</i> .....	51
3.2. DESCRIPTION DE L'ENVIRONNEMENT DES OUVRAGES .....	59
3.2.1. <i>La Loire</i> .....	59
3.2.2. <i>La rive opposée et les autres systèmes d'endiguement existants à proximité</i> .....	62

Conseil Départemental d'Indre-et-Loire (CD 37)  
Étude de dangers de la digue de Bertignolles - Rapport A 85656 vA

3.2.3.	<i>Raccordements amont et aval – Évaluation des zones sensibles au remous</i> .....	62
3.2.4.	<i>Estimation des enjeux présents dans la zone protégée</i> .....	63
3.2.5.	<i>Conclusion sur le classement du système d'endiguement</i> .....	69
3.3.	SYNTHESE DE L'ANALYSE FONCTIONNELLE .....	70
<b>4.</b>	<b>PRESENTATION DE LA POLITIQUE DE PREVENTION DES ACCIDENTS MAJEURS ET DU SYSTEME DE GESTION DE LA SECURITE</b> .....	<b>71</b>
4.1.	ORGANISATION DU GESTIONNAIRE DE LA DIGUE .....	71
4.2.	DOSSIER D'OUVRAGE .....	71
4.3.	CONSIGNES ECRITES .....	72
4.4.	SURVEILLANCE .....	73
4.5.	PROCEDURES D'ÉVALUATION DU RISQUE .....	82
4.5.1.	<i>Étude de dangers</i> .....	82
4.5.2.	<i>Revue de sûreté</i> .....	82
<b>5.</b>	<b>IDENTIFICATION ET CARACTERISATION DES POTENTIELS DE DANGERS</b> .....	<b>83</b>
5.1.	OUVERTURE D'UNE BRECHE PARTIELLE OU TOTALE SUR UN TRONÇON DE LA DIGUE.....	83
5.2.	SURVERSE SANS BRECHE AU-DESSUS DE LA CRETE D'UN TRONÇON DE LA DIGUE .....	84
5.3.	ENTREE D'EAU PAR LES CANALISATIONS TRAVERSANT LA DIGUE .....	84
5.4.	REMONTEE DE NAPPE DANS LE VAL EN ARRIERE DE LA DIGUE.....	84
5.5.	INONDATION PAR RUISSELLEMENT.....	85
<b>6.</b>	<b>CARACTERISATION DES ALEAS NATURELS</b> .....	<b>86</b>
6.1.	HYDROLOGIE : CRUES DE LA LOIRE.....	86
6.1.1.	<i>Présentation générale du bassin versant – genèse des crues</i> .....	86
6.1.2.	<i>Crues historiques</i> .....	87
6.1.3.	<i>Influence du barrage de Villerest sur l'hydrologie de la Loire à Langeais</i> .....	87
6.1.4.	<i>Détermination des débits de pointe pour les différentes crues de référence</i> .....	87
6.1.5.	<i>Influence de la rupture du barrage de Villerest</i> .....	88
6.2.	EMBACLES ET DEBACLES DE GLACE.....	89
6.2.1.	<i>Conséquences hydrauliques</i> .....	90
6.2.2.	<i>Conséquences morphodynamiques</i> .....	90
6.2.3.	<i>Conséquences mécaniques</i> .....	90
6.3.	IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE.....	90
6.4.	GEOLOGIE ET MORPHODYNAMIQUE.....	92
6.4.1.	<i>Géologie et morphologie de la Loire de Roanne au Bec de Maine (approche globale)</i> .....	92
6.4.2.	<i>Dynamique morphologique de la Loire dans le secteur du val de Véron (approche locale)</i> .....	92
6.4.3.	<i>Conséquences sur la levée</i> .....	96
6.5.	ALEA SISMIQUE .....	97
6.6.	ALEA KARSTIQUE .....	98
6.7.	SYNTHESE DE LA CARACTERISATION DES ALEAS NATURELS.....	102
<b>7.</b>	<b>ÉTUDE ACCIDENTOLOGIQUE ET RETOUR D'EXPERIENCE</b> .....	<b>103</b>
7.1.	ÉVÉNEMENTS RECENTS .....	103
7.1.1.	<i>Les évènements récents au droit du val du Véron – digue de Bertignolles</i> .....	103
7.1.2.	<i>Les conséquences de la crue de 2003 sur d'autres levées de la Loire</i> .....	104
7.1.3.	<i>Les incidents hors crue sur les autres levées de la Loire</i> .....	106
7.2.	CRUES HISTORIQUES.....	107
7.3.	ÉTUDE DES BRECHES HISTORIQUES .....	108
7.4.	ENSEIGNEMENT DES AUTRES BRECHES SUR LES LEVEES DE LA LOIRE .....	109
7.5.	RETOUR D'EXPERIENCE SUR D'AUTRES SYSTEMES D'ENDIGUEMENT .....	112
<b>8.</b>	<b>IDENTIFICATION ET CARACTERISATION DES RISQUES</b> .....	<b>113</b>

*Conseil Départemental d'Indre-et-Loire (CD 37)*  
*Étude de dangers de la digue de Bertignolles - Rapport A 85656 vA*

8.1.	DESCRIPTION ET PRINCIPES DE LA METHODOLOGIE.....	113
8.1.1.	<i>Principe général</i> .....	113
8.1.2.	<i>Caractérisation du potentiel de rupture</i> .....	114
8.2.	DETERMINATION DES SCENARIOS DE DEFAILLANCE ET ESTIMATION DE LEUR PROBABILITE D'OCCURRENCE .....	127
8.2.1.	<i>Niveau de protection apparent</i> .....	127
8.2.2.	<i>Résultats du modèle d'aléa de rupture</i> .....	127
8.2.3.	<i>Caractérisation des scénarii d'inondation retenus</i> .....	131
8.2.4.	<i>Synthèse des scénarii d'inondation par défaillance du système retenus</i> .....	133
8.3.	ESTIMATION DU RISQUE D'INONDATION PAR DEFAILLANCE DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT .....	133
8.3.1.	<i>Intensité de l'aléa inondation</i> .....	133
8.3.2.	<i>Vulnérabilité des enjeux</i> .....	141
8.3.3.	<i>Gravité des conséquences des scénarios d'inondation étudiés</i> .....	143
8.3.4.	<i>Criticité des scénarios</i> .....	143
<b>9.</b>	<b>ÉTUDE DE REDUCTION DES RISQUES .....</b>	<b>145</b>
9.1.	REDUCTION DES RISQUES PAR DES MESURES DE GESTION .....	145
9.1.1.	<i>Mesures à mettre en œuvre par le gestionnaire</i> .....	145
9.1.2.	<i>Mesures à mettre en œuvre sur le territoire</i> .....	152
9.2.	REDUCTION DES RISQUES PAR DES MESURES SUR LE SYSTEME D'ENDIGUEMENT .....	153
9.2.1.	<i>Mesures structurelles</i> .....	153
9.2.2.	<i>Mesures fonctionnelles</i> .....	156
9.3.	REDUCTION DES RISQUES EN AMELIORANT LES CONNAISSANCES ET LES METHODES.....	157
9.3.1.	<i>Amélioration de la connaissance des phénomènes</i> .....	157
9.3.2.	<i>Amélioration de la connaissance de l'ouvrage</i> .....	158
9.4.	SYNTHESE DES MESURES A ENGAGER PAR TYPE DE MESURE.....	159
9.4.1.	<i>Gestion du risque</i> .....	159
9.4.2.	<i>Amélioration structurelle et fonctionnelle du système de protection</i> .....	160
9.4.3.	<i>Amélioration des méthodes et connaissances</i> .....	160
9.5.	EFFICACITE DES MESURES ET NIVEAU DE SURETE RESIDUEL.....	161
9.6.	CONCLUSION SUR L'ÉTUDE REDUCTION DES RISQUES.....	163
<b>10.</b>	<b>CARTOGRAPHIE .....</b>	<b>164</b>

## LISTE DES FIGURES

*Sauf indication contraire, les figures sont orientées suivant le nord géographique et les échelles indiquées sur ces dernières sont en mètres.*

Figure 1 : Cartographie de la digue de Bertignolles selon l'arrêté préfectoral de classement du 11 décembre 2009 .....	13
Figure 2 : Sollicitations hydrauliques de la digue de Bertignolles .....	15
Figure 3* : Cartographie de la levée de Bertignolles selon les limites définies dans l'arrêté préfectoral de classement .....	22
Figure 4* : Digue de Bertignolles .....	24
Figure 5 : Principe de définition de la « zone protégée » .....	25
Figure 6* : Zone protégée par la digue de Bertignolles .....	25
Figure 7 : Schématisation du principe de discrétisation d'une levée (source : DREAL Centre) .....	26
Figure 8* : Remblai de la centrale nucléaire de Chinon en amont du secteur d'étude .....	27
Figure 9 : Schémas de présentation des notions de niveau de protection apparent et de niveau de sûreté (source : IRSTEA / DREAL Centre).....	29
Figure 10* : Sollicitations hydrauliques de la digue de Bertignolles .....	31
Figure 11 : Points caractéristiques d'une levée (source : DREAL Centre) .....	33
Figure 12 : Plan général - Établissement d'une chaussée déversée avec banquette partielle - 1928 .....	34
Figure 13 : Profils en travers type - Établissement d'une chaussée déversée avec banquette partielle - 1928.....	35
Figure 14 : Principe de confortement du pied de digue au droit de Bertignolles - 1938.....	37
Figure 15 : Plan général – Constitution d'une banquette entre le CD 749 et le CD 118 - 1979.....	38
Figure 16 : Profils en travers type – Constitution d'une banquette entre le CD 749 et le CD 118 – 1979 – à gauche, banquette en terre et à droite, murette .....	38
Figure 17 : Détail des bouchures – Constitution d'une banquette entre le CD 749 et le CD 118 – 1979 .....	39
Figure 18 : Profil en long hydraulique schématique – Constitution d'une banquette entre le CD 749 et le CD 118 – 1979.....	40
Figure 19 : Muret basculant vers la Loire (source : Travaux sur la digue de Bertignolles – Années 2013 à 2015) .....	40
Figure 20 : Travaux d'élargissement de la digue au PR 45 200 (source : Travaux sur la digue de Bertignolles – Années 2013 à 2015).....	41
Figure 21 : Réparations du muret (source : Travaux sur la digue de Bertignolles – Années 2013 à 2015).....	41
Figure 22 : Réfection de seuil de bouchure (source : Travaux sur la digue de Bertignolles – Années 2013 à 2015) .....	42
Figure 23 : Remplissage au béton et reconstitution du corps de chaussée (source : Travaux sur la digue de Bertignolles – Années 2013 à 2015).....	42
Figure 24 : Pose de grillage anti-fouisseur (source : Travaux sur la digue de Bertignolles – Années 2013 à 2015) .....	43
Figure 25 : Remplacement des portes de vidange par des clapets automatique : à gauche, côté Loire et à droite, côté val (source : Travaux sur la digue de Bertignolles – Années 2013 à 2015) .....	44
Figure 26 : Rénovation de la cale et du perré à Bertignolles (source : Antea Group).....	44
Figure 27 : Profil en long caractéristique de la ligne de défense principale du val du Véron .....	46
Figure 28* : Localisation des essais géotechniques et des travaux de renforcement réalisés en 2016 .....	47
Figure 29 : Profil en travers type de la levée courante de Bertignolles .....	49
Figure 30 : Profil en travers type de la levée de Bertignolles renforcée par un perré côté cours d'eau .....	50
Figure 31* : Localisation des bouchures sur la levée de Bertignolles .....	52
Figure 32* : Localisation des ouvrages traversants sur la levée de Bertignolles .....	54
Figure 33* : Localisation des bâtiments encastrés sur la levée de Bertignolles .....	56
Figure 34* : Caractérisation de la végétation présente sur la levée de Bertignolles .....	57
Figure 35* : Zones de présence (actuelle ou ancienne) d'animaux fouisseurs sur la levée de Bertignolles.....	59

Figure 36* : évolution morphologique de la Loire au droit du val de Véron entre 1956 et 2011 matérialisée sur les photographies aériennes de 2011 (source : Antea Group) .....	60
Figure 37* : Contact direct de la Loire avec la ligne de défense principale du val du Véron .....	61
Figure 38* : Autres systèmes d'endigements existants à proximité du secteur d'étude .....	62
Figure 39 : Sensibilité au remous de la Loire dans la zone protégée du val de Véron pour une crue T = 5 ans ....	63
Figure 40 : Entreprises (de plus de 10 salariés) présentes dans la zone protégée de la digue de Bertignolles .....	65
Figure 41* : Carte de synthèse des enjeux présents dans la zone protégée du val de Véron .....	68
Figure 42 : Niveaux de surveillance en crue (source : Consignes écrites) .....	78
Figure 43 : Nomenclature des événements importants (Source : Consignes écrites) .....	80
Figure 44 : Identification des zones de dépôt sédimentaire et d'érosion de 1850 à 1956 sur le secteur d'étude sur le fond des photographies aériennes de 1956 - (source : Antea Group) .....	94
Figure 45* : Identification des zones de dépôt sédimentaire et d'érosion de 1956 à 2011 sur le secteur d'étude sur le fond des orthophotoplans de 2011 (source : Antea Group) .....	94
Figure 46* : Mise en évidence des zones de développement de la végétation entre 1956 et 2011 (source : Antea Group) .....	96
Figure 47 : Carte de la sismicité en France .....	97
Figure 48 : Sensibilité à l'aléa karstique des levées de la Loire (source BRGM) .....	99
Figure 49 : Schémas de propagation d'un fontis de taille limitée (source : DREAL Centre) .....	100
Figure 50 : Schémas d'un effondrement karstique (source : DREAL Centre) .....	101
Figure 51 : Levée de Beffes-Henry – réparations d'urgence lors de la crue de 2003 (source : crédit photo DREAL Centre) .....	105
Figure 52 : Brèche dans la digue de Mauboux à Livry – crue de 2003 (source : crédit photo DREAL Centre) ....	105
Figure 53 : Déversoir de Saint-Martin-sur-Ocre aujourd'hui et lors de la crue de décembre 2003 (source : Google Earth et crédit photo DREAL Centre) .....	106
Figure 54 : Effondrement karstique sur la digue à Jargeau en 2009 et proche de la digue Saint-Pryvé-Saint-Mesmin en 2010 (source : crédit photo DREAL Centre) .....	106
Figure 55 : Glissement de la levée de Villandry en octobre 2012 (source : crédit photo DREAL Centre) .....	107
Figure 56 : Reconstitution de l'hydrogramme de la brèche de Jargeau - volume total de 270 Mm <sup>3</sup> (source : DREAL Centre) .....	109
Figure 57 : Développement de la fosse d'érosion de la brèche de Jargeau 1856 et 1866 - MNT Lidar 2002 (source : DREAL Centre) .....	110
Figure 58 : Brèche du château de l'Isles 1866 – MNT Lidar 2002 (source : DREAL Centre) .....	111
Figure 59 : Brèche du château de l'Isles 1866 – coupe schématique de la fosse d'érosion (source : DREAL Centre) .....	111
Figure 60 : Arbre de défaillance simplifié d'un scénario de rupture de digue par surverse .....	116
Figure 61 : Arbre de défaillance simplifié d'un scénario de rupture de digue par érosion interne .....	117
Figure 62 : Arbre de défaillance simplifié d'un scénario de rupture de digue par glissement côté val .....	117
Figure 63 : Arbre de défaillance simplifié d'un scénario de rupture de digue par glissement côté cours d'eau .....	118
Figure 64 : Arbre de défaillance simplifié d'un scénario de rupture de digue par érosion externe en pied de talus .....	119
Figure 65* : Probabilités annuelles tous modes de rupture confondus .....	130
Figure 66* : Localisation de la simulation de brèche en amont du lieu-dit La Mine .....	131
Figure 67* : localisation de la simulation de brèche en amont du bourg de Bertignolles .....	132
Figure 68 : Débits transitant en amont et au droit de la brèche SC1 .....	134
Figure 69* : Scénario de brèche en amont du lieu-dit « la Mine » (SC1) – Carte des hauteurs d'eau maximales .....	135
Figure 70* : Scénario de brèche en amont du lieu-dit « la Mine » (SC1) – Carte des vitesses d'écoulement maximales .....	136
Figure 71* : Scénario de brèche en amont du lieu-dit « la Mine » (SC1) – Carte de l'intensité de l'aléa hydraulique .....	137
Figure 72 : Débits transitant en amont et au droit de la brèche SC2 .....	138
Figure 73* : Scénario de brèche en amont du bourg de Bertignolles (SC2) – Carte des hauteurs d'eau maximales .....	139

Conseil Départemental d'Indre-et-Loire (CD 37)  
Étude de dangers de la digue de Bertignolles - Rapport A 85656 vA

Figure 74\* : Scénario de brèche en amont du bourg de Bertignolles (SC2) – Carte des vitesses d’écoulement maximales .....140

Figure 75\* : Scénario de brèche en amont du bourg de Bertignolles (SC2) – Carte de l’intensité de l’aléa hydraulique .....141

Figure 76\* : Sollicitation du système d’endiguement pour une crue T = 2 ans .....147

Figure 77\* : Sollicitation du système d’endiguement pour une crue T = 5 ans .....148

Figure 78 : Probabilités annuelles tous modes de rupture confondus sans mesures de réduction de risques...162

Figure 79 : Probabilités annuelles tous modes de rupture confondus avec mesures de réduction de risques...162



## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Crues étudiées dans le cadre de l'étude de dangers de la digue de Bertignolles .....	15
Tableau 2 : Description des ouvrages domaniaux selon la terminologie de l'arrêté préfectoral du 11 décembre 2009 .....	21
Tableau 3 : Définition de la ligne de défense principale du val de Véron en rive gauche de la Loire .....	28
Tableau 4 : Crues étudiées dans le cadre de l'étude de dangers de la digue de Bertignolles .....	30
Tableau 5 : Synthèse des fonctions hydrauliques associées au système d'endiguement du val de Véron et à son environnement.....	32
Tableau 6 : Statistiques sur les dépassements de cote à l'échelle du pont de Port-Boulet (source : Archives de Tours – S5288).....	36
Tableau 7 : Familles de fonctions des composants structurels (source : Irstea).....	48
Tableau 8 : Fonctions structurelles de chaque élément constitutif du profil en travers courant.....	49
Tableau 9 : Fonctions structurelles de chaque élément constitutif du profil en travers avec perré côté cours d'eau .....	51
Tableau 10 : Recensement des bouchures sur la levée de Bertignolles .....	52
Tableau 11 : Recensement des ouvrages traversants/débouchants sur la levée de Bertignolles .....	54
Tableau 12 : Recensement des réseaux présents sur la levée de Bertignolles .....	55
Tableau 13 : Recensement des bâtiments encastrés dans la levée de Bertignolles .....	55
Tableau 14 : Recensement des zones de présence d'animaux fouisseurs sur la levée de Bertignolles .....	58
Tableau 15 : Nombre de logements et de personnes résidentes présentes dans la zone protégée de la digue de Bertignolles et répartition par commune .....	64
Tableau 16 : Répartition par typologie de bâtiment de la population résidente dans la zone protégée de la digue de Bertignolles .....	64
Tableau 17 : Entreprises présentes dans la zone protégée de la digue de Bertignolles .....	64
Tableau 18 : ICPE présente dans la zone protégée par la digue de Bertignolles .....	65
Tableau 19 : Axe routier principal et linéaire de voirie interceptée par la zone protégée .....	66
Tableau 20 : Synthèse des enjeux identifiés au sein de la zone protégée .....	67
Tableau 21 : Caractéristiques du système d'endiguement .....	69
Tableau 22 : Définition des classes de digue selon l'article R.214-113 du Code de l'Environnement .....	69
Tableau 23 : Synthèse des fonctions contraintes du système d'endiguement du val de Véron et de son environnement.....	70
Tableau 24 : Organisation administrative et géographique des services départementaux (Source : Consignes écrites) .....	75
Tableau 25 : Crues de la Loire à Port-Boulet et à Langeais .....	87
Tableau 26 : Crues étudiées dans le cadre de l'étude de dangers du val de Véron.....	88
Tableau 27 : Bilan surfacique des phénomènes de dépôt et d'érosion .....	95
Tableau 28 : Synthèse des aléas naturels pris en compte dans l'étude de dangers de la digue de Bertignolles	102
Tableau 29 : Synthèse des dates et niveaux des crues de la Loire ayant atteint ou dépassé la hauteur 4,50 m à l'échelle de Port-Boulet (source : Archives de Tours – S5288) .....	104
Tableau 30 : Principales crues historiques de la Loire observées à Langeais et à Saumur .....	108
Tableau 31 : Enseignements des accidents sur d'autres systèmes d'endiguement .....	112
Tableau 32 : Fonctions et composants structurels sollicités dans le cas d'un scénario de rupture par surverse	116
Tableau 33 : Fonctions et composants structurels sollicités dans le cas d'un scénario de rupture par érosion interne.....	117
Tableau 34 : Fonctions et composants structurels sollicités dans le cas d'un scénario de rupture par glissement .....	118
Tableau 35 : Fonctions et composants structurels intervenant dans le cas d'un scénario de rupture par érosion externe .....	119
Tableau 36 : Grille d'analyse des probabilités événementielles utilisées pour caractériser la probabilité de défaillance pour une crue donnée .....	120

*Conseil Départemental d'Indre-et-Loire (CD 37)*  
*Étude de dangers de la digue de Bertignolles - Rapport A 85656 vA*

Tableau 37 : Grille d'analyse des probabilités de rupture annuelles (source : EDD des digues de classe A / DREAL Centre) .....	121
Tableau 38 : Crues de référence au droit du secteur d'étude du val de Bertignolles.....	122
Tableau 39 : Grille d'intensité de l'aléa inondation (source : EDD des digues de classe A / DREAL Centre) .....	124
Tableau 40 : Calcul de l'indicateur de population susceptible d'être en danger selon la typologie de bâtiment et l'intensité de l'aléa inondation .....	125
Tableau 41 : Calcul de l'indicateur « usagers susceptible d'être en danger » sur les axes routiers .....	125
Tableau 42 : Classes de gravité des scénarios d'inondation (source : guide de lecture des EDD des digues) ....	125
Tableau 43 : Matrice de criticité (source : EDD des digues de classe A / DREAL Centre) .....	126
Tableau 44 : Probabilité de rupture annuelle tous modes de rupture confondus .....	129
Tableau 45 : Niveau de protection apparent et niveau de sûreté associés au système d'endiguement du val de Véron.....	131
Tableau 46 : Tableau de synthèse des modélisations de brèches retenues .....	133
Tableau 47 : Estimation de la population impactée pour le scénario de brèche étudié en amont du lieu-dit « la Mine » pour un évènement d'occurrence 5 ans .....	142
Tableau 48 : Estimation de la population impactée pour le scénario de brèche étudié en amont du bourg de Bertignolles pour un évènement d'occurrence 5 ans .....	143
Tableau 49 : Gravité des scénarii d'inondation par défaillance considérés .....	143
Tableau 50 : Criticité des scénarios d'inondation par défaillance considérés .....	144
Tableau 51 : Matrice de criticité avec les scénarios d'inondation par défaillance considérés .....	144
Tableau 52 : Niveaux de surveillance N1 et N2 proposés .....	146
Tableau 53 : Débits de pointe de la Loire à Port Boulet et Langeais pour une période de retour de 2 ans et 5 ans.....	146
Tableau 54 : Conditions de sollicitation du système d'endiguement pour une crue T = 2 ans.....	147
Tableau 55 : Conditions de sollicitation du système d'endiguement pour une crue T = 5 ans.....	148
Tableau 56: Canalisations traversantes à traiter pour réhausser le niveau de sûreté de la levée du val de Véron.....	154
Tableau 57 : Mesures de gestion du risque à mettre en œuvre .....	160
Tableau 58 : Mesures visant à l'amélioration structurelle du système de protection.....	160
Tableau 59 : Mesures visant à l'amélioration des méthodes et connaissances .....	161

## LISTE DES ANNEXES

- Annexe 1 : Glossaire
- Annexe 2 : Arrêté préfectoral de classement de la digue
- Annexe 3 : Étude accidentologique
- Annexe 4 : Étude topographique
- Annexe 5 : Étude hydraulique
- Annexe 6 : Rapport d'étude géotechnique
- Annexe 7 : Ouvrages inclus
- Annexe 8 : Autres sollicitations et facteurs aggravants
- Annexe 9 : Morphodynamique
- Annexe 10 : Enjeux
- Annexe 11 : Analyse fonctionnelle
- Annexe 12 : Rapport de VTA – année 2016
- Annexe 13 : Présentation des scénarios d'inondation par brèche retenus en vue de réaliser les modélisations hydrauliques associées
- Annexe 14 : Note intensité et cinétique des inondations
- Annexe 15 : Résultats du modèle de rupture CARDigue profil par profil

## Préambule

L'étude de dangers du système d'endiguement de Bertignolles (37) est constituée du présent rapport et de ses annexes.

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

Le chapitre 2 précise les éléments de contexte.

Le chapitre 3 décrit la digue et son environnement.

Le chapitre 4 présente les éléments de gestion de la sécurité de l'ouvrage.

Le chapitre 5 identifie et caractérise les potentiels de dangers liés à la présence de la digue.

Le chapitre 6 détaille les aléas naturels auxquels est soumis l'ouvrage.

Le chapitre 7 propose une description et une analyse des accidents passés et du fonctionnement des ouvrages au cours des crues historiques.

Le chapitre 8, cœur de l'étude de dangers, présente l'analyse des risques liés à la rupture ou à la surverse de l'ouvrage.

Le chapitre 9 propose des mesures pour réduire les risques.

Le chapitre 10 constitue l'atlas des cartes auquel le lecteur est invité à se référer pour faciliter sa compréhension du texte. Les cartes figurant dans l'atlas sont présentées dans le corps du texte en format réduit et un astérisque (\*) est apposé après le numéro de la figure afin d'indiquer que celle-ci apparaît dans l'atlas.

Un glossaire est disponible en Annexe 1. Il vise à éclairer le lecteur sur la compréhension des termes techniques utilisés dans la présente étude.

## 0. Résumé non-technique de l'étude de dangers

### 0.1. Contexte et objectifs de l'Étude de dangers

L'étude de dangers de la digue de Bertignolles a été réalisée par la société Antea Group. Elle répond à une obligation réglementaire (art. R 214-115 du code de l'environnement) et fait suite à l'arrêté préfectoral du 11 décembre 2009.

Elle répond aux objectifs suivants :

- préciser la vocation et le fonctionnement du système d'endiguement,
- apprécier les phénomènes pouvant générer une défaillance de l'ouvrage,
- quantifier le risque de rupture en termes de probabilité d'apparition,
- évaluer les conséquences d'une défaillance sur les enjeux de la zone protégée,
- définir et hiérarchiser les mesures à mettre en œuvre pour rendre le risque de défaillance acceptable.

### 0.2. Composition du système d'endiguement

#### 0.2.1. Système d'endiguement

Le val de Véron est protégé des crues de la Loire par un système d'endiguement formé par la digue de Bertignolles d'une longueur de l'ordre de 4,2 km, classée par arrêté préfectoral en digue de classe C. Elle s'étend en rive gauche de la Loire depuis le pont de Port-Boulet (RD 749) jusqu'en aval immédiat du lieu-dit de Bertignolles situé sur la commune de Savigny-en-Véron.

Elle supporte en crête la route départementale RD 7 sur l'intégralité de son linéaire et « protège » le Val du Véron des crues de la Loire

La zone protégée par le système d'endiguement du val de Véron présente une superficie d'environ 548 ha et rassemble environ 327 habitants.

Conseil Départemental d'Indre-et-Loire (CD 37)  
Étude de dangers de la digue de Bertignolles - Rapport A 85656 vA

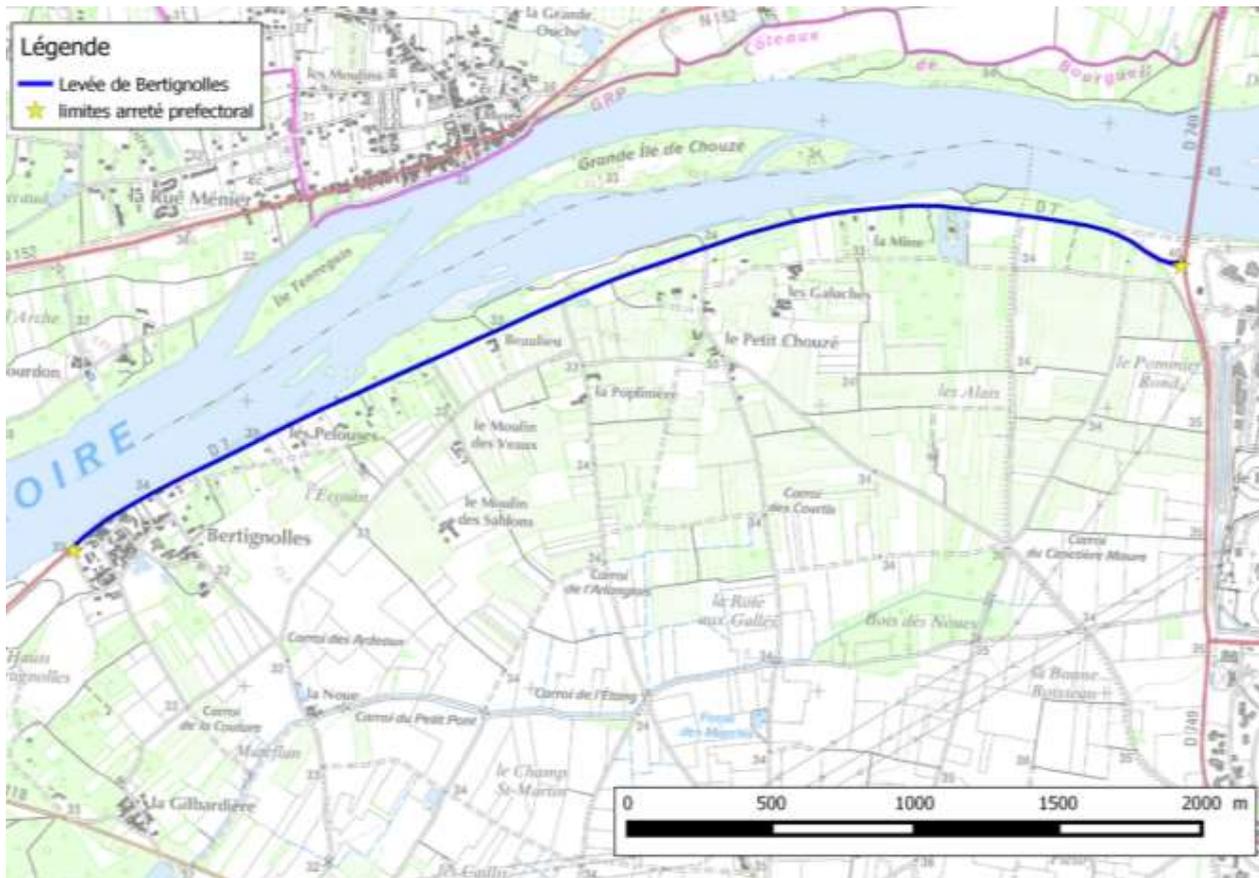


Figure 1 : Cartographie de la digue de Bertignolles selon l'arrêté préfectoral de classement du 11 décembre 2009

### 0.2.2. Constitution des ouvrages

Les premières traces de la digue de Bertignolles remontent à la construction du chemin de grande communication n° 17 (GC n° 17) dans les années 1869 à 1872. Le GC n° 17 a été construit à l'emplacement de l'ancien chemin de halage qui a été arasé en plusieurs points à la cote 4,50 m. Aucune information concernant la construction initiale du chemin de halage n'a été retrouvée dans les archives départementales.

Au fil des différentes crues de la Loire, la digue de Bertignolles a connu des travaux de renforcement et des projets d'aménagement et a ainsi largement évolué.

Les investigations géophysiques et géotechniques menées dans le cadre de la présente étude de dangers ont permis de définir la structure de la digue, qui est globalement constituée de formations silto-sablonneuses à sableuses et silto-argileuses sur des hauteurs de l'ordre de 2 m et repose sur des alluvions fluviales modernes silto-sablonneuses et sablo-graveleuses.

La connaissance initiale de l'ouvrage, les visites techniques approfondies réalisées ainsi que les investigations complémentaires menées dans le cadre de l'étude de dangers ont permis de mettre en

évidence un certain nombre d'anomalies pouvant influencer sur le comportement du système d'endiguement en cas de crue :

- canalisations traversantes,
- bâtiments encastrés dans la digue,
- végétation sur et aux abords de la digue,
- animaux fouisseurs.

### **0.3. Potentiels de dangers liés au système d'endiguement**

Le principal potentiel de danger est l'irruption accidentelle d'eau dans la zone protégée lors d'une crue de la Loire. Cette entrée d'eau accidentelle peut être due aux phénomènes suivants (classés par ordre de gravité décroissante) :

- ouverture d'une brèche partielle ou totale sur un tronçon de digue,
- la surverse sans brèche au-dessus de la crête d'un tronçon de digue,
- dysfonctionnement des clapets anti-retours des canalisations traversant la digue.

À noter que d'autres phénomènes qui ne sont pas directement liés à la digue peuvent être à l'origine d'inondations dans la zone protégée : contournement de la levée au niveau de la zone de raccordement aval (remous à l'aval de la levée), remontée de nappe, etc.

### **0.4. Niveau de protection apparent et niveau de sûreté du système d'endiguement**

Le niveau de protection apparent 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.

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 n'est plus considérée comme négligeable.

La notion de sûreté renvoie au risque de rupture tandis que le terme apparent fait référence au phénomène de surverse de l'ouvrage.

Dans un système d'endiguement parfaitement fiable, le niveau de sûreté serait supérieur ou égal au niveau de protection apparent. 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 d'une digue équipée d'un déversoir, lorsque le débit transitant sur ce dernier dépasse sa capacité maximale.

Dans le cas du système d'endiguement du val de Véron, et plus généralement sur les ouvrages existants sur la Loire, le risque de rupture avant surverse ne peut pas être considéré comme négligeable et le niveau de sûreté est inférieur au niveau de protection apparent.

#### 0.4.1. Niveau de protection apparent

Dans le cadre de la présente étude, les crues théoriques suivantes ont été modélisées :

Scénarios étudiés	Période de retour	Débit de pointe (m <sup>3</sup> /s)			Cote maximale à Saumur (m NGF)
		Loire à Langeais	Vienne à Chinon	Indre à Marnay	
HYDRA Q <sub>2</sub>	2 ans	2 720	780	140	27,60
HYDRA Q <sub>5</sub>	5 ans	3 565	985	190	28,46
HYDRA Q <sub>10</sub>	10 ans	4 015	1 135	235	28,91
HYDRA Q <sub>20</sub>	20 ans	4 680	1 260	285	29,46

Tableau 1 : Crues étudiées dans le cadre de l'étude de dangers de la digue de Bertignolles

La figure ci-après présente les lignes d'eau modélisées ainsi que le profil en long de la crête de digue et du pied de digue côté val.

On considèrera que le niveau de protection apparent du système d'endiguement du val de Véron se situe au niveau d'eau lié à la crue d'occurrence 5 ans.

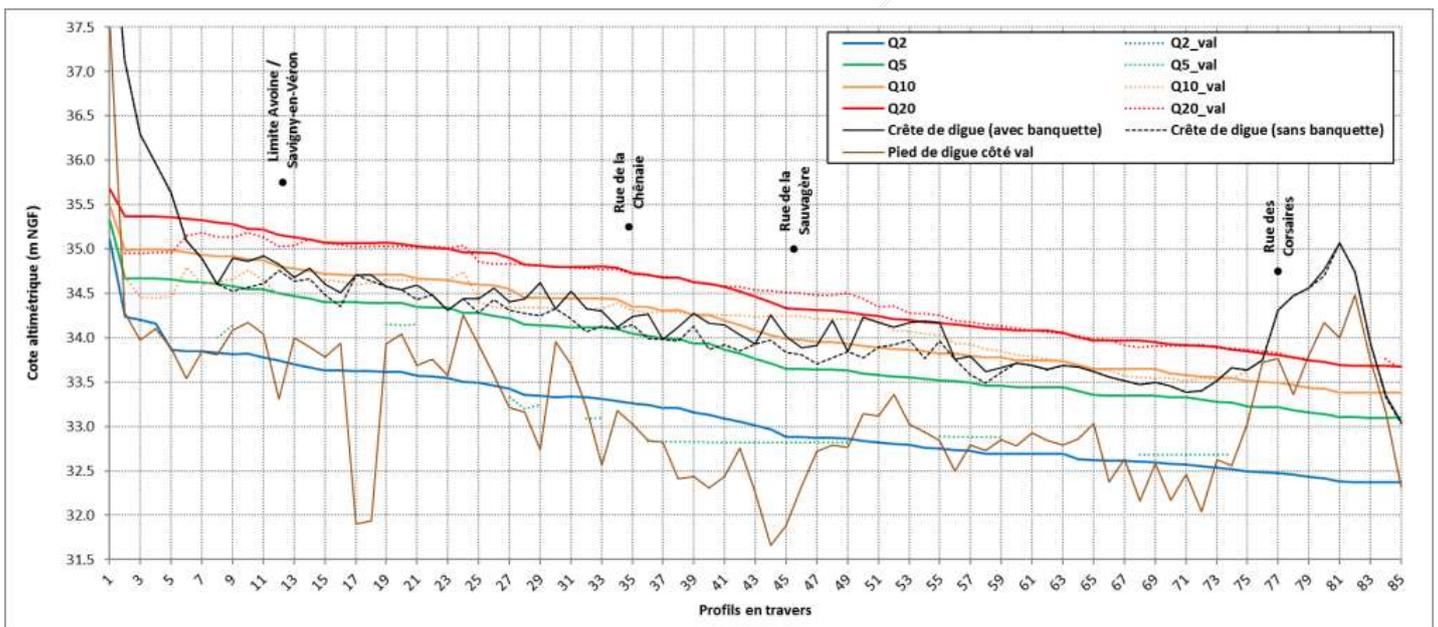


Figure 2 : Sollicitations hydrauliques de la digue de Bertignolles

#### 0.4.2. Défaillance du système d'endiguement et niveau de sûreté

L'analyse des fonctions des différents composants de la digue, de leurs défaillances et de leurs effets a permis de mettre en relief quatre modes de rupture possibles de cette dernière :

- rupture par surverse,
- rupture par érosion interne,

- rupture par érosion externe puis érosion interne,
- rupture par glissement de talus côté Loire puis érosion interne.

Parmi les cinq modes de défaillance classiquement considérés pour les digues, la rupture par soulèvement hydraulique n'a pas été retenue comme mode de défaillance possible pour la digue de Bertignolles dans la mesure où l'ouvrage ne repose pas sur un horizon superficiel imperméable continu.

L'estimation des probabilités de défaillance pour chaque mode de rupture et chaque crue considérée a été conduite par discrétisation de la digue en tronçons de 50 mètres. Chaque tronçon est décrit par :

- sa géométrie,
- son niveau de sollicitation hydraulique issu des lignes d'eau modélisées,
- les désordres, anomalies et singularités identifiés,
- la nature des sols supports,
- l'organisation mise en place par le gestionnaire pour surveiller l'ouvrage.

Le modèle de calculs utilisé est l'outil CARDigue, développé dans le cadre des études de dangers des digues de classe A de la Loire moyenne et utilisé pour l'ensemble des digues domaniales de classes B et C de la Loire et de ses affluents.

Dans le cadre de la présente étude, le paramétrage de l'outil de calculs a été testé vis-à-vis de l'érosion interne afin d'assurer la cohérence des résultats avec les investigations géotechniques réalisées dans le cadre de la présente étude.

Le risque de rupture est avéré dès la crue de période de retour de 5 ans au droit de 15 profils ce qui représente environ 18 % du linéaire de la digue.

**En conséquence, le niveau de sûreté de la digue de Bertignolles peut donc être rattaché à la crue de période de retour 5 ans correspondant à un débit de 3 750 m<sup>3</sup>/s au pont de Port-Boulet (soit environ 3 565 m<sup>3</sup>/s à l'échelle de Langeais<sup>1</sup>).**

## **0.5. Caractérisation de la gravité du risque associé à la défaillance du système d'endiguement**

L'étude de dangers évalue le risque d'inondation dans la zone protégée, à travers différents scénarios d'inondation qui ont été simulés avec des outils de modélisation hydraulique.

Pour chacun d'eux, la gravité de l'inondation générée par la défaillance de la digue est estimée par le nombre de victimes potentielles. Les valeurs fournies intègrent également les enjeux concernés par le remous de la Loire, contournant le système d'endiguement, lorsque celui-ci a une incidence. La criticité du scénario est ensuite évaluée en croisant la gravité de l'inondation et la probabilité de rupture de la digue.

---

<sup>1</sup> Avec une hypothèse de débit de pointe de l'ordre de 190 m<sup>3</sup>/s pour l'Indre et de 985 m<sup>3</sup>/s pour la Vienne

Les scénarios d'inondation par défaillance du système ont été déterminés à partir :

- des résultats de l'analyse fonctionnelle hydraulique du système d'endiguement (connaissance du niveau de protection apparent du système d'endiguement),
- des résultats de la mise en œuvre du modèle d'aléa de rupture (identification des tronçons présentant une probabilité non négligeable de se rompre),
- de la localisation des enjeux (choix du scénario le plus pénalisant),
- de la volonté de simuler un scénario qui touche l'ensemble de la zone protégée.

Deux scénarios d'inondation par défaillance ont été simulés sur la levée du val de Véron :

- ouverture d'une brèche en amont du lieu-dit La Mine,
- ouverture d'une brèche en amont du lieu-dit de Bertignolles.

Par ailleurs, la zone située à l'arrière immédiat d'une brèche est le lieu d'une dissipation importante d'énergie, liée à l'entrée brutale des eaux dans la zone protégée. L'analyse des brèches historiques connues sur la Loire montre que la dissipation d'énergie peut provoquer la destruction du bâti et l'apparition de fosses d'érosion dans le terrain naturel. En conséquence, une zone dite « de destruction du bâti » est matérialisée en aval du site de brèche modélisé afin de représenter ce phénomène.

## 0.6. Mesures de réduction des risques

Au regard de l'analyse de risques menée sur le système d'endiguement du val de Véron et dans l'objectif d'atteindre un niveau de risque aussi bas que possible, un programme de mesures de réduction du risque a été élaboré. Il comprend :

- des mesures de gestion, qui visent à améliorer et à consolider l'organisation et la surveillance de l'ouvrage, notamment en cas de crue,
- des mesures structurelles, qui ont vocation à rapprocher au maximum le niveau de sûreté de l'ouvrage de son niveau de protection apparent,
- des mesures visant à améliorer la connaissance des phénomènes, de l'ouvrage, ainsi que les méthodes d'analyse de risques.

Les principales mesures de ce programme sont présentées de manière synthétique ci-après.

### 0.6.1. Mesures de gestion

L'étude de dangers a permis de mettre en lumière plusieurs axes d'amélioration de la gestion actuelle et de diminuer la gravité en cas d'inondation causée par la défaillance du système d'endiguement :

- établissement de consignes de surveillance basées sur l'activation de trois niveaux (un niveau hors crue et deux niveaux en crue),
- surveillance spécifique au droit des canalisations,
- maintien du programme d'entretien de l'ouvrage,
- gestion de l'usage de la digue par la mise en place d'AOT et/ou de convention,

- élaboration d'un plan d'évacuation de mise en sécurité des populations exposées,
- porter à la connaissance des acteurs concernés, les résultats de l'étude de dangers (le maire pour le Plan Communal de Sauvegarde, le préfet pour le PPRI, le SPC pour la prévision des crues et les gestionnaires de réseaux).

#### 0.6.2. Mesures structurelles

L'étude de dangers menée met en évidence la nécessité de proposer des mesures structurelles visant à rapprocher le niveau de sûreté du niveau de protection apparent. Pour cela, un programme d'actions devra être engagé :

- diagnostic puis traitement des canalisations traversantes les plus préjudiciables,
- diagnostic puis traitement de la végétation ligneuse présente sur la levée et en pied de digue,
- inspection de l'intérieur des bâtiments encastrés dans les talus,
- mise en place de "chemins de service", aussi bien côté Loire que côté val, permettant d'assurer l'inspection des pieds de digue,
- diagnostic puis traitement des tronçons concernés vis-à-vis de leur sensibilité au glissement et à l'érosion interne.

#### 0.6.3. Mesures fonctionnelles

Les mesures fonctionnelles visent à assurer un niveau de sûreté de la digue supérieur au niveau de protection apparent, c'est-à-dire à permettre la surverse sans création de brèche.

La présente étude a mis en évidence que le niveau de protection apparent du système d'endiguement (c'est-à-dire le niveau de la crête de digue) correspond à une crue de période de retour de 5 ans pour le val de Véron.

L'étude a mis en évidence la présence de certains points bas sur la digue de Bertignolles. Ces points bas pourront faire l'objet d'une rehausse dans l'objectif de niveler globalement la crête de digue en cohérence avec les lignes d'eau attendues.

#### 0.6.4. Amélioration des connaissances

Cette amélioration porte sur les phénomènes et les approches complexes tels que l'hydrologie fine de la Loire et de ses affluents, l'impact du changement climatique, l'évolution du lit de la Loire, la formation des brèches, le phénomène d'érosion interne ou les méthodes de calculs des probabilités de rupture des digues.

L'étude de dangers a également mis en avant la nécessité d'approfondir le diagnostic du système d'endiguement (canalisations traversantes, incidence de la végétation sur le risque de défaillance du système d'endiguement, etc.).

#### 0.6.5. Conclusion sur l'étude de réduction des risques

L'étude de dangers a mis en évidence l'importance du maintien voire du renforcement du dispositif d'entretien, de surveillance et de gestion du système d'endiguement.

Les principales mesures à mettre en place pour fiabiliser au maximum le niveau de sûreté de la digue (égal à son niveau de protection apparent) sont les suivantes :

- adapter les consignes de surveillance du système d'endiguement au regard des conclusions de l'étude de dangers (priorité de niveau 1),
- surveiller de façon spécifique lors des épisodes de crue les points de vigilance suivant : les canalisations traversantes (priorité 1),
- diagnostiquer (priorité 1) puis traiter les canalisations traversantes les plus préjudiciables (priorité 2),
- établir un plan d'action de traitement de la végétation, puis un diagnostic des sujets les plus préjudiciables (priorité 1) pouvant conduire à l'abattage des principaux sujets ligneux (priorité 2),
- évaluer et traiter la sensibilité à l'érosion interne et au glissement des tronçons concernés (priorité 2).

**La mise en œuvre de l'ensemble des mesures de réduction du risque structurelles et de gestion sur le système d'endiguement du val de Véron permet de maintenir le niveau de sûreté de la digue à une crue de période de retour de 5 ans.**

Au regard du niveau de protection faible et du peu d'enjeux concernés, des études complémentaires pourraient être réalisées afin de statuer sur le devenir de cet ouvrage :

- étude d'un scénario d'effacement de la digue permettant de préciser le rôle joué par cette dernière,
- précision de la zone de dissipation d'énergie (ZDE) sur l'ensemble du linéaire de l'ouvrage afin d'affiner la connaissance des enjeux concernés et améliorer la gestion de crise (évacuation préalable),
- étude d'un scénario de résistance à la surverse (mise en place de déversoirs) et/ou de mise en transparence (mise en place de dalots) afin de réduire le risque de rupture.

# 1. Renseignements administratifs

## 1.1. Propriétaire de l'ouvrage

La digue de Bertignolles située dans le département d'Indre-et-Loire est la propriété du Conseil Départemental d'Indre-et-Loire. Le Président du Conseil Départemental d'Indre-et-Loire est le représentant du propriétaire de la digue de Bertignolles et est à ce titre porteur de l'étude de dangers relative à la digue.

## 1.2. Gestionnaire de l'ouvrage

Le Conseil Départemental d'Indre-et-Loire est gestionnaire de la levée de Bertignolles sur l'ensemble de son linéaire.

Le Service Études et Travaux Neufs de la Direction des Routes et Transports est chargé de la gestion de la digue ainsi que de la maîtrise d'ouvrage des opérations d'entretien de celle-ci.

La gestion consiste en :

- la surveillance de la digue,
- l'entretien et la maintenance de celle-ci ainsi que des ouvrages associés (vannes, clapets, bouchures, etc.).

La levée de Bertignolles connaît d'autres usages que celui de protection contre les inondations. En l'occurrence, la crête de la digue supporte la route départementale RD7 sur l'ensemble de son linéaire. Les autres usages sont autorisés par le gestionnaire sous forme d'Autorisation d'Occupation Temporaire (AOT) du Domaine Public Fluvial (DPF) ou bien de convention de gestion.

## 1.3. Rédacteurs de l'étude de dangers

L'étude de dangers du système d'endiguement de Bertignolles est rédigée par Antea Group, société agréée au titre du décret du 11 décembre 2007 pour la rubrique « Dignes et barrages – études et diagnostics » sous le numéro 59-a, par l'arrêté du 15 novembre 2011 portant agrément d'organismes intervenant pour la sécurité des ouvrages hydrauliques.

Cette étude s'inscrit dans l'environnement de la digue domaniale de classe A du val d'Authion, ayant fait l'objet d'une étude de dangers menée par la DREAL Centre. Dans un souci de cohérence, le Conseil Départemental d'Indre-et-Loire a fait le choix d'appliquer la méthodologie appliquée aux digues domaniales de la Loire et de ses affluents. La présente étude de dangers reprend ainsi la méthodologie élaborée par la DREAL Centre et l'IRSTEA pour la réalisation des études de dangers des digues domaniales de classe B et C de la Loire et de ses affluents.

Elle a été dirigée par Romain DE BORTOLI, ingénieur de projets au sein de l'équipe Aménagements Hydrauliques et Inondations du pôle Eau d'Antea Group et supervisée par Sylvain PALIX, responsable

du Pôle Eau.

La liste complète des rédacteurs de la présente étude de dangers est présentée ci-dessous :

- Romain DE BORTOLI et Kristelle RIANO, Antea Group, ingénieurs hydrauliciens
- Rémi ALEZAIS et Pierre CAZES, Antea Group, ingénieurs géotechniciens.

#### 1.4. Classement de la digue

La digue de Bertignolles se situe en rive gauche de la Loire sur les communes d'Avoine et de Savigny-en-Véron. Elle « protège » le val du Véron des crues de la Loire.

Elle n'a pas fait l'objet d'autorisation préalable compte tenu de son ancienneté. Elle est réputée autorisée en application des dispositions de l'article L.214-6 du Code de l'Environnement

La levée de Bertignolles est classée au titre de l'article R.214-112 du Code de l'Environnement par arrêté préfectoral n°09.E.28 en date du 11 décembre 2009. Selon ledit arrêté préfectoral, cet ouvrage relève de la classe C.

Elle couvre le tronçon suivant situé en rive gauche de la Loire :

Digue (n° de tronçons BARDIGUES)	Coordonnées (Lambert 93)		Longueur (km)	Classement
Bertignolles (370023)	X <sub>Amont</sub> : 485 212,81 Y <sub>Amont</sub> : 6 685 353,60	X <sub>Aval</sub> : 481 352,52 Y <sub>Aval</sub> : 6 684 356,29	4,2 km	C

**Tableau 2 : Description des ouvrages domaniaux selon la terminologie de l'arrêté préfectoral du 11 décembre 2009**

La localisation de cette levée est présentée sur la Figure 3 en page 22.

En vue de mettre en conformité la levée de Bertignolles avec les dispositions du Code de l'Environnement et les arrêtés du 29 février 2008 et du 3 mai 2013, l'arrêté préfectoral de classement du 11 décembre 2009 prescrit les dispositions suivantes :

- constitution du dossier d'ouvrage avant le 31 décembre 2010,
- description de l'organisation mise en place pour assurer l'exploitation et la surveillance de l'ouvrage avant le 31 décembre 2010,
- production et transmission pour approbation par le Préfet des consignes écrites avant le 31 décembre 2010,
- transmission au service de la police de l'eau du compte-rendu des Visites Techniques Approfondies avant le 31 décembre 2012 puis tous les 2 ans,
- transmission au service de la police de l'eau du rapport de surveillance avant le 31 décembre 2012 puis tous les 5 ans,
- réalisation d'un diagnostic de sûreté avant le 31 décembre 2009,
- réalisation d'une étude de dangers avant le 31 décembre 2014.

L'arrêté préfectoral mentionné précédemment est joint à la présente étude de dangers en Annexe 2.

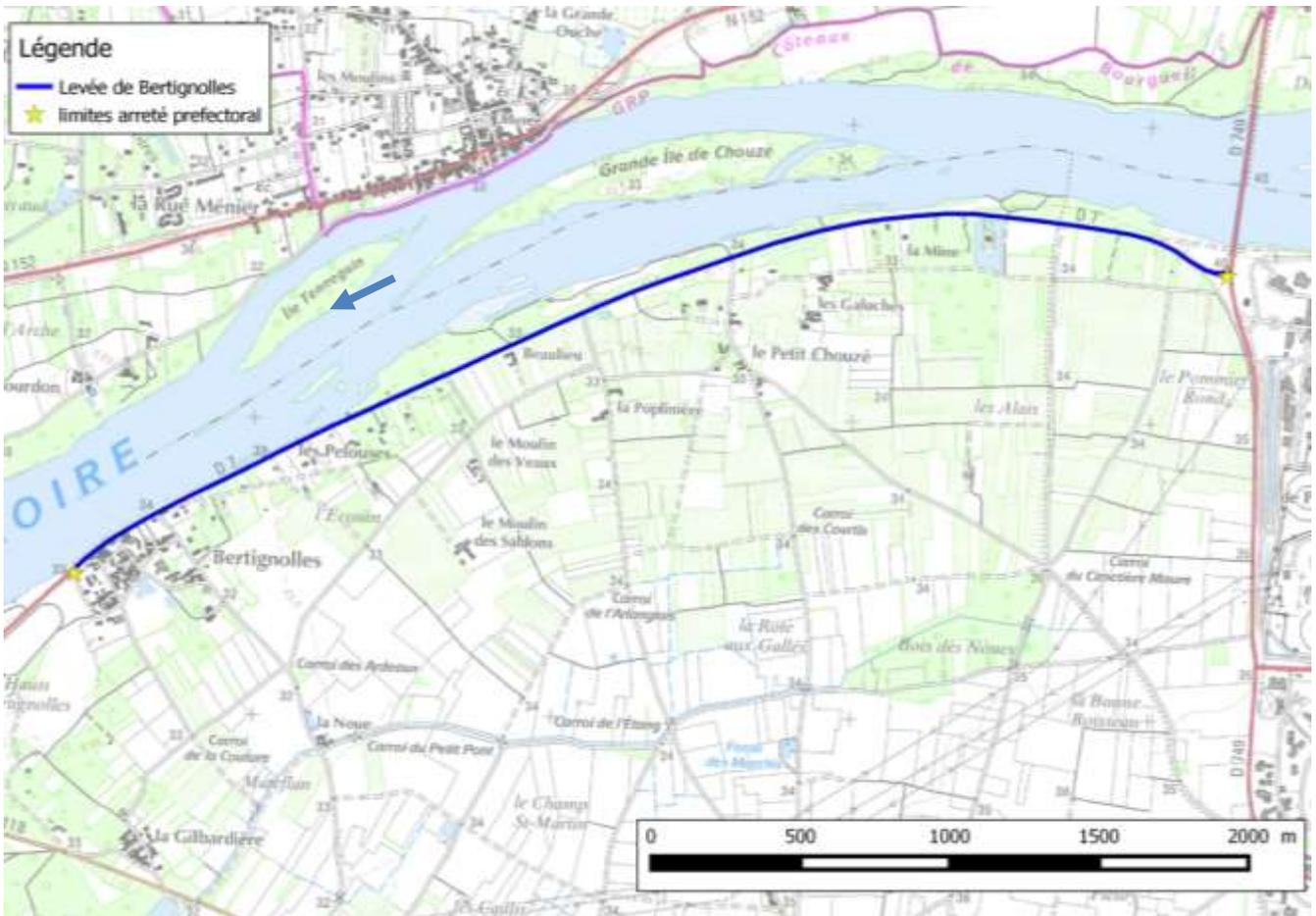


Figure 3\* : Cartographie de la levée de Bertignolles selon les limites définies dans l'arrêté préfectoral de classement

## 2. Objet de l'étude

### 2.1. Contexte de l'étude

L'étude de dangers de la digue de Bertignolles répond à une obligation réglementaire, conformément :

- aux articles R214-115 à R214-117 du décret n°2007-1735 du 11 décembre 2007 relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques et au CTPBOH<sup>2</sup> et modifiant le Code de l'Environnement (sous-section 2 « Étude de dangers »),
- à l'arrêté du 12 juin 2008 définissant le plan de l'étude de dangers des barrages et des digues et en précisant le contenu.

Le présent document constitue la première étude de dangers réalisée sur la digue de Bertignolles.

L'étude de dangers constitue un outil opérationnel. Elle a pour objectifs de :

- déterminer les niveaux de sûreté et de protection de l'ouvrage,
- définir et préciser la surveillance des ouvrages et équipements qui composent la digue, notamment en période de crue,
- définir et hiérarchiser les travaux de renforcement et de réparation à programmer,
- alimenter l'éventuel porté à connaissance du Plan de Prévention des Risques d'Inondation du val de Vienne et les réflexions liées à la gestion de crise.

L'élaboration d'un Plan de Prévention des Risques d'Inondation (PPRI) du val de Vienne englobant les communes d'Avoine et de Savigny-en-Véron traversées par la levée de Bertignolles a été prescrite par arrêté préfectoral du 15 septembre 2009. Le PPRI a été approuvé par arrêté préfectoral n° 15-12 en date du 9 mars 2012.

### 2.2. Périmètre de l'étude

Le périmètre de l'étude de dangers du système d'endiguement étudié se définit par :

- le système d'endiguement en lui-même et ses fondations,
- la zone protégée par le système,
- le milieu extérieur eau en contact avec la digue étudiée.

#### 2.2.1. La levée de Bertignolles (val de Véron)

La levée de Bertignolles s'étend en rive gauche de la Loire, depuis le Pont de Port Boulet (RD 749) jusqu'en aval immédiat du lieu-dit « Bertignolles » situé sur la commune de Savigny-en-Véron.

---

<sup>2</sup> Comité Technique Permanent des Barrages et des Ouvrages Hydrauliques

D'après l'analyse topographique effectuée dans le cadre de la présente étude de dangers, la digue de Bertignolles présente une longueur de l'ordre de 4 280 m.

Elle supporte en crête la route départementale RD 7 sur l'intégralité de son linéaire et « protège » le Val du Véron des crues de la Loire.



Figure 4\* : Digue de Bertignolles

### 2.2.2. La zone protégée

La « zone protégée » est l'entité géographique protégée de l'inondation du cours d'eau par un ensemble cohérent de digues ou d'ouvrages jouant un rôle de protection. Il s'agit d'une zone réputée inondable en l'absence d'un système d'endiguement dont l'effet est de diminuer l'aléa inondation en termes de probabilité, d'intensité, de durée ou de temps d'arrivée.

La « zone protégée » par la digue objet de la présente étude de dangers a été déterminée par projection de l'altitude de la crête de l'ouvrage sur le terrain naturel situé en aval<sup>3</sup>.

Il est à noter qu'à l'extrémité aval de la digue, le terrain naturel situé sous le niveau du pied de digue ne fait pas partie intégrante de la zone protégée, étant donné que le caractère inondable de cette zone n'est pas conditionné par la présence ou non de la digue.

Par ailleurs, l'attention du lecteur est attirée sur le fait que la zone n'est réellement protégée par le

<sup>3</sup> Cf. rapport du CETE Méditerranée / Cemagref Aix-en-Provence, détermination de la hauteur et de la zone protégée d'une digue en vue de son classement pour l'application du décret du 11 décembre 2007.

système d'endiguement que pour les hauteurs d'eau inférieures aux niveaux de sûreté et de protection apparent que la présente étude a vocation à définir. La méthode de délimitation de la « zone protégée » considère à ce stade que la digue ne rompt pas.

Cette délimitation vise avant tout à identifier les enjeux potentiellement protégés par l'ouvrage dans le cadre de son classement.

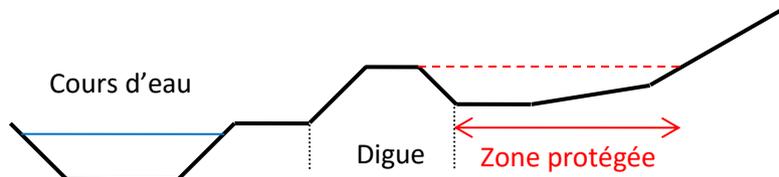


Figure 5 : Principe de définition de la « zone protégée »

La zone protégée par la levée de Bertignolles couvre en rive gauche de la Loire les communes d'Avoine et Savigny-en-Véron. Elle présente une superficie d'environ 548 ha.

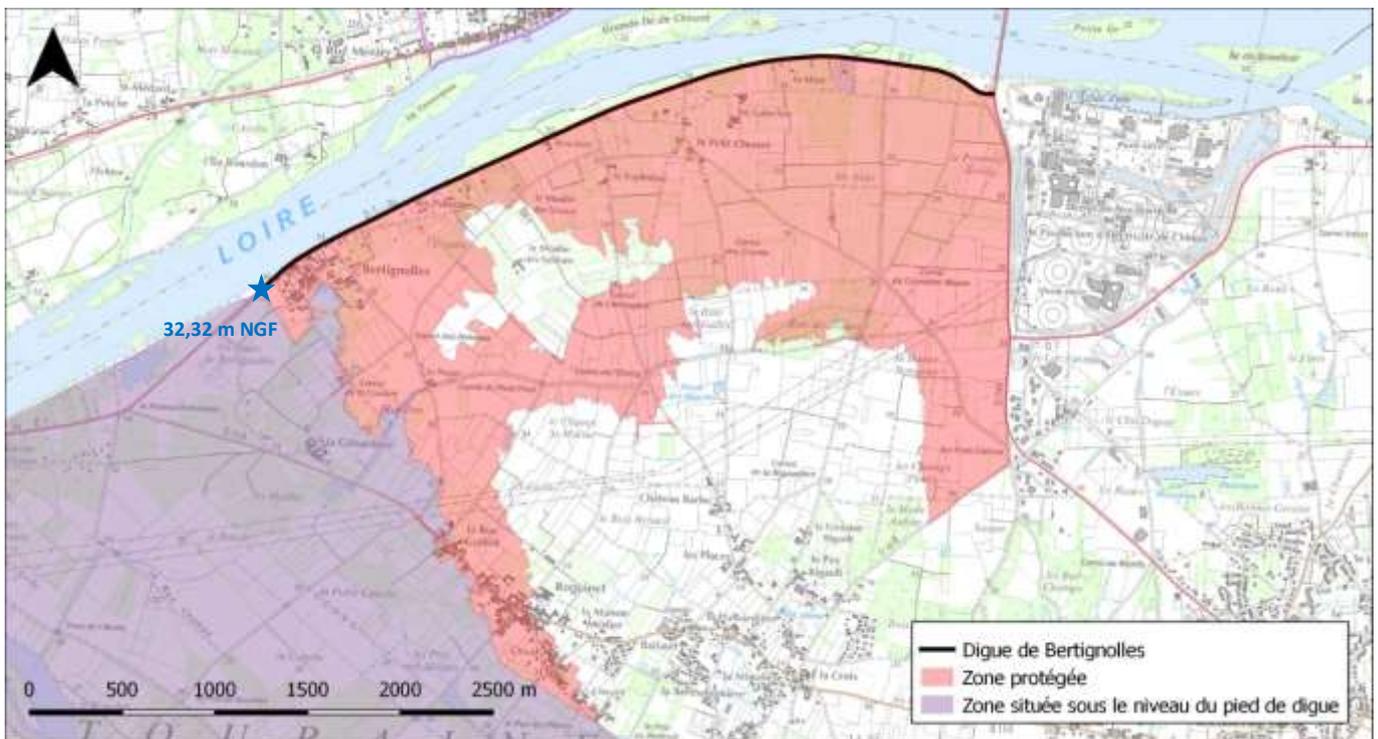


Figure 6\* : Zone protégée par la digue de Bertignolles

### 2.2.3. Le milieu extérieur eau

La digue de Bertignolles est en contact avec la Loire majoritairement sur sa partie aval le long du bourg de Bertignolles, soit sur environ 1 100 mètres.

### 3. Analyse fonctionnelle de l'ouvrage et de son environnement

L'analyse fonctionnelle vise à permettre la compréhension des différentes fonctions du système d'endiguement, afin d'être en mesure d'identifier chaque source potentielle de dangers lors de l'analyse des risques (chapitre 8).

On distingue la description de l'ouvrage en lui-même, qui peut être approché à différentes échelles de façon à définir les fonctions internes et externes du système d'endiguement et la description des interactions de l'ouvrage avec son environnement.

#### 3.1. Description de l'ouvrage

##### 3.1.1. Principe de discrétisation du système d'endiguement

La digue de Bertignolles est discrétisée par des profils en travers tracés perpendiculairement à la digue et espacés de 50 mètres. Chaque profil étudié est considéré représentatif du tronçon constitué des 25 mètres de linéaire de digue situés en amont et aval dudit profil.

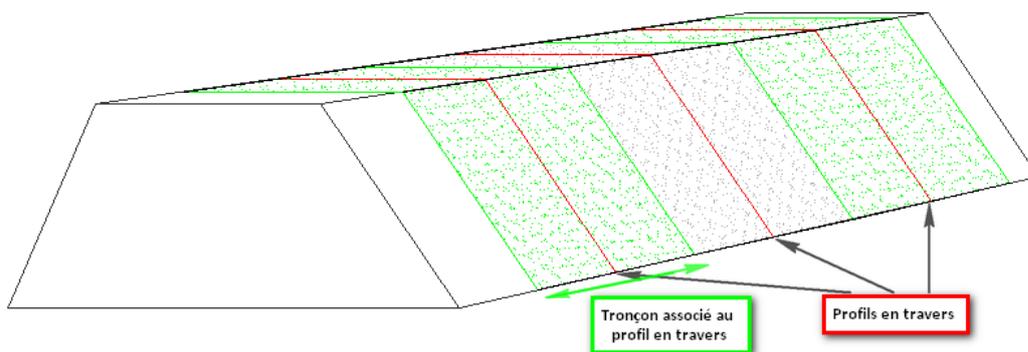


Figure 7 : Schématisation du principe de discrétisation d'une levée (source : DREAL Centre)

Cette méthodologie a conduit à discrétiser la levée de Bertignolles en 85 profils en travers.

##### 3.1.2. Définition du système d'endiguement étudié

###### ❖ Ligne de défense principale

La ligne de défense principale est la ligne qui sépare le cours d'eau et la zone protégée. Elle est définie par l'analyse conjointe du gestionnaire de la digue et du bureau d'étude technique en charge de la présente étude de dangers.

Son tracé, qui découle d'analyses topographiques et hydrauliques, est présenté sur la Figure 10 en page 31.

La digue de Bertignolles s'étend en rive gauche de la Loire, depuis le pont de Port-Boulet (RD 749) jusqu'en aval immédiat du lieu-dit « Bertignolles », situé sur la commune de Savigny-en-Véron, où la crête de digue rejoint le niveau du terrain naturel. Elle présente une longueur totale de 4,2 km.

Pour rappel, la digue de Bertignolles correspond également au remblai routier de la RD 7 sur l'intégralité de son linéaire.

#### ❖ Ouvrages secondaires

Le val du Véron est « fermé » à l'amont par les remblais de la centrale nucléaire de Chinon. La topographie de la centrale et des terrains alentours est présentée sur la figure ci-dessous.

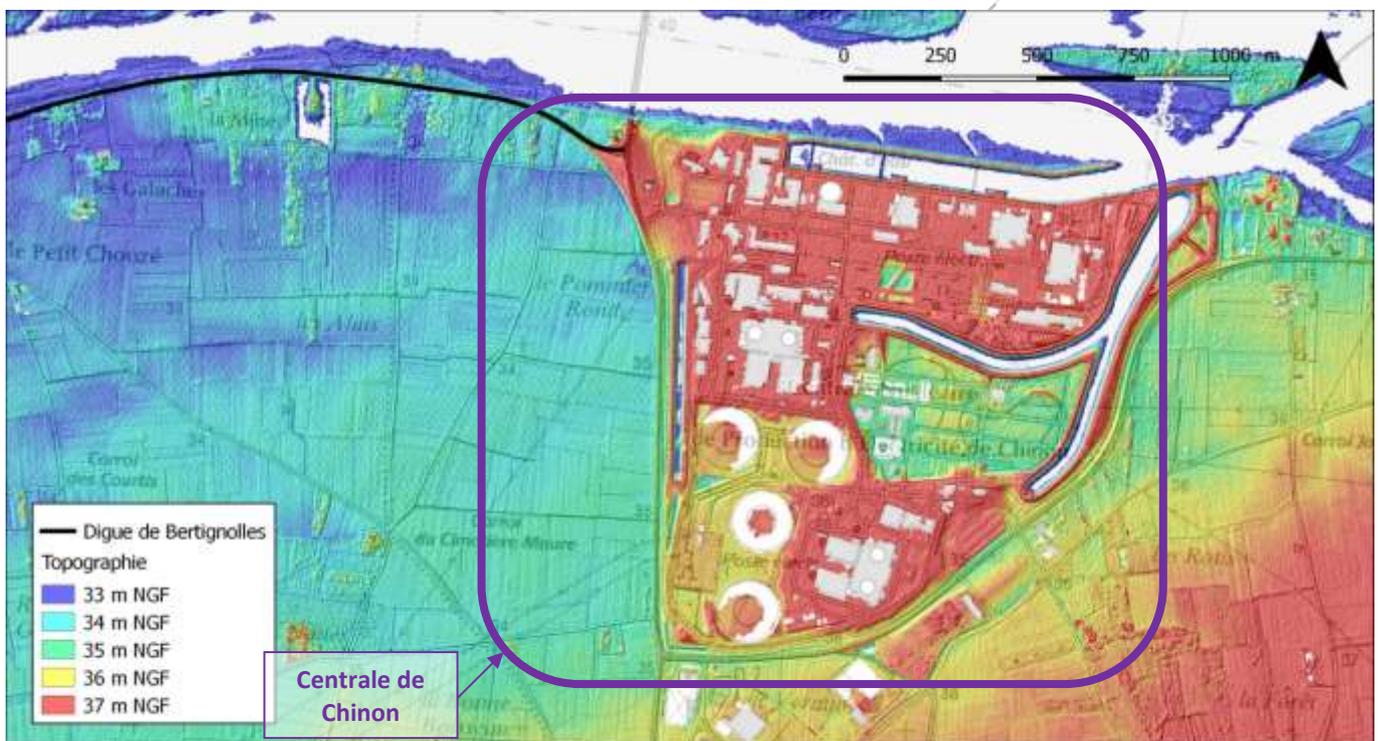


Figure 8\* : Remblai de la centrale nucléaire de Chinon en amont du secteur d'étude

Le raccordement amont de la digue de Bertignolles s'effectue sur le remblai de la RD 749 au niveau des terrains de la centrale nucléaire de Chinon. Ces terrains, en remblai par rapport au niveau du terrain naturel dans la zone protégée, offrent un appui à la digue de Bertignolles, fermant ainsi le val par l'amont.

Cet élément n'est pas considéré comme un ouvrage secondaire dans le sens où il ne constitue pas un second rempart de protection dans le cas où la ligne de défense principale viendrait à céder.

❖ **Définition du système d'endiguement et comparaison avec l'arrêté de classement de la digue**

Selon l'arrêté de classement du 11 décembre 2009, la digue de Bertignolles en rive gauche de la Loire qui constitue le système d'endiguement du val de Véron présente un linéaire de 4,2 km.

L'analyse fonctionnelle permet de redéfinir le système d'endiguement du val de Véron, dont les linéaires et coordonnées de début et de fin sont présentés dans le tableau ci-dessous :

	Limites de l'arrêté préfectoral	Limites proposées pour l'étude de dangers
<b>Coordonnées amont (L93)</b>	X <sub>Amont</sub> : 485 212,81 Y <sub>Amont</sub> : 6 685 353,60	X <sub>Aval</sub> : 485 209 Y <sub>Aval</sub> : 6 685 363
<b>Coordonnées aval (L93)</b>	X <sub>Aval</sub> : 481 352,52 Y <sub>Aval</sub> : 6 684 356,29	X <sub>Aval</sub> : 481 278 Y <sub>Aval</sub> : 6 684 305
<b>Longueur</b>	4 200 m	4 280 m

**Tableau 3 : Définition de la ligne de défense principale du val de Véron en rive gauche de la Loire**

Le détail des limites définies dans l'étude de dangers est disponible dans la note spécifique relative à la topographie, présentée en Annexe 4.

### 3.1.3. Description de l'objectif de protection du système d'endiguement étudié

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

On distingue les deux notions suivantes en matière de digue et de protection :

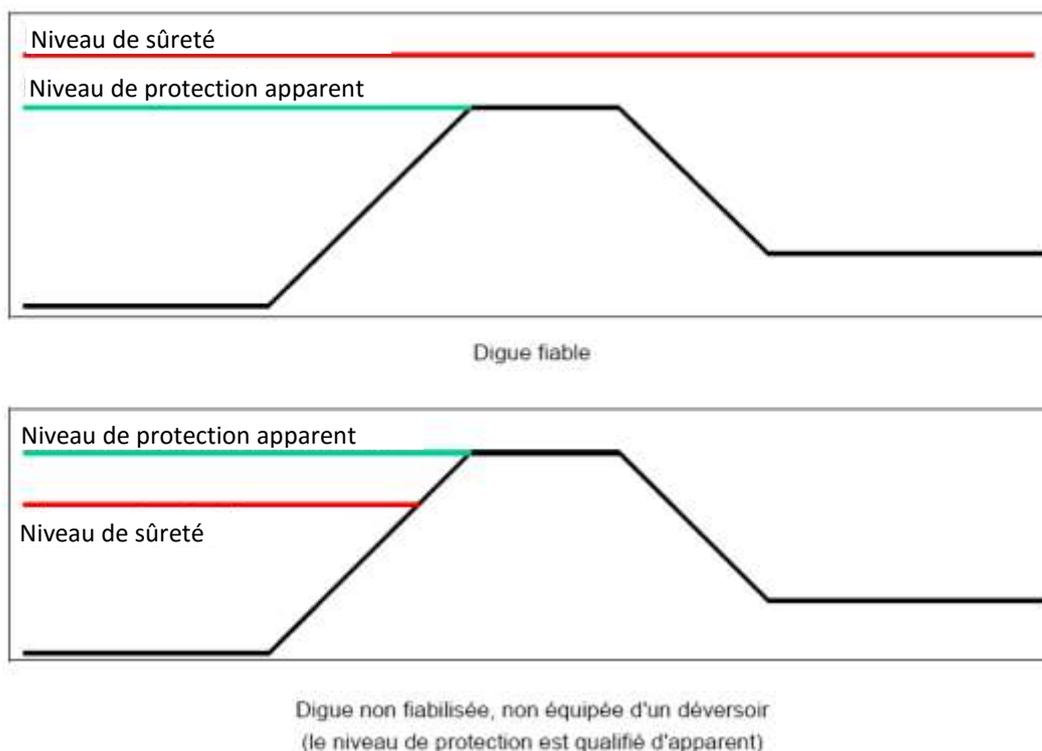
- **le niveau de sûreté**, qui se définit comme le niveau d'eau dans le cours d'eau au-dessus duquel la probabilité de rupture de l'ouvrage n'est plus considérée comme négligeable,
- **le niveau de protection apparent**, qui est le niveau d'eau dans le cours d'eau au-dessus duquel la zone protégée commence 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 tandis que la notion de protection apparente fait référence au phénomène de surverse.

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

Dans le cas de la levée de Bertignolles et plus généralement sur les ouvrages existants, le risque de rupture avant surverse ne pouvant être considéré comme négligeable, le niveau de sûreté est généralement inférieur au niveau de protection apparent. Pour ne pas entretenir l'illusion d'une protection efficace jusqu'au niveau de la crête de digue, le terme apparent est ainsi introduit en référence à la possibilité de rupture avant l'atteinte de la crête de digue.

Dans l'étude de dangers de la digue de Bertignolles, 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.



**Figure 9 : Schémas de présentation des notions de niveau de protection apparent et de niveau de sûreté (source : IRSTEA / DREAL Centre)**

### 3.1.3.2. Niveaux de protection apparent du système d'endiguement étudié

La comparaison entre les lignes d'eau calculées dans la Loire pour différentes occurrences de crue avec le profil en long de la crête de digue permet d'évaluer le niveau de protection apparent actuel de celle-ci.

Les lignes d'eau ont été déterminées via le modèle hydraulique bidimensionnel, réalisé initialement par EDF dans le cadre des études hydrauliques relatives à la centrale nucléaire de Chinon sous TELEMAC 2D. Ce modèle mis à disposition par EDF a été adapté pour les besoins de la présente étude de dangers. L'Annexe 5 présente les hypothèses relatives à l'utilisation de ce modèle (exploitation et analyse du modèle et des résultats).

Les crues étudiées dans le cadre de l'étude de dangers sont présentées dans le tableau ci-après. Elles correspondent aux scénarios issus de l'étude Loire Moyenne afin de conserver une palette de référence commune.

Scénarios étudiés		Débit de pointe (m <sup>3</sup> /s)	
-------------------	--	-------------------------------------	--

Conseil Départemental d'Indre-et-Loire (CD 37)  
 Étude de dangers de la digue de Bertignolles - Rapport A 85656 vA

	Période de retour	Loire à Langeais	Vienne à Chinon	Indre à Marnay	Cote maximale à Saumur (m NGF)
HYDRA Q <sub>2</sub>	2 ans	2 720	780	140	27,60
HYDRA Q <sub>5</sub>	5 ans	3 565	985	190	28,46
HYDRA Q <sub>10</sub>	10 ans	4 015	1 135	235	28,91
HYDRA Q <sub>20</sub>	20 ans	4 680	1 260	285	29,46

**Tableau 4 : Crues étudiées dans le cadre de l'étude de dangers de la digue de Bertignolles**

Les lignes d'eau pour les différents débits ainsi que les niveaux du pied et de la crête de digue sont représentés sur la figure en page suivante.

Dès la crue de période de retour 5 ans, les eaux de la Loire surversent localement et contournent la digue de Bertignolles à son extrémité aval, en aval immédiat du lieu-dit de Bertignolles.

Cette dynamique s'accroît jusqu'à la surverse quasi généralisée de la digue de Bertignolles pour une période de retour de 20 ans. Le val est alors quasiment totalement inondé.

**On considèrera donc que le niveau de protection apparent du système d'endiguement du val de Véron correspond au niveau d'eau lié à la crue de période de retour 5 ans.**

Conseil Départemental d'Indre-et-Loire (CD 37)  
Étude de dangers de la digue de Bertignolles - Rapport A 85656 vA

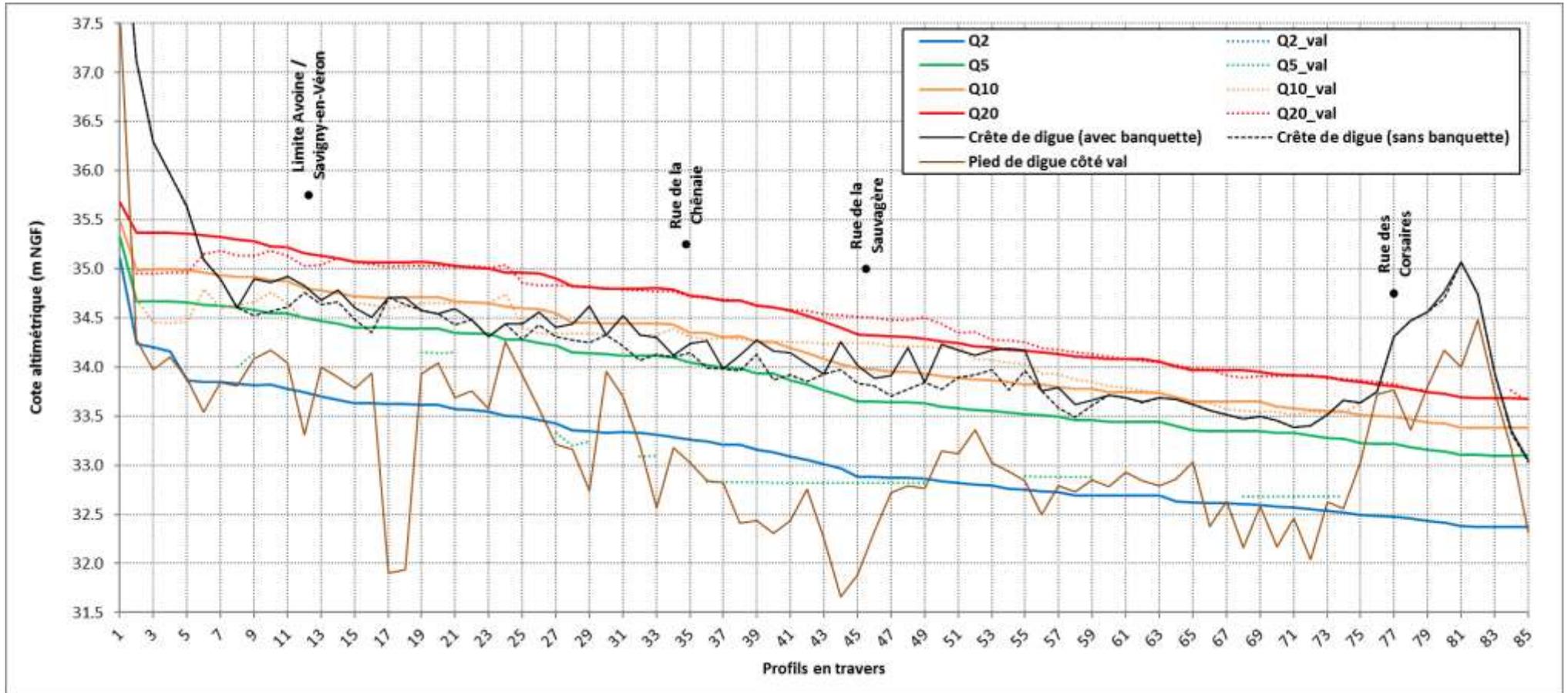


Figure 10\* : Sollicitations hydrauliques de la digue de Bertignolles

### 3.1.4. Principaux résultats de l'analyse fonctionnelle hydraulique

Le tableau ci-dessous présente les fonctions hydrauliques associées au système d'endiguement et à ses composants ainsi qu'à certains éléments de son environnement, influant sur le fonctionnement hydraulique du système.

Élément du système d'endiguement ou de son environnement	Fonction(s) hydraulique(s)	Description des phénomènes hydrauliques associés
Digue en remblai constituant la ligne de défense principale	Empêcher l'entrée d'eau dans la zone protégée jusqu'à la crête de digue	Jusqu'au niveau de la crête du système d'endiguement, correspondant à une période de retour de 5 ans
Ouvrages hydrauliques traversants	Permettre un écoulement d'eau ponctuel, d'un côté à l'autre d'un sous-système de digues linéaires	Fonction du fil d'eau de chaque ouvrage
Linéaire non endigué en aval de la digue de Bertignolles	Assurer la vidange du val en cas d'entrée d'eau dans la zone protégée	-

**Tableau 5 : Synthèse des fonctions hydrauliques associées au système d'endiguement du val de Véron et à son environnement**

### 3.1.5. Analyse fonctionnelle structurelle interne du système d'endiguement étudié

#### 3.1.5.1. Points caractéristiques

Afin de décrire la géométrie de la digue étudiée, celle-ci a été discrétisée en profils en travers espacés de 50 m, permettant jusqu'à l'identification de sept points caractéristiques présentés sur la figure ci-après.

Les points relevés sont les suivants :

- point 0 : crête de berge,
- point 1 : pied de digue côté cours d'eau,
- point 2 : crête de digue côté cours d'eau,
- point 3 : crête de banquettes,
- point 4 : crête de digue,
- point 5 : crête de digue côté val,
- point 6 : pied de digue côté val.

Ces points sont relevés sur la base du MNT LIDAR réalisé pour le compte de la DREAL Centre en 2003.

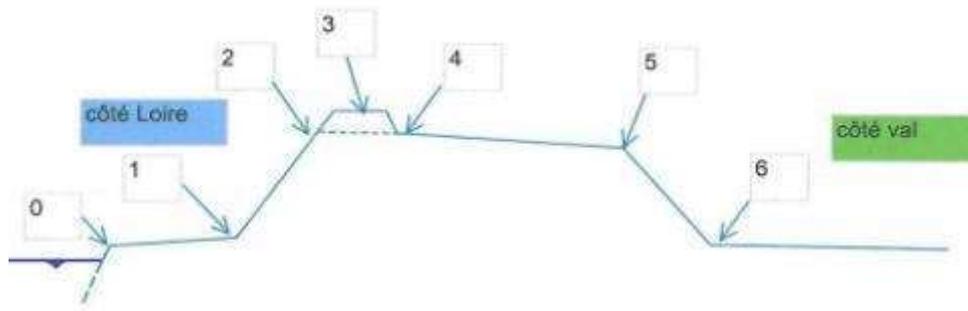


Figure 11 : Points caractéristiques d'une levée (source : DREAL Centre)

### 3.1.5.2. Historique

#### ❖ Construction de la digue de Bertignolles

Les premières traces de la digue de Bertignolles remontent à la construction du chemin de grande communication n° 17 (GC n° 17) dans les années 1869 à 1872. Le GC n° 17 a été construit à l'emplacement de l'ancien chemin de halage qui a été arasé en plusieurs points à la cote 4,50 m.

Le projet prévoyait que le GC n° 7 fasse 7 m de largeur en couronne et présente une hauteur maximale de 4,5 m au-dessus de l'étiage.

Il convient de noter que l'ensemble des hauteurs données font référence à l'échelle de Port-Boulet dont le zéro est situé à la cote 29,29 m Lallemand, soit 11 cm en-dessous de l'étiage de la Loire situé à 29,40 m. Au droit de la confluence de la Vienne et de la Loire, la cote de 29,29 m Lallemand correspond à 29,51 m NGF (IGN69), soit un écart de 22 cm.

Aucune information concernant la construction initiale du chemin de halage n'a été retrouvée dans les archives départementales.

#### ❖ Principales phases d'aménagement de la digue de Bertignolles

- Projet de rehaussement de la banquettes de 1927-1928

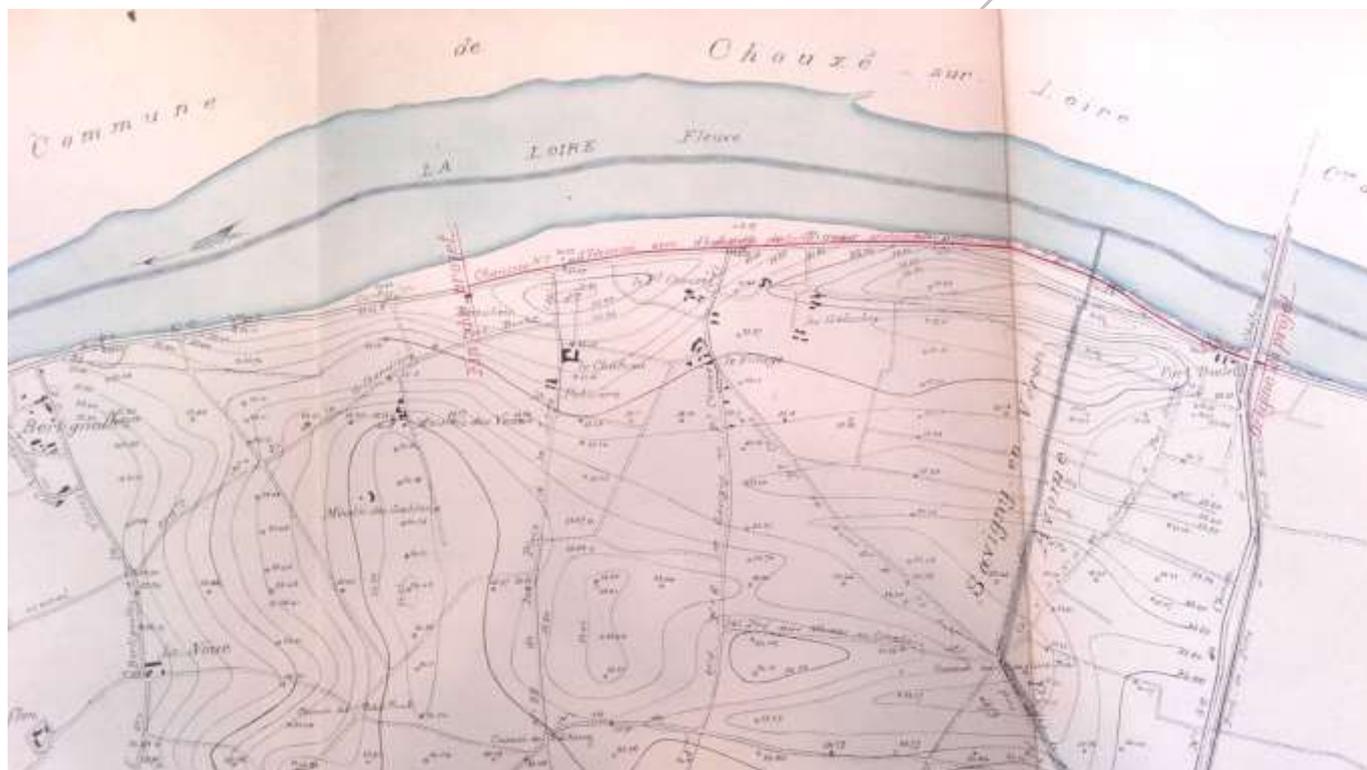
Un projet pour l'« établissement d'une banquettes de protection contre les eaux de la Loire entre le pont de Port-Boulet (point 20,982 km) et le village de Bertignolles (point 24,651 km) sur une longueur de 3669 m » voit le jour en 1927. Ce projet initial demande la réalisation d'une banquettes nivelée à 5,30 m au-dessus de l'étiage. Cette cote de 5,30 m émane alors du souhait des populations. En effet, lorsque la Loire atteint cette cote, le chemin de grande communication n° 38 (actuelle RD 749), fermant le val à l'amont perpendiculairement à la Loire, est submergé.

Cependant, cette requête est rejetée par les ingénieurs du service de la Loire. Le dossier est alors expertisé par une commission d'inspecteurs généraux des Ponts et Chaussées, chargés d'examiner sur place les répercussions que pourrait avoir ce projet sur l'écoulement des crues de la Loire.

La conclusion demeure intacte : « cette commission estima qu'en principe il convient de considérer comme dangereuse toute mesure ou toute disposition nouvelle même locale, de nature à encombrer le lit majeur ou mineur de la Loire, dont le résultat serait d'aggraver les conditions de l'écoulement des crues du fleuve. Le régime de la Loire est en effet des plus capricieux, et des responsabilités si considérables sont en jeu lorsque l'inondation menace que les intérêts particuliers doivent s'effacer devant l'intérêt général » (extrait du rapport de l'ingénieur adjoint du service vicinal, Chinon, le 13 juillet 1928).

Conformément aux conclusions de la commission, un nouveau projet approuvé voit le jour : « établissement d'une chaussée déversée avec banquette partielle pour protection contre les eaux de la Loire (4,90 m au-dessus de l'étiage) entre le pont de Port-Boulet (point 20,982 km) et le village de Beaulieu, sur une longueur de 2533 m ».

Le linéaire du projet est ainsi raccourci et la cote de banquette projetée est abaissée. Un plan général de localisation du projet est présenté sur la figure ci-dessous.



**Figure 12 : Plan général - Établissement d'une chaussée déversée avec banquette partielle - 1928**

Les profils en travers du projet sont présentés sur la figure ci-après.

La banquette en terre est prévue sur un linéaire de 1347 m depuis le pont de Port-Boulet en amont. La crête de banquette est arasée à 4,90 m au-dessus de l'étiage et sa largeur est de 25 cm environ. Sa hauteur peut atteindre 39 cm au maximum. En aval de ce linéaire, l'arête extérieure de l'accotement déversé atteint la cote de 4,90 m sans banquette sur un linéaire de 1186 m. Des bornes en pierre sont placés tous les 100 m de façon à assurer le suivi de l'évolution de la crête de digue.

Le profil en long de la crête de digue suit la pente du fleuve et atteint la cote 4,90 m au-dessus de l'étiage au droit du pont de Port-Boulet.

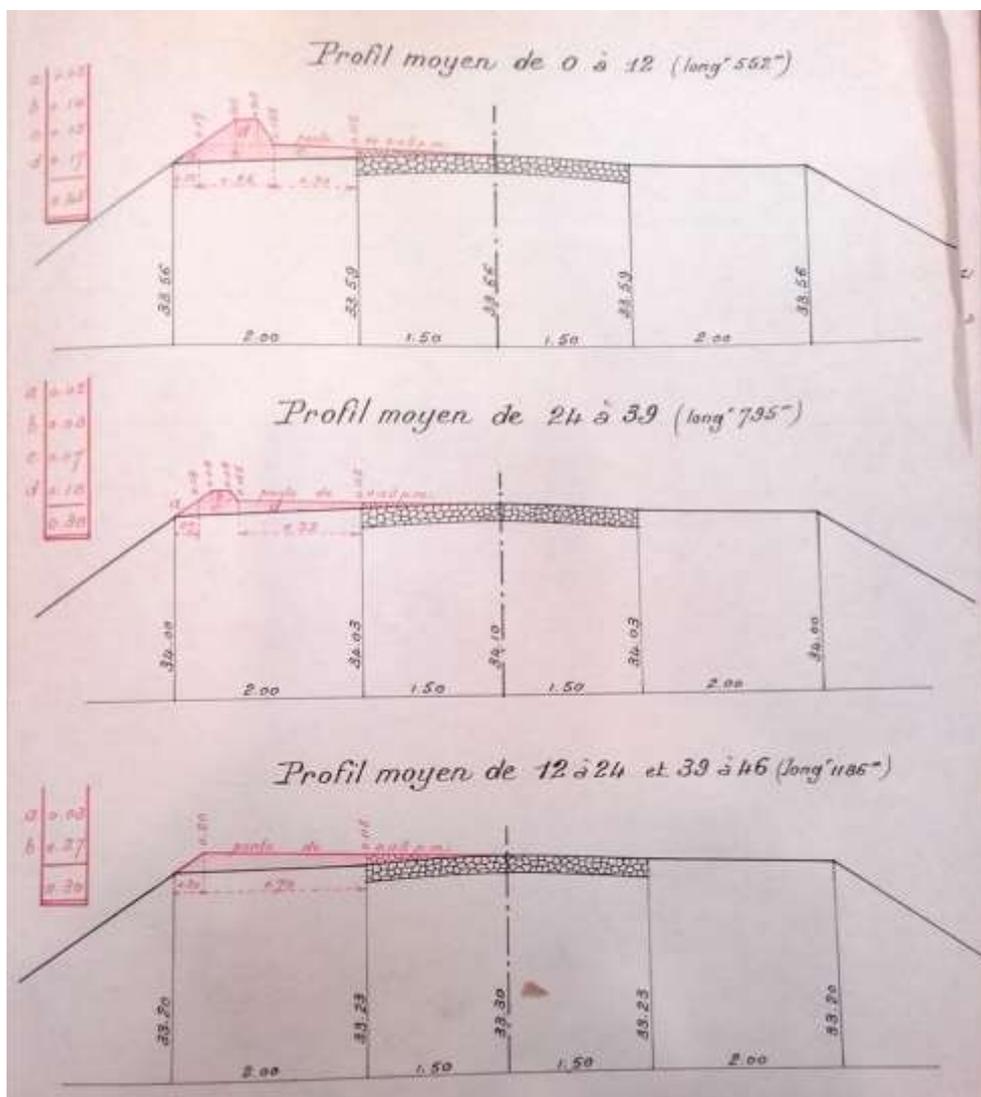


Figure 13 : Profils en travers type - Établissement d'une chaussée déversée avec banquette partielle - 1928

En 1933, M le maire de Savigny-en-Véron réitère la demande d'exhaussement de la digue à la cote 5,20 m au-dessus de l'étiage pour réduire les inondations dans son val. Cependant, cette requête est rejetée conformément à la décision ministérielle en date du 7 juillet 1927 et l'avis rendu par la commission d'inspecteurs généraux des Ponts et Chaussées en charge de l'examen du dossier en 1928. La réponse faite à M le maire fait état de l'avis de l'Ingénieur Ordinaire qui précise « cette section de la Loire a été volontairement arasée à un niveau inférieur aux plus hautes eaux, afin de réserver à celles-ci une zone d'expansion, en évitant à la levée Nord qui protège le très riche et très peuplé val de l'Authion, toute surcharge dangereuse. » Le rehaussement de la digue à la cote 4,90 m constitue ainsi une valeur maximale qu'il ne conviendra pas de dépasser dans le présent et dans l'avenir.

Dans le cadre de ce projet, une étude statistique sur les crues de 1843 à 1927 a été menée. Celle-ci montre notamment le nombre de fois où le niveau de la Loire a dépassé les cotes de 4,5 et 4,9 m au-dessus de l'étiage au pont de Port-Boulet et ainsi, le bénéfice apporté par le projet de rehaussement à 4,9 m. Le tableau ci-après montre les résultats obtenus.

Période considérée	1843 - 1927	1897 - 1927	1907 – 1927
Nombre d'années considérées	85 ans	30 ans	20 ans
Nombre de fois où la cote 4,5 m a été dépassée	33 fois	19 fois	13 fois
Nombre de fois où la cote 4,9 m a été dépassée	14 fois	10 fois	8 fois
Différence	19 fois	9 fois	5 fois

**Tableau 6 : Statistiques sur les dépassements de cote à l'échelle du pont de Port-Boulet  
 (source : Archives de Tours – S5288)**

Selon cette analyse, « la protection du val du Véron par un exhaussement du GC n° 17 jusqu'à 4,9 m aurait donc réduit la fréquence de sa submersion dans les proportions de 19/33 (57,5%), 9/19 (47,3%) et 5/13 (38,5%) suivant la période considérée. On peut penser par conséquent que, dans l'avenir, 40 à 45 % des submersions pourraient être, de la sorte, évitées, sans oublier toutefois que le régime des crues de la Loire semble, avec le temps, évoluer vers une élévation du niveau des crues ».

- Travaux de confortement du pied de digue de 1938

En 1938, il est fait état de dégradations du pied de digue ayant donné naissance à des excavations importantes sous le talus de la levée sur un linéaire de 400 m au droit de Bertignolles. Les enrochements du pied de digue qui sont sollicités uniquement en temps de crue ont été emportés par les courants entraînant une dégradation du perré sur une hauteur variant de 50 cm à 2 m, de nature à compromettre son rôle de protection et la solidité de la levée.

Des travaux de consolidation sont ainsi réalisés selon les principes suivants illustrés sur la figure ci-après :

- les excavations sont comblées par des matériaux d'apport de type sableux,
- les parties endommagées du perré sont reprises et ce dernier est prolongé en pied sur une longueur de 50 cm de façon à encreur le talus et assurer ainsi la stabilité à la base pour éviter les glissements de talus,
- des enrochements sont mis en place sur la partie inférieure de ce dernier de façon à assurer une butée.

Les travaux ont ainsi été commandés en urgence pour une réalisation durant la période des basses eaux de l'été 1938, comme en attestent les différents devis et propositions retrouvés aux archives.

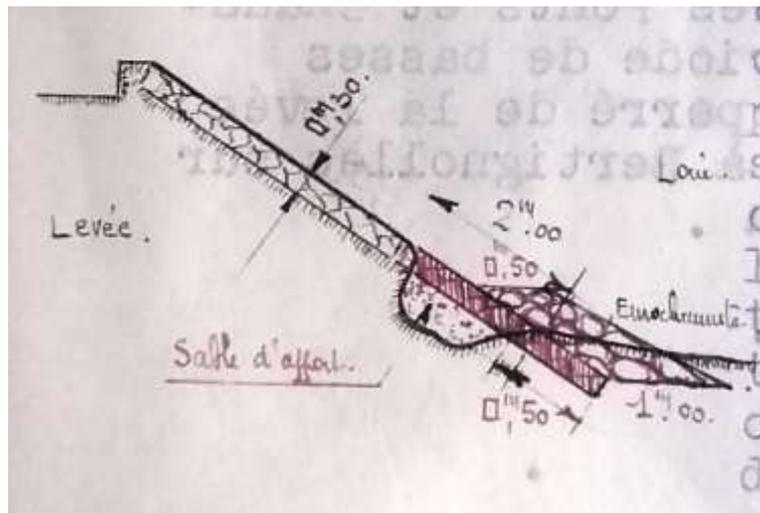


Figure 14 : Principe de confortement du pied de digue au droit de Bertignolles - 1938

- Projet de rehaussement de la banquette de 1979-1980

Vers la fin des années 1970, il est fait état d'un affaissement général de la banquette, notamment en terre, en-dessous de sa cote de protection initiale. Cet affaissement général a probablement été occasionné par les crues et le passage des engins nécessaires à l'entretien de la végétation. Ainsi, un projet de réfection de la banquette est lancé en 1979-1980 : « constitution d'une banquette entre le CD749 et le CD118 ». La figure suivante présente le plan général de localisation des travaux envisagés.

Conseil Départemental d'Indre-et-Loire (CD 37)  
 Étude de dangers de la digue de Bertignolles - Rapport A 85656 vA

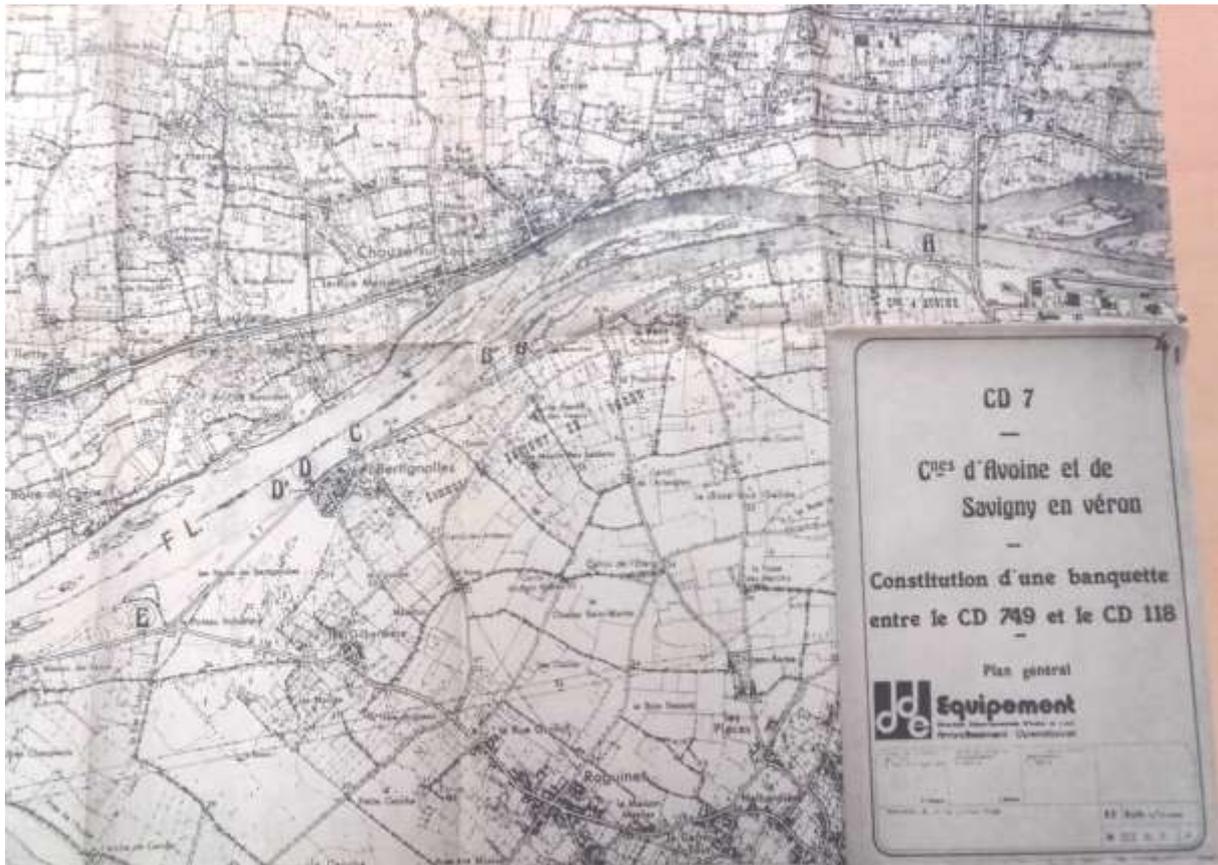


Figure 15 : Plan général – Constitution d’une banquette entre le CD 749 et le CD 118 - 1979

Les profils type de réfection de la banquette en terre et des parties en murette sont présentés sur les figures ci-après, ainsi que le détail des bouchures selon le projet de 1979-1980.

La banquette en terre présente ainsi une largeur en tête de 1 m, des pentes à 3H/2V. La banquette de type muret présente un profil en T inversé avec une largeur en tête de 12 cm.

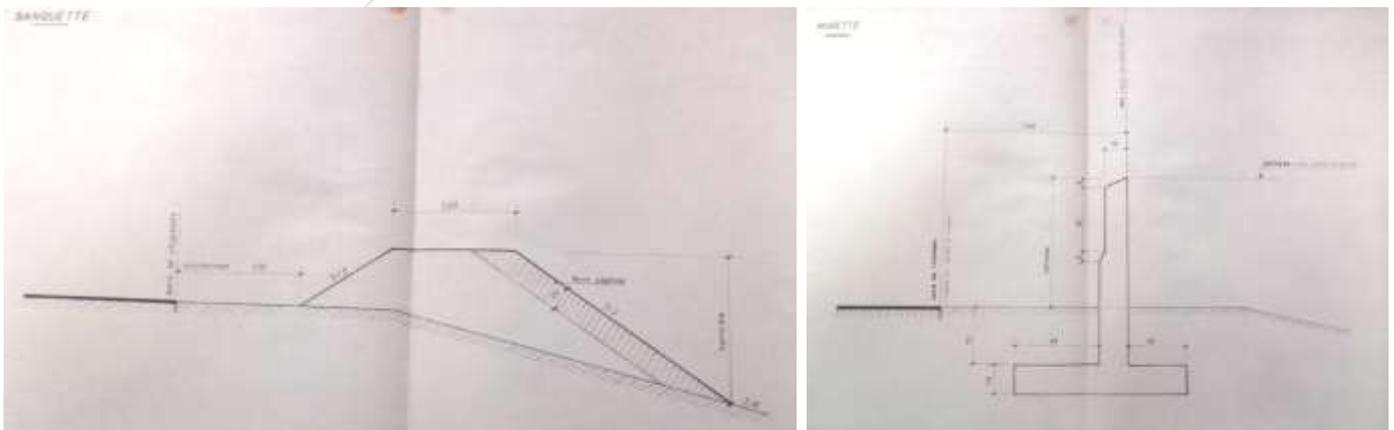


Figure 16 : Profils en travers type – Constitution d’une banquette entre le CD 749 et le CD 118 – 1979 – à gauche, banquette en terre et à droite, murette

Conseil Départemental d'Indre-et-Loire (CD 37)  
 Étude de dangers de la digue de Bertignolles - Rapport A 85656 vA

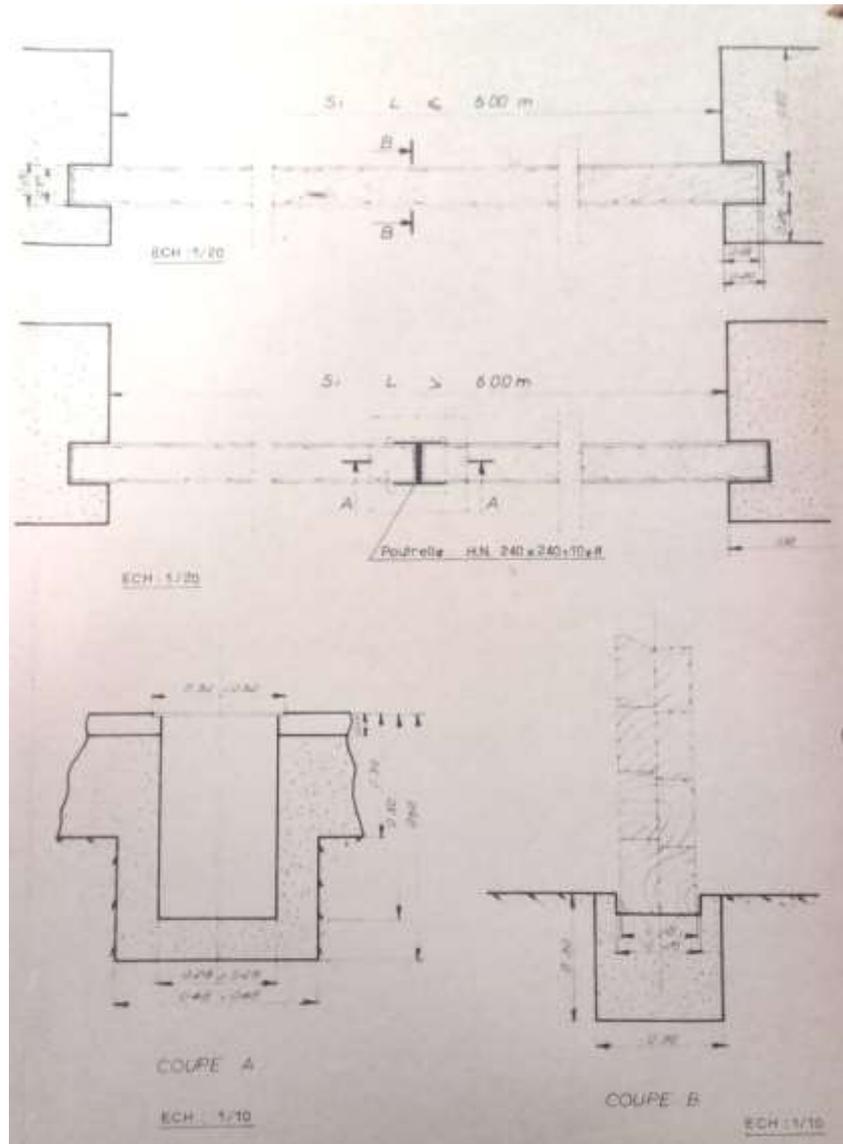


Figure 17 : Détail des bouchures – Constitution d'une banquette entre le CD 749 et le CD 118 – 1979

La figure suivante présente les lignes d'eau de période de retour 5 ans et 10 ans par rapport à l'axe du CD n° 7. Il n'est pas précisé s'il s'agit de la crête de digue avec ou sans la banquette projetée.



Conseil Départemental d'Indre-et-Loire (CD 37)  
Étude de dangers de la digue de Bertignolles - Rapport A 85656 vA



**Figure 20 : Travaux d'élargissement de la digue au PR 45 200  
(source : Travaux sur la digue de Bertignolles – Années 2013 à 2015)**

D'autres linéaires de banquettes ont également fait l'objet de travaux de réparation du muret existant et de réfection des escaliers.



**Figure 21 : Réparations du muret (source : Travaux sur la digue de Bertignolles – Années 2013 à 2015)**

Les seuils des bouchures ont également été refaits. Les nouveaux seuils réalisés sont en béton et les feuillures renouvelées pour accueillir le système de batardeau en bois imputrescible.



**Figure 22 : Réfection de seuil de bouchure (source : Travaux sur la digue de Bertignolles – Années 2013 à 2015)**

La digue est également sujette aux terriers de blaireaux et aux dégâts occasionnés par ceux-ci :

- terrier de blaireau ayant engendré une déformation de la chaussée en crête de digue :
  - suppression des galeries à la pelle-mécanique,
  - reconstitution du talus avec pose de grillage anti-fouisseur,
  - terrassement de la chaussée sur 1,5 m de profondeur et remplissage au béton au droit de la déformation en crête,
  - reconstitution du corps de chaussée en crête.
- mise en place de grillage anti-fouisseur sur 4 linéaires atteints ayant cependant déplacé le problème sur d'autres secteurs de digue.



**Figure 23 : Remplissage au béton et reconstitution du corps de chaussée (source : Travaux sur la digue de Bertignolles – Années 2013 à 2015)**

Conseil Départemental d'Indre-et-Loire (CD 37)  
Étude de dangers de la digue de Bertignolles - Rapport A 85656 vA



**Figure 24 : Pose de grillage anti-fouisseur (source : Travaux sur la digue de Bertignolles – Années 2013 à 2015)**

Les arbres présents sur la digue ont fait l'objet de travaux d'élagage sur un linéaire de 3 km.

Les portes de vidange des trois ouvrages traversants ont été remplacées par des clapets automatiques. Une des trois buses a également été rallongée côté val. Les trois ouvrages sont désormais signalés en crête de digue par un marquage au sol.

Conseil Départemental d'Indre-et-Loire (CD 37)  
Étude de dangers de la digue de Bertignolles - Rapport A 85656 vA



Figure 25 : Remplacement des portes de vidange par des clapets automatique : à gauche, côté Loire et à droite, côté val (source : Travaux sur la digue de Bertignolles – Années 2013 à 2015)

Enfin, la rénovation de la cale et la reprise du perré au droit de Bertignolles a également été effectuée en 2016.



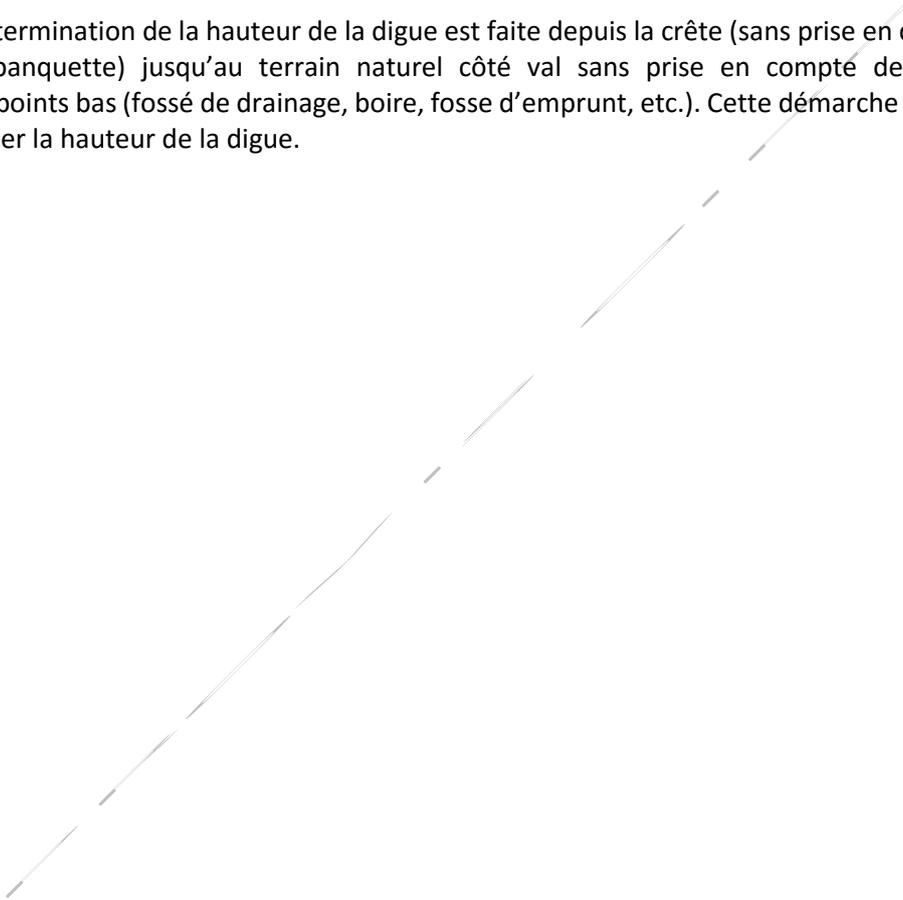
Figure 26 : Rénovation de la cale et du perré à Bertignolles (source : Antea Group)

### 3.1.5.3. Profil en long

**Nota** : Ce paragraphe présente des éléments sur les caractéristiques géométriques de la digue de Bertignolles. Il convient de rappeler que les points caractéristiques de la digue ont été identifiés selon la méthode présentée au paragraphe 3.1.5.1. Le franc-bord est notamment défini par la distance entre le point 1, traduisant le pied de digue côté cours d'eau et le point 0, représentant le haut de berge du lit mineur.

L'extraction des profils en travers sur la base du MNT a permis de caractériser la géométrie de la digue sur l'ensemble de son linéaire. Les principales caractéristiques de la digue sont illustrées sur le profil en long de la figure en page suivante.

**Nota** : La détermination de la hauteur de la digue est faite depuis la crête (sans prise en compte d'une éventuelle banquette) jusqu'au terrain naturel côté val sans prise en compte de la présence d'éventuels points bas (fossé de drainage, boire, fosse d'emprunt, etc.). Cette démarche permet de ne pas surestimer la hauteur de la digue.



Conseil Départemental d'Indre-et-Loire (CD 37)  
 Étude de dangers de la digue de Bertignolles - Rapport A 85656 vA

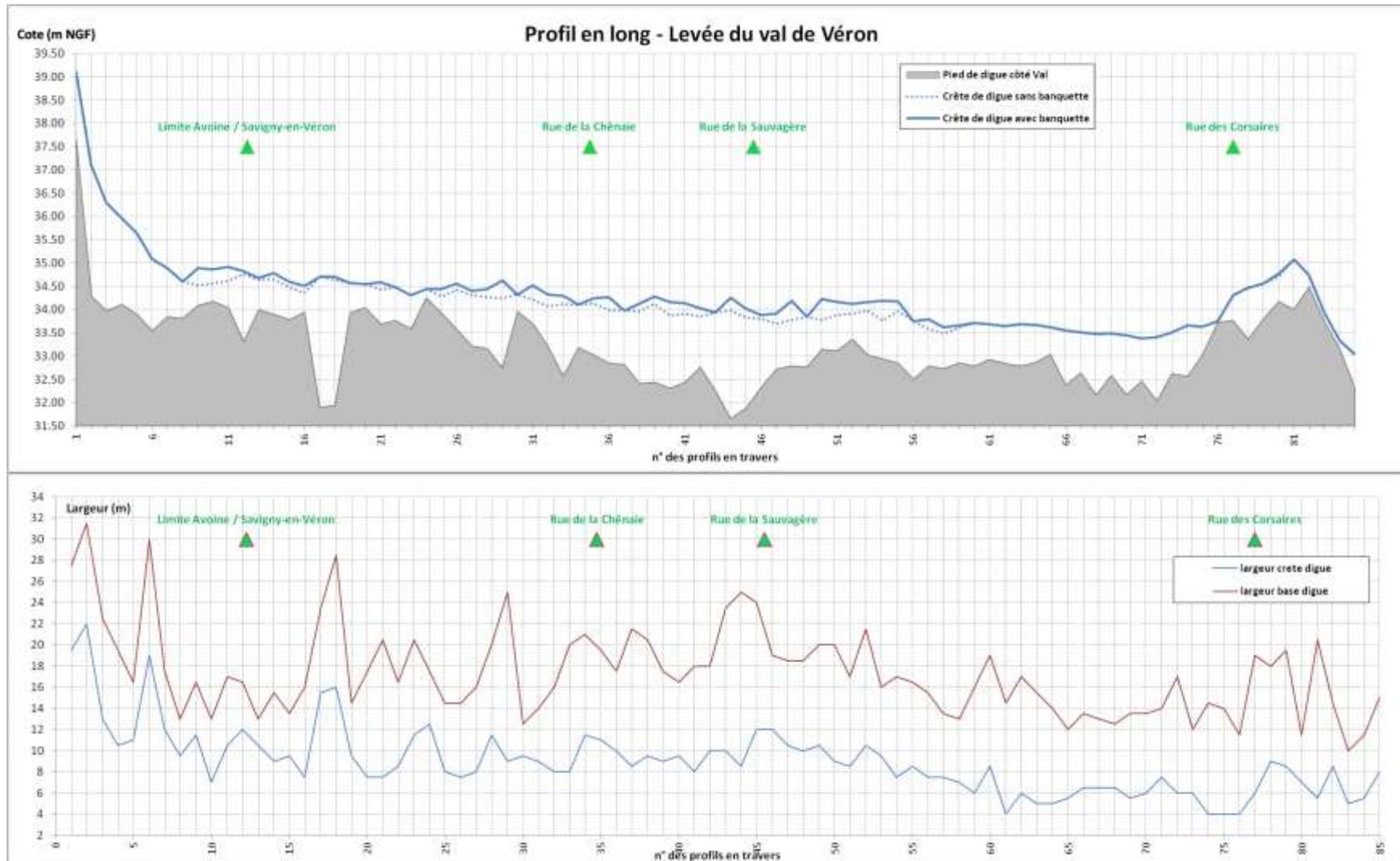


Figure 27 : Profil en long caractéristique de la ligne de défense principale du val du Véron



### 3.1.5.5. Profils en travers types géotechniques

Sur la base des analyses géométrique, historique et géotechnique menées précédemment, la digue de Bertignolles a pu être discrétisée selon 2 profils en travers type :

- levée en section courante (n'ayant pas fait l'objet de travaux de renforcement),
- levée renforcée par un perré côté cours d'eau.

Le linéaire d'application de chacun de ces 2 profils en travers type est celui précisé sur la figure précédente. Seul un linéaire restreint correspondant aux abords de la cale de Bertignolles présente un renforcement du talus côté Loire.

Ces profils en travers sont décomposés en différents composants auxquels peuvent être associées une ou plusieurs fonctions structurelles, parmi les suivantes :

Fonction structurelle	Descriptif de la fonction
Stabilité mécanique d'ensemble	Conditionne la stabilité mécanique du tronçon
Imperméabilité	Limite les écoulements vers les autres composants
Drainage	Capte les écoulements internes au tronçon et les évacue
Filtration	Empêche la migration des particules à l'interface des composants granulaires
Auto-filtration	Empêche la migration des particules, au sein d'un composant granulaire
Protection	Évite les agressions externes intrusives (animaux fouisseurs, racines, etc.) ou liées à l'eau ou à d'autres agents

**Tableau 7 : Familles de fonctions des composants structurels (source : Irstea)**

#### **Levée en section courante type (n'ayant pas fait l'objet de travaux de renforcement)**

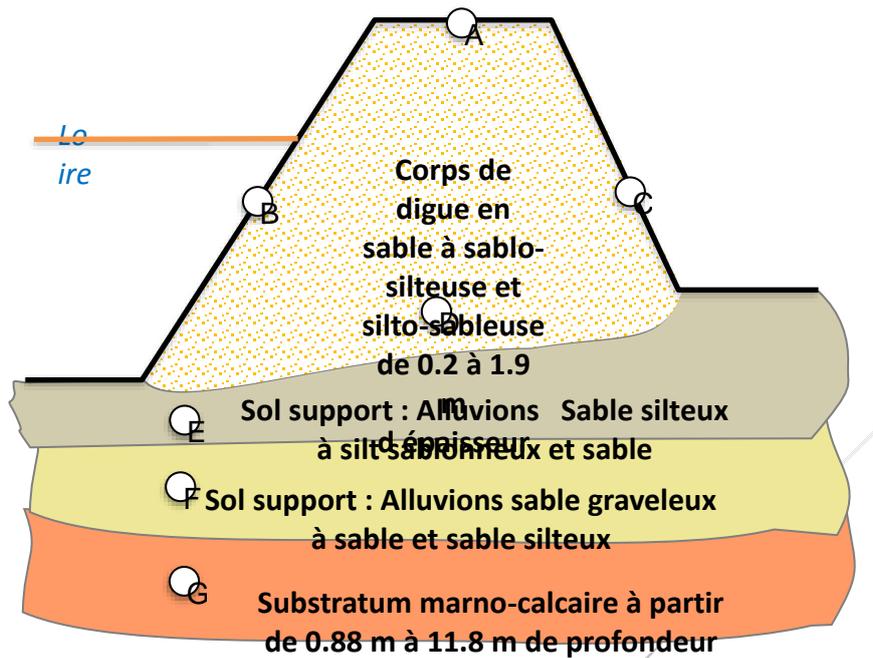


Figure 29 : Profil en travers type de la levée courante de Bertignolles

Chaque composant géotechnique du profil en travers type peut être caractérisé par sa (ses) fonction(s) structurelle(s).

N° comp.	Composant géotechnique	Fonction(s) structurelle(s)	Contact
A	Crête enherbée ou goudronnée	• Protection	Atmosphère, b, C, D
B	Talus enherbé côté cours d'eau	• Protection	Cours d'eau, atmosphère, A, D, E
C	Talus enherbé côté zone protégée	• Protection	Zone protégée, Atmosphère, A, D, E
D	Corps de la digue en remblai	• Stabilité mécanique d'ensemble • Auto-filtration • Imperméabilité (fonction partielle)	A, B, C, E
E	Alluvions	• Stabilité mécanique de l'ensemble • Auto-filtration	D, F, cours d'eau
F	Alluvions	• Stabilité mécanique de l'ensemble • Auto-filtration	E, G
G	Substratum	• Stabilité mécanique de l'ensemble	F

Tableau 8 : Fonctions structurelles de chaque élément constitutif du profil en travers courant

### Levée renforcée par un perré côté cours d'eau

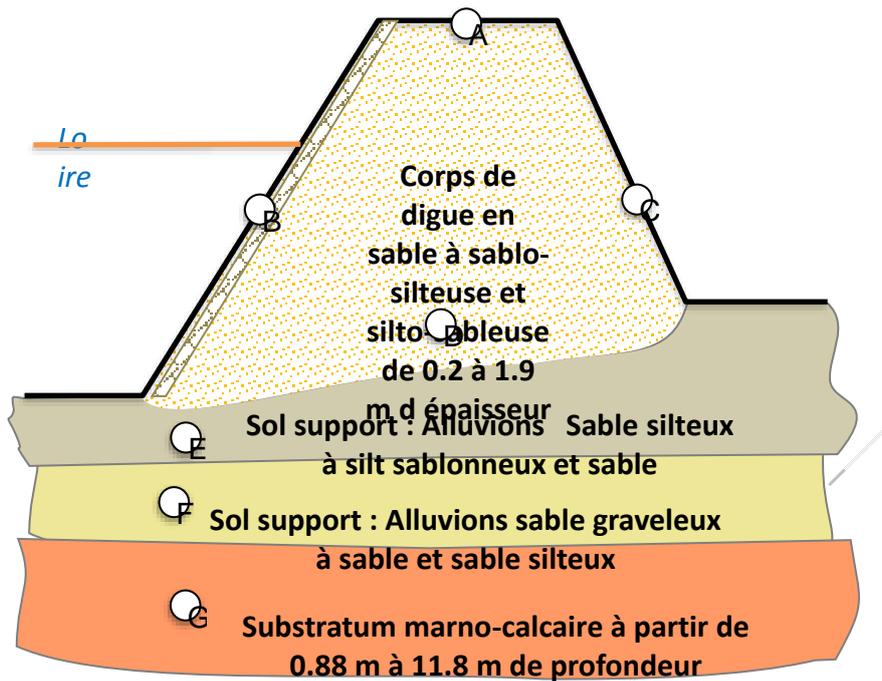


Figure 30 : Profil en travers type de la levée de Bertignolles renforcée par un perré côté cours d'eau

On retrouve cette coupe uniquement aux abords de la cale de Bertignolles sur un linéaire d'une centaine de mètres.

N° comp.	Composant géotechnique	Fonction(s) structurelle(s)	Contact
A	Crête enherbée ou goudronnée	• Protection	Atmosphère, b, C, D
B	Talus avec perré en enrochement	• Protection	Cours d'eau, atmosphère, A, D, E
C	Talus enherbé côté zone protégée	• Protection	Zone protégée, Atmosphère, A, D, E
D	Corps de la digue en remblai	• Stabilité mécanique d'ensemble • Auto-filtration • Imperméabilité (fonction partielle)	A, B, C, E
E	Alluvions	• Stabilité mécanique de l'ensemble • Auto-filtration	D, F, cours d'eau
F	Alluvions	• Stabilité mécanique de l'ensemble • Auto-filtration	E, G
G	Substratum	• Stabilité mécanique de l'ensemble	F

**Tableau 9 : Fonctions structurelles de chaque élément constitutif du profil en travers avec perré côté cours d'eau**

### 3.1.6. Désordres, anomalies et singularités constatées

Ce paragraphe s'appuie largement sur les résultats de la Visite Technique Approfondie réalisée sur la digue de Bertignolles en novembre 2016 par Antea Group dans le cadre de la présente étude de dangers. Ce rapport de VTA est fourni en Annexe 12.

#### 3.1.6.1. Escaliers et rampes d'accès

L'accès à la berge de la Loire se fait par le biais d'escaliers ou de rampes d'accès. La digue de Bertignolles compte à ce jour 5 escaliers connus et 6 rampes d'accès (dont la cale située au niveau du lieu-dit de Bertignolles).

Il est à noter que la présence de rampe d'accès engendre souvent un abaissement local de la banquette et/ou de la crête de digue côté Loire. De manière générale, compte tenu de la faible hauteur de la banquette côté Loire, la continuité de la protection offerte par la levée ne semble pas mise en péril par ces interruptions de banquette.

L'ensemble des escaliers sont empierrés et inclus le long du talus. Ils génèrent des interruptions dans le muret existant.

#### 3.1.6.2. Bouchures

Les bouchures font l'objet d'une note spécifique intitulée ouvrages inclus (note Antea Group – AHI – n°2016/27, consultable en Annexe 7).

L'ensemble des bouchures recensées dans la digue de Bertignolles sont présentées dans le tableau suivant. Elles sont caractérisées par :

- le profil en travers auquel elles sont associées,

Conseil Départemental d'Indre-et-Loire (CD 37)  
 Étude de dangers de la digue de Bertignolles - Rapport A 85656 vA

- leur position verticale sur la digue (cotes relevées par GPS par les services du CD37 en septembre 2016),
- son gestionnaire (lorsque qu'il est connu),
- une brève description de l'ouvrage.

Au total, les bouchures recensées sont au nombre de 6 sur la levée de Bertignolles.

n°	PT associé	Fil d'eau seuil	Gestionnaire	Description
BOU1	16	34,26 m NGF	CD37	Bouchure
BOU2	28	34,00 m NGF	CD37	Bouchure
BOU3	35	33,83 m NGF	CD37	Bouchure
BOU4	44	33,63 m NGF	CD37	Bouchure
BOU5	51	32,52 m NGF	CD37	Bouchure
BOU6	60	33,46 m NGF	CD37	Bouchure

Tableau 10 : Recensement des bouchures sur la levée de Bertignolles

L'ensemble des bouchures sont repérées sur la figure suivante.



Figure 31\* : Localisation des bouchures sur la levée de Bertignolles

### 3.1.6.3. Réseaux présents dans la levée et ouvrages traversants

Les ouvrages traversants font l'objet d'une note spécifique intitulée ouvrages inclus (note Antea Group – AHI – n°2016/27, consultable en Annexe 7).

Les ouvrages traversants telles que les canalisations créent des singularités au sein de la digue. Ils constituent des points de faiblesse notamment vis-à-vis du phénomène d'érosion interne, en particulier du fait de la différence de nature et de mise en œuvre des matériaux au voisinage de la canalisation. Sans minimiser son incidence, un ouvrage débouchant sur le talus (et ne le traversant pas complètement) présente une gravité moindre que les ouvrages traversants.

L'évaluation des risques de rupture développée au chapitre 8 de l'étude de dangers prend en compte l'existence des ouvrages traversant la digue et nécessite donc le recensement et l'analyse de ces derniers.

L'ensemble des ouvrages traversants recensés dans le système d'endiguement de Bertignolles sont présentés dans le tableau suivant. Ils sont caractérisés par :

- le profil en travers auquel ils sont associés,
- leur position verticale sur la digue (cotes relevées par GPS par les services du CD37 en septembre 2016),
- leur caractère traversant ou débouchant,
- son gestionnaire (lorsqu'il est connu),
- une brève description de l'ouvrage.

Au total, les ouvrages traversants/débouchants recensés sont au nombre de 12 sur la levée de Bertignolles.

n°	PT associé	Fil d'eau ou positionnement vertical	Caractère traversant ou débouchant	Gestionnaire	Description
OH1	25	CANH <sup>4</sup>	Débouchant	-	Evacuation EP de la route en crête
OH2	30	33,13 m NGF	Traversant	CD 37	Ouvrage traversant avec clapet
OH3	30	CANH	Débouchant	-	Evacuation EP de la route en crête
OH4	40	CANH	Débouchant	-	Evacuation EP de la route en crête
OH5	45	32,98 m NGF	Traversant	CD 37	Ouvrage traversant avec clapet
OH6	73	31,28 m NGF	Traversant	CD 37	Ouvrage traversant avec clapet
OH7	79	CANH	Débouchant	-	Evacuation EP sous muret
OH8	81	CANH	Débouchant	-	Evacuation EP sous muret
OH9	82	CANH	Débouchant	-	Evacuation EP sous muret

<sup>4</sup> CANH : canalisation située en partie haute du talus

Conseil Départemental d'Indre-et-Loire (CD 37)  
 Étude de dangers de la digue de Bertignolles - Rapport A 85656 vA

n°	PT associé	Fil d'eau ou positionnement vertical	Caractère traversant ou débouchant	Gestionnaire	Description
OH10	82	CANH	Débouchant	-	Evacuation EP sous muret
OH11	83	CANH	Débouchant	-	Evacuation EP sous muret
OH12	85	CANB <sup>5</sup>	Traversant	-	Evacuation EP en bas de talus

Tableau 11 : Recensement des ouvrages traversants/débouchants sur la levée de Bertignolles

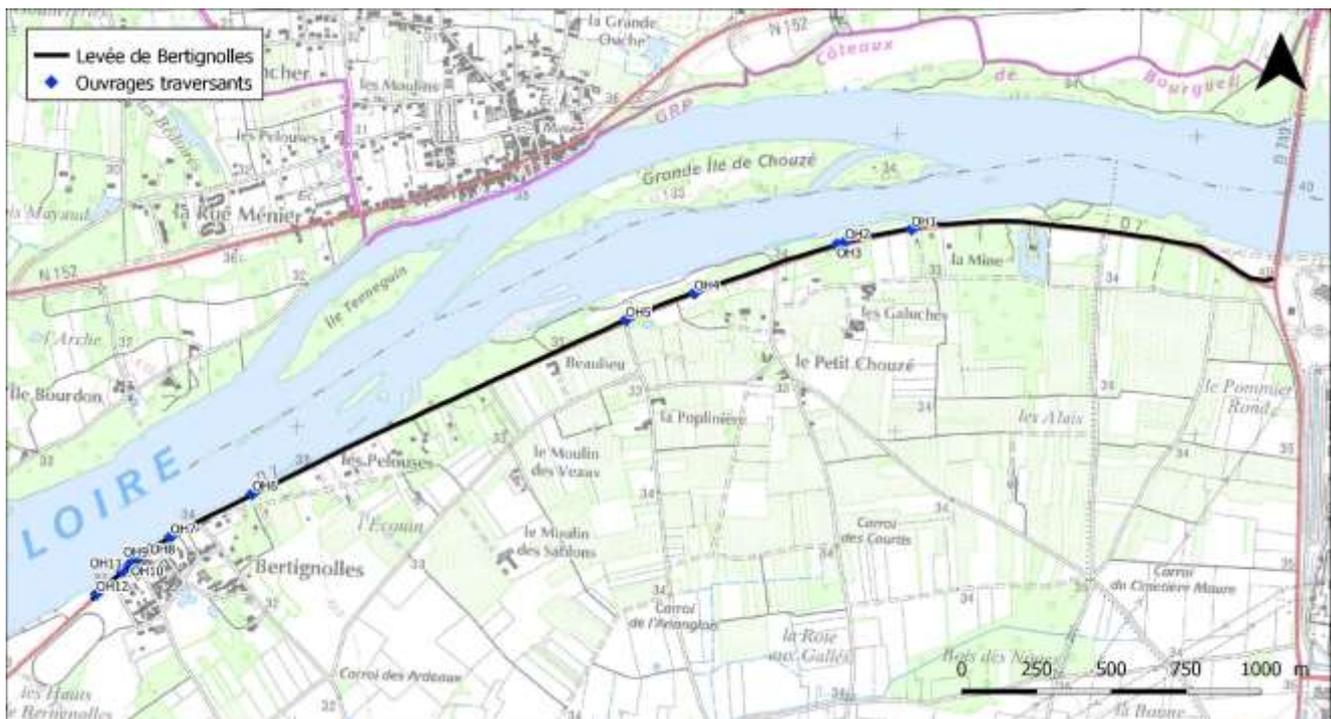


Figure 32\* : Localisation des ouvrages traversants sur la levée de Bertignolles

La levée de Bertignolles présente également différents réseaux secs et humides implantés essentiellement en crête de digue. Ces derniers sont recensés dans le tableau suivant, selon les données disponibles. Ils sont caractérisés par :

- les profils en travers auxquels ils sont associés,
- le type de réseau,
- son gestionnaire (lorsque qu'il est connu),
- sa position par rapport à la digue.

Sauf indication contraire, les réseaux sont parallèles à l'axe de la levée.

<sup>5</sup> CANB : canalisation située en partie basse du talus

Conseil Départemental d'Indre-et-Loire (CD 37)  
Étude de dangers de la digue de Bertignolles - Rapport A 85656 vA

PT associés	Type de réseau	Gestionnaire	Position
17 à 27	AEP <sup>6</sup>	Communauté de communes du Véron	Crête de digue
59 à 64	AEP		Crête de digue
76 à 84	AEP		Crête de digue
76 à 77	Assainissement		Crête de digue
40 à 85	Télécom	-	Aérien

**Tableau 12 : Recensement des réseaux présents sur la levée de Bertignolles**

#### 3.1.6.4. Ouvrages encastrés

Les ouvrages encastrés font l'objet d'une note spécifique intitulée ouvrages inclus (note Antea Group – AHI – n°2016/27, consultable en Annexe 7).

Les bâtiments inclus ou encastrés dans le corps de la digue constituent un facteur aggravant vis-à-vis de la stabilité de la digue. Ils réduisent ponctuellement la section de celle-ci, augmentant ainsi le gradient hydraulique s'y appliquant.

L'évaluation des risques de rupture telle que présentée au chapitre 8 de l'étude de dangers prend en compte la présence de bâtiments encastrés dans la digue et nécessite donc le recensement et l'analyse de ces derniers.

L'ensemble des ouvrages encastrés recensés sont présentés dans le tableau suivant. Ils sont caractérisés par :

- le(s) profil(s) en travers au(x)quel(s) ils sont associés,
- une brève description de l'ouvrage,
- leur position sur la digue.

Au total, 6 bâtiments encastrés sont recensés pour la levée de Bertignolles, dont 3 linéaires.

n°	PT associés	Description	Position
BE1	51	Suspicion fosse septique enterrée	Hors de la digue
BE2	59	Arrêt de bus	Côté val / Talus
BE3	72	Cabanon	Hors de la digue
BE4	76 - 77	Linéaire de maisons	Côté val / Pied de digue
BE5	77 - 78	Mur de soutènement	Côté val / Talus
BE6	79 - 82	Linéaire de maisons	Côté val / Talus

**Tableau 13 : Recensement des bâtiments encastrés dans la levée de Bertignolles**

L'ensemble des bâtiments encastrés sont repérés sur la figure suivante.

<sup>6</sup> AEP : Adduction d'Eau Potable

Conseil Départemental d'Indre-et-Loire (CD 37)  
Étude de dangers de la digue de Bertignolles - Rapport A 85656 vA

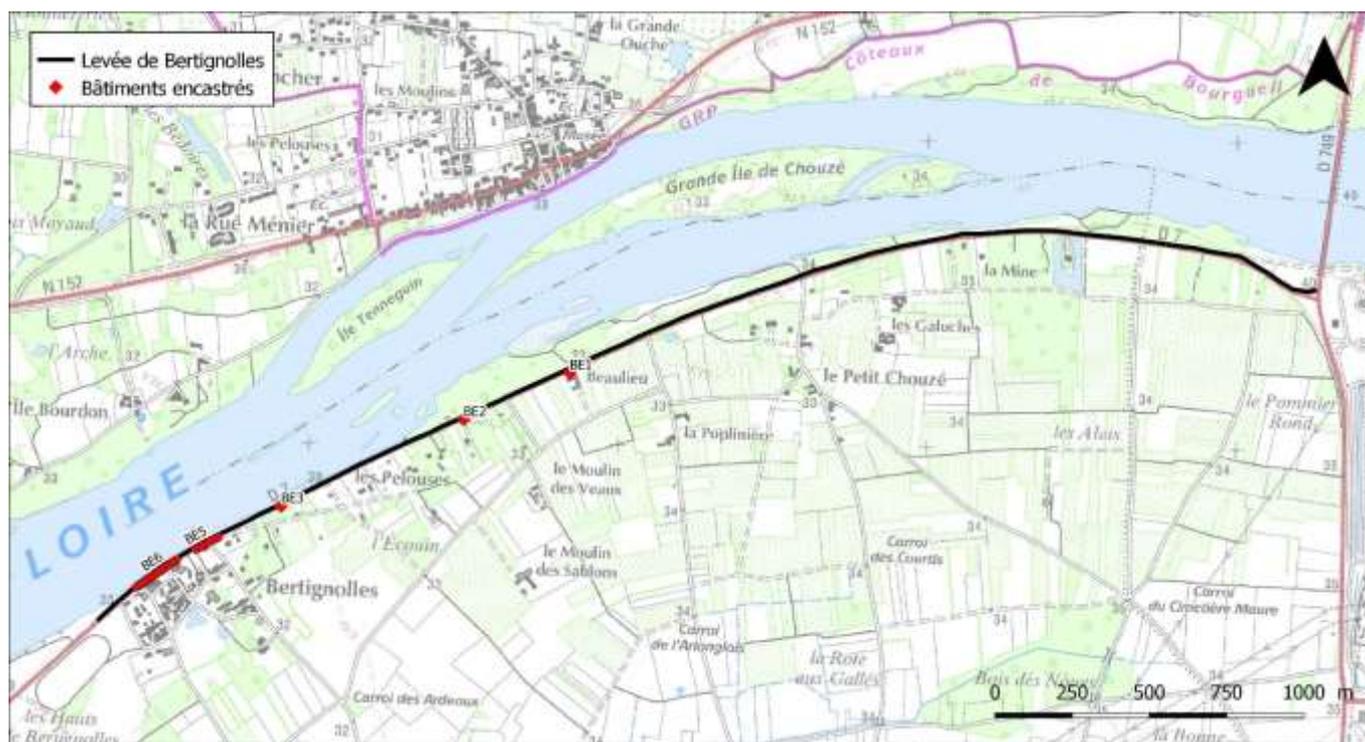


Figure 33\* : Localisation des bâtiments encastrés sur la levée de Bertignolles

### 3.1.6.5. Végétation sur et aux abords de la digue

La végétation joue un rôle important vis-à-vis de la stabilité des digues.

Ainsi, une végétation herbacée sur une levée est favorable à la préservation de celle-ci au regard du risque d'érosion externe, aussi bien côté cours d'eau que côté val. Elle facilite par ailleurs son inspection.

Au contraire, la végétation ligneuse est une menace pour la pérennité des levées. En effet, les racines qui se propagent à l'intérieur des levées ou dans leurs fondations laissent, en pourrissant, une ramification de conduits susceptibles de permettre à l'eau de pénétrer dans les ouvrages. Elles représentent ainsi des amorces de renard hydraulique (Caractérisation du développement des systèmes racinaires ligneux dans les digues, Zanetti, 2010).

De plus, les arbres de grande taille peuvent être déracinés et entraîner avec eux une partie de la digue, favorisant ainsi l'érosion externe.

Enfin, une végétation dense constitue un refuge pour les animaux fouisseurs qui construisent leurs terriers dans la digue, augmentant encore le risque de rupture.

L'évaluation des risques de rupture telle que présentée au chapitre 8 prend en compte la présence de végétation sur la digue et à ses abords ainsi que le type de végétation présente.

Dans le cadre de ses missions, le CD 37 assure tout au long de l'année l'entretien des digues

départementales. Il effectue ainsi au minimum un fauchage annuel sur toute la hauteur de la digue.

La Visite Technique Approfondie de 2016 met en évidence la présence de végétation sur la quasi-totalité de la levée de Bertignolles, pouvant aggraver le risque d'érosion interne. Celle-ci a été classifiée selon le type et l'importance des sujets identifiés, via les catégories suivantes : souches, végétation ligneuse généralisée (VLG), végétation ligneuse clairsemée (VLC) ou végétation ligneuse isolée (VLI). Ce classement intègre toute végétation ligneuse située à une distance inférieure à une dizaine de mètres des pieds de la levée.

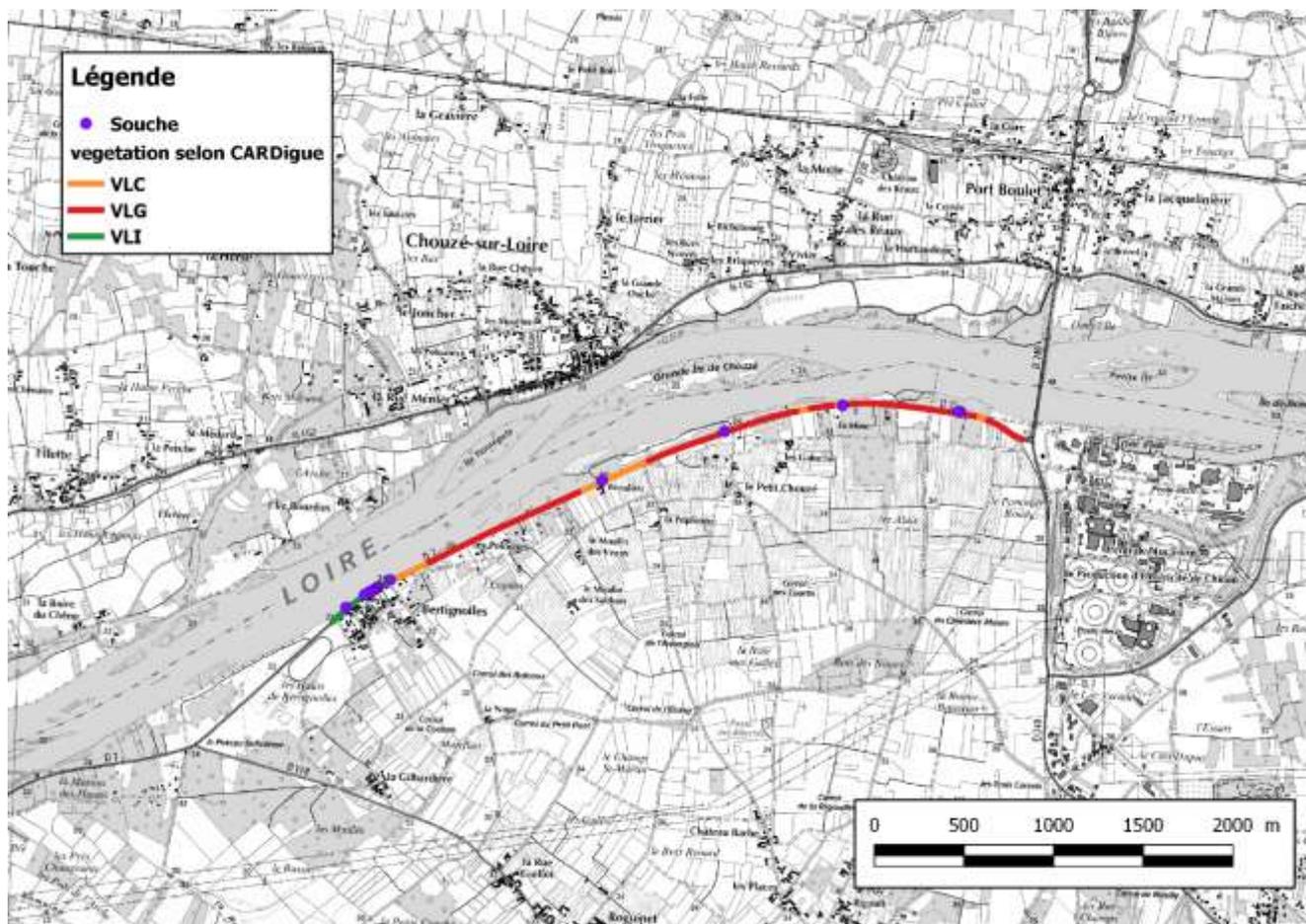


Figure 34\* : Caractérisation de la végétation présente sur la levée de Bertignolles

### 3.1.6.6. Présence d'animaux fouisseurs

La présence d'animaux fouisseurs a été traitée dans le cadre d'une note spécifique intitulée autres sollicitations et facteurs aggravants (note Antea Group – AHI – n°2016/26, consultable en Annexe 8).

La caractérisation de la présence des animaux fouisseurs est effectuée sur la base des différentes données de terrain disponibles auprès de CD 37 ainsi que sur les inspections réalisées par Antea Group :

*Conseil Départemental d'Indre-et-Loire (CD 37)  
Étude de dangers de la digue de Bertignolles - Rapport A 85656 vA*

- le rapport de visite du service de contrôle de sécurité des ouvrages hydrauliques réalisé en mai 2013,
- le bilan des travaux réalisés sur la digue de Bertignolles de 2013 à 2015,
- le compte-rendu de l'Établissement Public Loire de la réunion du 28 octobre 2014 réalisée dans le cadre d'appui technique aux collectivités prioritaires ou gestionnaires de digue,
- les fiches d'observation de digues du CD 37 de 2012 à 2016,
- la Visite Technique Approfondie de décembre 2016 réalisée par Antea Group.

L'ensemble des terriers recensés dans la levée de Bertignolles sont présentés ci-après. Chaque terrier est caractérisé par :

- le profil en travers auquel il est associé,
- l'entité du relevé : point ou linéaire,
- sa position dans la digue,
- une brève description.

n°	entité	PT associé	Position	Description
TER1-TER1BIS	Linéaire	43	Côté Val / Talus	Terriers de lapin sur 35m
TER2-TER2BIS	Linéaire	46	Côté Loire / Talus	Terriers de blaireaux en bas de talus (6 terriers, Ø 30cm) sur 20 m
TER3	Point	48	Côté Loire / Talus	Présence anciens terriers

**Tableau 14 : Recensement des zones de présence d'animaux fouisseurs sur la levée de Bertignolles**

L'ensemble des profils de digue auxquels des signes d'une présence (actuelle ou ancienne) d'animaux fouisseurs sont rattachés, sont matérialisés sur la figure suivante.

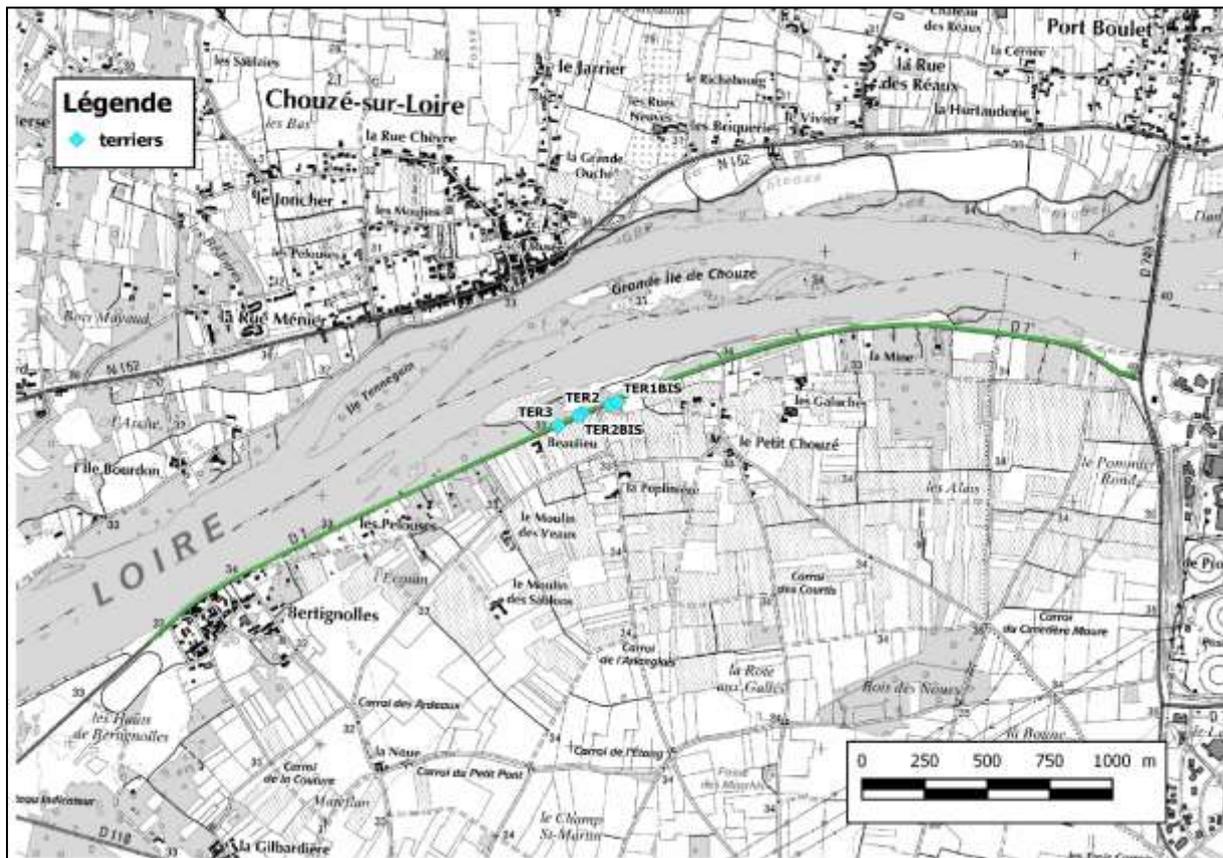


Figure 35\* : Zones de présence (actuelle ou ancienne) d'animaux fouisseurs sur la levée de Bertignolles

La levée de Bertignolles semble sujette à la problématique de présence d'animaux fouisseurs sur un tronçon relativement restreint. On notera toutefois que la végétation présente actuellement sur l'ouvrage ne rend pas la figure présentée ci-dessus exhaustive. Ceci sera intégré dans l'analyse des risques de défaillance qui sera réalisée.

## 3.2. Description de l'environnement des ouvrages

### 3.2.1. La Loire

Dans ce chapitre, la Loire est abordée uniquement en tant que milieu extérieur en contact ou à proximité de la digue de Bertignolles. On se reportera au besoin au chapitre 6 pour plus d'informations, notamment sur son hydrologie.

On notera que l'hydrologie du cours d'eau est corrélée à la gestion du barrage écrêteur de crue de Villerest, situé plusieurs centaines de kilomètres en amont de la zone d'étude.

Le barrage de Villerest est propriété de l'Établissement Public Loire et est géré par la société BRL Exploitation. L'influence du barrage sur l'hydrologie de la Loire au droit du secteur d'étude et son mode de gestion sont détaillés dans le chapitre 6 de la présente étude de dangers.

### 3.2.1.1. Morphologie de la Loire

La levée de Bertignolles se situe au niveau d'un intrados du chenal du lit mineur de la Loire. L'analyse de la morphologie de la Loire a fait l'objet d'une note spécifique (note Antea Group – AHI – n°2017/1, cf. Annexe 9). Celle-ci met en évidence une dynamique fluviale spécifique se traduisant par une faible variation de tracé mais une dynamique sédimentaire relativement importante.

La Figure 36 présente les principales évolutions morphologiques identifiables en plan sur la période de 1956 à 2011. Cette analyse a été réalisée sur la base des photographies aériennes de 1956 et de 2011. Ces données ont permis de tracer le lit mineur de la Loire à chacune de ces époques.

Les principales évolutions du lit mineur observées sur cette période sont localisées par des numéros sur les figures suivantes et commentées ci-dessous :

1. réduction de la section du bras en rive gauche induisant la chenalisation du lit sur la partie droite de l'enveloppe de migration du lit mineur la Loire,
2. disparition du bras existant en rive droite de la Loire induisant la chenalisation du lit sur la partie centrale de l'enveloppe de migration du lit mineur la Loire.

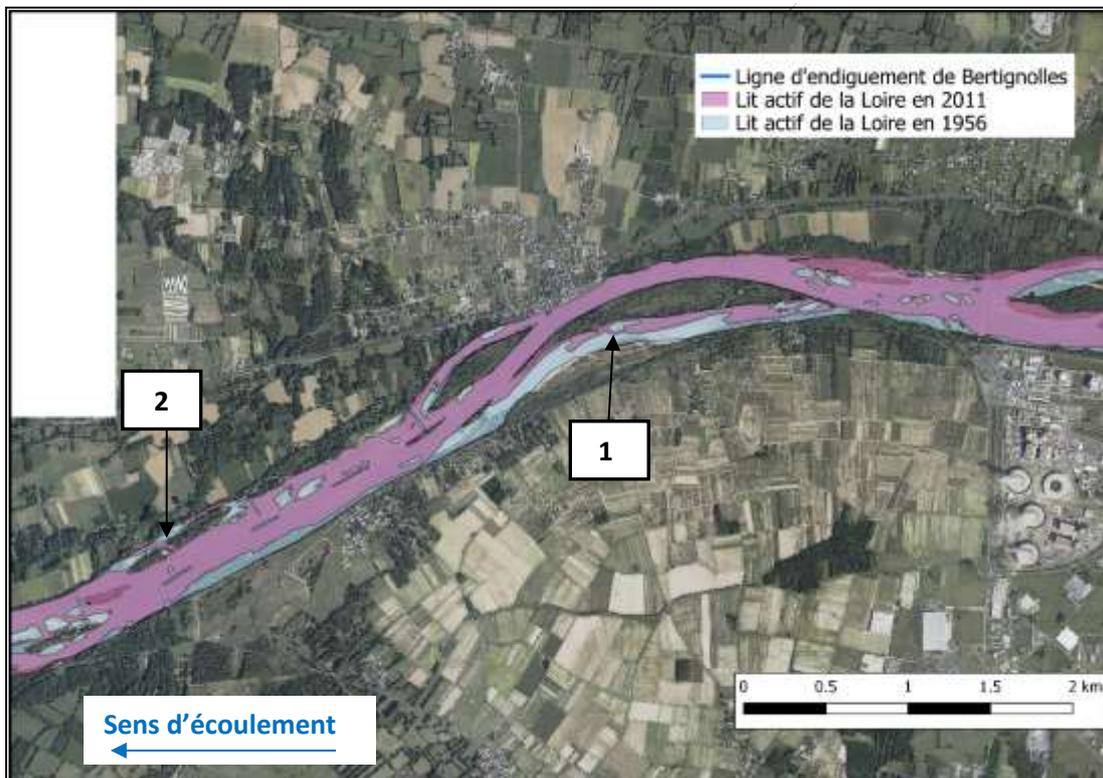


Figure 36\* : Evolution morphologique de la Loire au droit du val de Véron entre 1956 et 2011 matérialisée sur les photographies aériennes de 2011 (source : Antea Group)

L'évolution morphologique détaillée de la Loire au droit du secteur d'étude est présentée dans le paragraphe 6.4.

### 3.2.1.2. Identification des zones de contact direct de la digue avec le lit de la Loire

La ligne de défense principale du val du Véron longe la Loire sur sa rive gauche. Elle est implantée de façon plus ou moins proche du cours d'eau selon les tronçons.

On parle de contact direct de la digue avec la Loire lorsque le franc-bord<sup>7</sup> est inférieur à 10 m. Les figures suivantes présentent pour chaque profil en travers la distance du franc-bord, mesurée suite à l'analyse topographique menée.



Figure 37\* : Contact direct de la Loire avec la ligne de défense principale du val du Véron

La digue de Bertignolles présente un franc-bord restreint, inférieur à 10 m sur sa partie aval (profil n° 62 à 83, soit un linéaire de 1100 m), ainsi qu'en deux endroits ponctuels au droit des profils n° 21 et 24.

Par ailleurs, l'attention du lecteur est attirée sur un point particulier : la présence d'un bras mort en rive gauche de la Loire. Ce dernier longe la digue et se manifeste sur différents linéaires de la digue :

- du profil n° 6 au profil n° 11,
- du profil n° 49 au profil n° 61.

Lors d'une crue importante de la Loire, ce bras mort pourrait être réactivé, réduisant d'autant la largeur du franc-bord.

<sup>7</sup> Franc-bord : portion de terrain située entre le lit vif et le pied de digue côté cours d'eau.

### 3.2.2. La rive opposée et les autres systèmes d'endiguement existants à proximité

La digue de Bertignolles s'inscrit dans un contexte d'endiguement relativement important. En effet, elle fait face sur l'intégralité de son linéaire à la levée du val d'Authion (classe A) en rive droite de la Loire.

La figure ci-dessous présente le positionnement de la digue de Bertignolles vis-à-vis des autres systèmes d'endiguement présents dans son environnement.

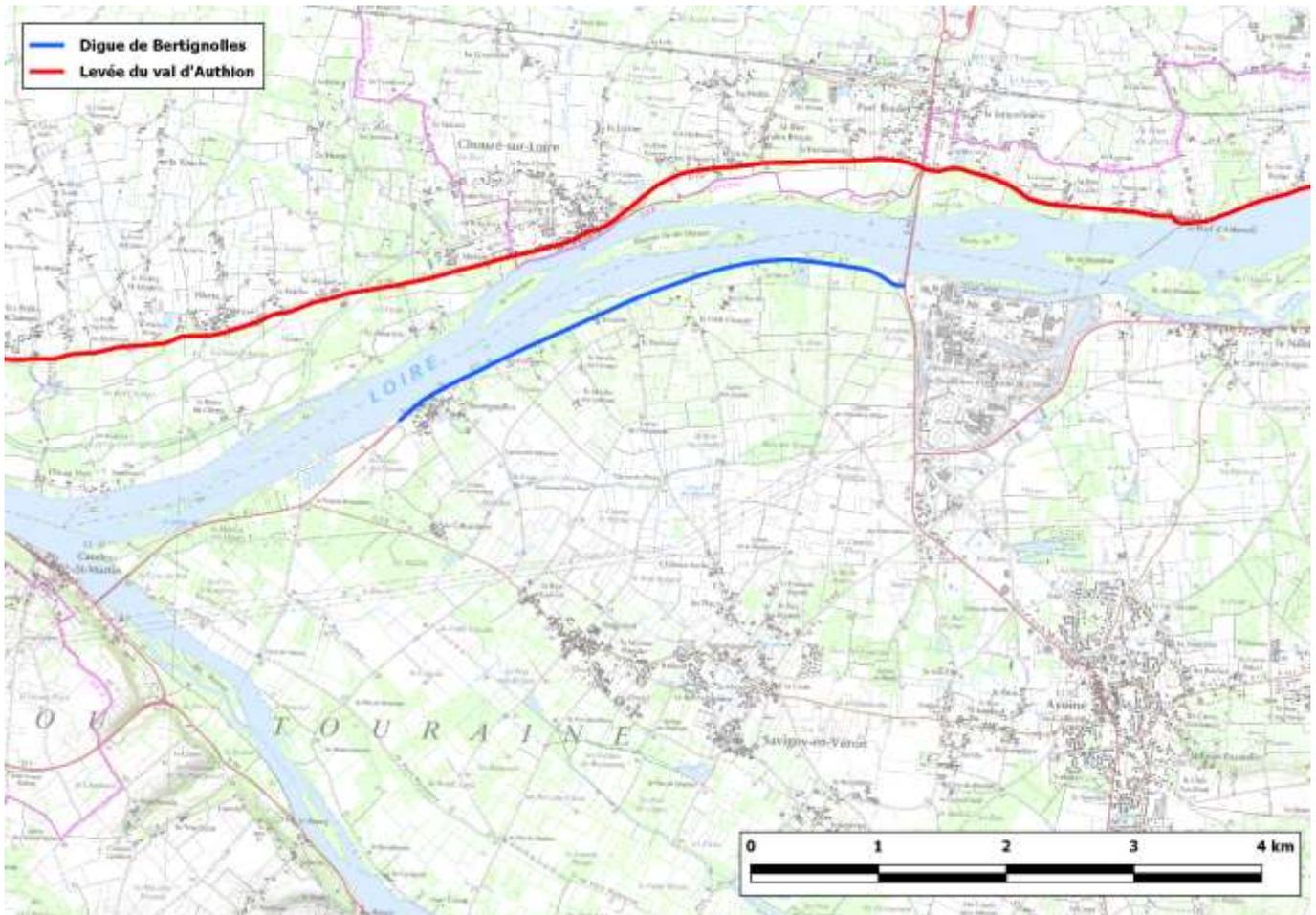


Figure 38\* : Autres systèmes d'endiguements existants à proximité du secteur d'étude

### 3.2.3. Raccordements amont et aval – Évaluation des zones sensibles au remous

La digue de Bertignolles se referme en amont sur le remblai routier de la RD 749 au niveau des terrains de la centrale nucléaire de Chinon. En aval, elle se termine en aval immédiat du lieu-dit Bertignolles au niveau du terrain naturel. Le système, ainsi constitué, est fermé côté amont et "ouvert" côté aval.

La zone protégée par la digue de Bertignolles est donc sensible au remous de la Loire. L'inondation à l'arrière de la levée pourrait se faire par la remontée du niveau de la Loire. Cette zone est identifiée ci-

après par exploitation du Modèle Numérique de Terrain et des cotes des lignes d'eau des crues modélisées au droit du secteur d'étude (cf. 3.1.3.2).

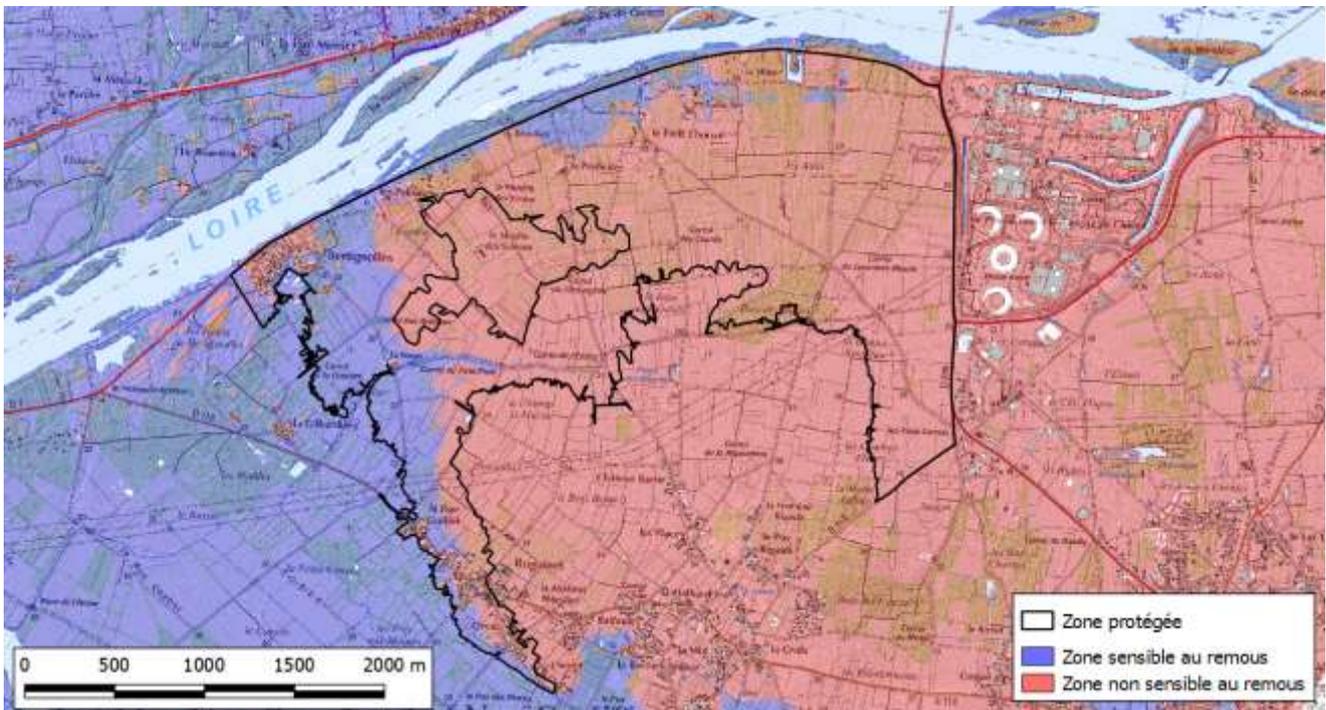


Figure 39 : Sensibilité au remous de la Loire dans la zone protégée du val de Véron pour une crue T = 5 ans

#### 3.2.4. Estimation des enjeux présents dans la zone protégée

**Nota** : les paragraphes qui suivent précisent les enjeux présents au sein de la zone protégée et les méthodes et données utilisées pour les estimer. Il s'agit d'estimations globalement maximalistes, dans la mesure où le recensement a été effectué sur l'ensemble de la zone protégée.

La méthodologie employée est présentée en détail en Annexe 10.

Les données utilisées dans le cadre de l'étude des enjeux présents au sein la zone protégée par la digue de Bertignolles sont les suivantes :

- BD TOPO® de l'IGN,
- BD PARCELLAIRE® de l'IGN,
- données foncières de la Direction Générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature (DGALN),
- recensement des installations classées,
- base Corine Land Cover 2006,
- résultats du recensement de la population de 2009 (source : INSEE),
- données de trafic routier – CD 37, 2016,
- base de données BASILE de l'Observatoire de l'Économie et des Territoires de Touraine (OE2T), décembre 2016.

Les résultats de la présente étude sont directement conditionnés par la qualité et la précision des données collectées.

#### 3.2.4.1. Évaluation de la population résidente exposée

Les tableaux ci-dessous fournissent les résultats du nombre de logements et de personnes résidentes présentes au sein de la zone protégée du système d'endiguement.

Communes	Logements	Population résidente
Avoine	0	0
Savigny-en-Véron	157	327
<b>TOTAL</b>	<b>157</b>	<b>327</b>

**Tableau 15 : Nombre de logements et de personnes résidentes présentes dans la zone protégée de la digue de Bertignolles et répartition par commune**

Par ailleurs, la répartition par typologie de bâtiment de la population résidente au sein de la zone protégée par le système d'endiguement selon les données fournies par la DGALN et la BD TOPO est présentée ci-dessous.

Habitat « R0 » (RDC uniquement)	Habitat « R1 » (RDC + 1 étage)	Habitat « R2 » et plus (RDC + 2 étages au moins)
215	112	0
66 %	34 %	0 %

**Tableau 16 : Répartition par typologie de bâtiment de la population résidente dans la zone protégée de la digue de Bertignolles**

#### 3.2.4.2. Évaluation de la population salariée

Au total, 4 entreprises ont été recensées au sein de la zone protégée de la digue de Bertignolles.

Commune	Établissement	Effectif
Savigny-en-Véron	B2M	1
Savigny-en-Véron	Atelier Leclou	1
Savigny-en-Véron	Usinage 37	0
Savigny-en-Véron	U-Logistique	252
<b>Total</b>	<b>4</b>	<b>254</b>

**Tableau 17 : Entreprises présentes dans la zone protégée de la digue de Bertignolles**

Conseil Départemental d'Indre-et-Loire (CD 37)  
 Étude de dangers de la digue de Bertignolles - Rapport A 85656 vA

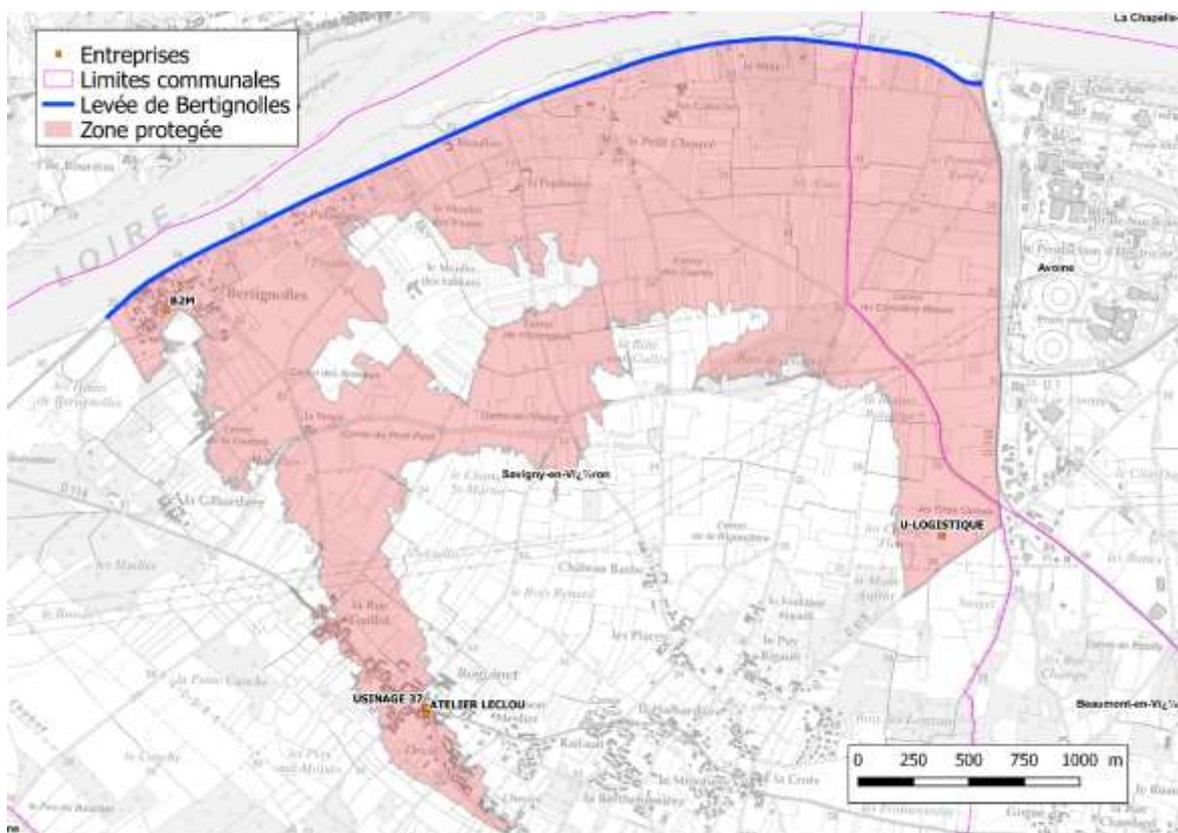


Figure 40 : Entreprises (de plus de 10 salariés) présentes dans la zone protégée de la digue de Bertignolles

3.2.4.3. Activités industrielles, agricoles, forestières, commerciales et halieutiques

❖ **Activités industrielles**

Une activité est répertoriée en tant qu'Installation Classée pour la Protection de l'Environnement (ICPE) dans la zone protégée par le système d'endiguement du val de Bertignolles :

Entreprise	Activité (Naf <sup>8</sup> )	Commune	Régime	Seveso
U-Logistique	Affrètement et organisation des transports	Savigny-en-Véron	E <sup>9</sup>	Non

Tableau 18 : ICPE présente dans la zone protégée par la digue de Bertignolles

Les ICPE sont définies par le Code de l'Environnement comme les installations « qui peuvent présenter des dangers ou des inconvénients soit pour la commodité du voisinage, soit pour la santé, la sécurité, la salubrité publique, soit pour l'agriculture, soit pour la protection de la nature, de l'environnement et des paysages, soit pour l'utilisation rationnelle de l'énergie, soit pour la conservation des sites et des monuments ainsi que des éléments du patrimoine archéologique. »

<sup>8</sup> Naf : Nomenclature d'activités française

<sup>9</sup> E : Enregistrement

Le régime E signifie que l'installation classée doit, préalablement à sa mise en service, déposer une demande d'enregistrement qui prévoit, entre autres, d'étudier l'adéquation du projet avec les prescriptions générales applicables. Le préfet statue sur la demande après consultation des conseils municipaux concernés et du public.

A noter que l'ICPE recensée sur la commune de Savigny-en-Véron est localisée au sein de la zone d'activités commerciales « Ecopôle du Véron ».

#### ❖ **Activités agricoles**

Le val de Véron s'inscrit dans un contexte essentiellement rural. Le val et plus particulièrement la zone protégée compte environ 242 ha de vignobles, de cultures annuelles associées aux cultures permanentes et de surfaces essentiellement agricoles.

#### ❖ **Activités commerciales**

Aucune activité commerciale n'est recensée au sein de la zone protégée du val de Véron.

#### ❖ **Autres activités**

Plusieurs Relais d'Assistance Maternelle (RAM) sont également recensés au sein de la zone protégée de digue de Bertignolles au niveau des lieux-dits de « Bertignolles », « Roguinet » et « le Petit Chouzé ».

#### 3.2.4.4. Évaluation des enjeux sensibles et/ou participant à la gestion de crise

Aucun ERP sensible et établissement de gestion de crise n'a été recensé au sein de la zone protégée de la digue de Bertignolles.

#### 3.2.4.5. Infrastructures de transport

##### ❖ **Axes routiers**

Les axes routiers principaux concernés par les zones protégées sont listés dans le tableau 13 ci-dessous.

Nom de l'axe	Rues de l'axe/Localisation	Longueur (km)
RD7	Crête de digue	4,2

Tableau 19 : Axe routier principal et linéaire de voirie interceptée par la zone protégée

D'après la campagne de mesures réalisée en septembre 2016 par le CD 37, le Trafic Moyen Journalier Hebdomadaire (trafic hebdomadaire divisé par 7 jours) en 2016 sur la section de la route départementale RD7 est de 860 véhicules par jour dont 5,2 % de poids lourds.

##### ❖ **Axes ferroviaires**

Aucune ligne ferroviaire n'a été répertoriée dans la zone protégée de la digue de Bertignolles.

### 3.2.4.6. Synthèse

Le tableau et la carte présentées ci-après synthétisent les enjeux identifiés, au sein de la zone protégée de la digue de Bertignolles, selon la méthodologie de recensement décrite en Annexe 10.

	Zone protégée du val de Véron
Population résidente	327
Population salariée	254
Population résidente + salariée	581
ICPE	1
ERP	0
Gestion de crise	0

**Tableau 20 : Synthèse des enjeux identifiés au sein de la zone protégée**

Conseil Départemental d'Indre-et-Loire (CD 37)  
 Étude de dangers de la digue de Bertignolles - Rapport A 85656 vA

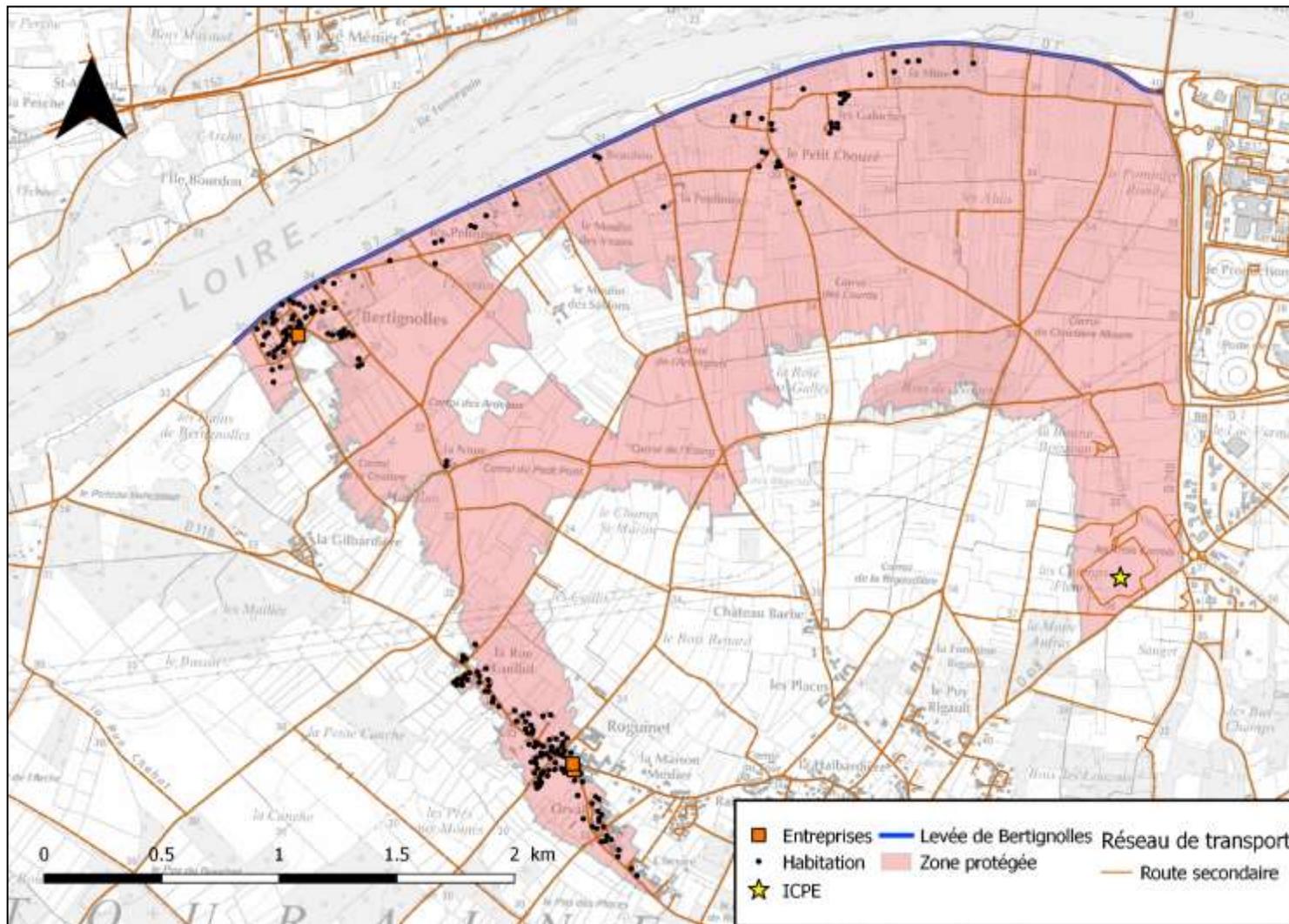


Figure 41\* : Carte de synthèse des enjeux présents dans la zone protégée du val de Véron

### 3.2.5. Conclusion sur le classement du système d'endiguement

Suivant les résultats de l'analyse fonctionnelle, les caractéristiques de la digue de Bertignolles en termes de hauteur de digue et d'estimation de la population résidente sont présentées dans le Tableau 21 ci-dessous.

Population résidente	Hauteur de la digue		
	H <sub>moyen</sub>	H <sub>max</sub>	H <sub>min</sub>
environ 327 hab.	1,0 m	2,8 m	0,1 m

**Tableau 21 : Caractéristiques du système d'endiguement**

Selon l'article R.214-113 du Code de l'Environnement, s'appuyant sur le décret n°2007-1735 du 11 décembre 2007, les classes des digues sont définies comme suit :

Classe	Caractéristiques de l'ouvrage et population protégée
A	$H \geq 1 \text{ m}$ et $P \geq 50\,000 \text{ hbts}$
B	$H \geq 1 \text{ m}$ et $1\,000 \leq P < 50\,000 \text{ hbts}$
C	$H \geq 1 \text{ m}$ et $10 \leq P < 1\,000 \text{ hbts}$
D	Soit $H < 1 \text{ m}$ soit $P < 10 \text{ hbts}$

**Tableau 22 : Définition des classes de digue selon l'article R.214-113 du Code de l'Environnement**

**En conséquence, l'analyse menée dans le cadre de la présente étude de dangers confirme le classement du système d'endiguement du val de Véron en tant que digue de classe C.**

### 3.3. Synthèse de l'analyse fonctionnelle

Sollicitations du système d'endiguement	Fonctions contraintes
Milieu eau et actions hydrauliques	Empêcher l'entrée d'eau dans la zone protégée jusqu'à la crête de digue Résister au phénomène d'érosion externe Résister au phénomène d'érosion interne
Ouvrages traversants	Empêcher l'entrée d'eau dans la zone protégée Permettre la vidange de la zone protégée
Végétation	Être stable
Animaux fouisseurs	Résister à l'action des animaux fouisseurs
Bâtiments encastrés	Être stable
RD 7	Être stable
Séisme	Être stable
Embâcles de glace	Résister aux chocs

**Tableau 23 : Synthèse des fonctions contraintes du système d'endiguement du val de Véron et de son environnement**

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

### 4.1. Organisation du gestionnaire de la digue

Le gestionnaire de la digue de Bertignolles en rive gauche de la Loire est le Conseil Départemental d'Indre-et-Loire.

L'organisation administrative et géographique des services départementaux justifie la mise en place de deux postes distincts, rattachés respectivement au Service Territorial d'Aménagement (STA) nord-ouest et au STA sud-ouest. Le poste du STA sud-ouest est lui-même découpé en deux secteurs, couvrant chacun un tronçon de digue (Bois Chétif et Bertignolles). Ces entités font partie de la Direction des routes et des transports au sein de la DGA Territoires.

La digue de Bertignolles est ainsi gérée par le secteur 2 du STA sud-ouest.

### 4.2. Dossier d'ouvrage

Le dossier d'ouvrage de la digue de Bertignolles a été mis à jour le 31 mai 2016. Il est organisé en différentes chemises et regroupe l'ensemble des documents suivants :

- A – Chemise « Textes réglementaires » :
  1. Décret 2007-1735 du 11 décembre 2007 relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques et modifiant le code de l'environnement,
  2. Arrêté du 29 février 2008 fixant les prescriptions relatives à la sécurité et à la sûreté des ouvrages hydrauliques modifié par l'arrêté du 16 juin 2009,
  3. Arrêté du 12 juin 2008 définissant le plan de l'étude de dangers des barrages et des digues et en précisant le contenu,
  4. Circulaire du 8 juillet 2008 sur le contrôle et la sécurité des ouvrages hydrauliques au titre des dispositions mises en place par le décret 2007-1735 du 11 décembre 2007 (art. R. 214-147 du code de l'environnement),
  5. Arrêté préfectoral du 11 décembre 2009 de prescriptions spécifiques à déclaration reconnue au titre de l'article L. 214-6 du code de l'environnement concernant LA DIGUE DU VAL DE VERON (CLASSEMENT EN C),
  6. Arrêté du 21 mai 2010 définissant l'échelle de gravité des événements ou évolutions concernant un barrage ou une digue ou leur exploitation mettant en cause ou étant susceptible de mettre en cause la sécurité des personnes et des biens,
  7. Arrêté du 15 novembre 2012 portant agrément d'organismes intervenant pour la sécurité des ouvrages hydrauliques.

- B – Chemise « Plan de surveillance – Consignes écrites » :
  1. Plan de surveillance des levées départementales d'Indre et Loire,
  2. Consignes écrites concernant la surveillance des levées départementales d'Indre et Loire,
- C – « Plan de localisation de la digue de Bertignolles » : une carte est au verso de la couverture du dossier d'ouvrage,
- D – Chemise « Visites techniques » :
  1. Visites techniques annuelles,
  2. Visites Techniques Approfondies (VTA),
  3. Visites d'inspection (DREAL),
- E – Chemise « Fiches de déclaration ou analyse d'événement important pour la sûreté hydraulique »,
- F – Chemise « Divers » :
  1. Arrêtés préfectoraux pour la destruction du blaireau,
- G – Chemise « Organisation du STASO »,
- H – Chemise « Étude de dangers »,
- I – Chemise « Dossiers transmis à la DREAL »,
- J – Chemise « Travaux ».

Le dossier d'ouvrage est conservé dans les locaux du Conseil Départemental d'Indre-et-Loire situés au STA sud-ouest.

### 4.3. Consignes écrites

Les consignes écrites relatives à la surveillance de la digue de Bertignolles ont été élaborées par le Conseil Départemental d'Indre-et-Loire le 27 mai 2013. Elles ont été mises à jour à plusieurs reprises suite aux avis rendus par la DREAL. La dernière mise en jour, en date du 2 août 2016 (version n° 6), a été opérée suite à la crue de juin 2016. Ces consignes ont été approuvées par arrêté préfectoral.

Elles sont constituées d'un règlement d'exploitation et de surveillance de la digue. A travers ce document, les consignes écrites fixent les instructions de surveillance en toutes circonstances. Elles permettent ainsi de répondre aux exigences demandées par le décret n°2007-1735 du 11 décembre 2007 à tout gestionnaire en période normale et en période de crue.

Conformément à l'arrêté du 29 février 2008 fixant les prescriptions relatives à la sécurité et à la sûreté des ouvrages hydrauliques, elles décrivent :

- le contexte et les objectifs,
- l'organisation de l'entretien des ouvrages,
- l'organisation de la surveillance (surveillance hors crue, en crue, post-crue),
- la périodicité de la surveillance,

- l'équipe de surveillance,
- la méthode de surveillance (selon le type de visite).

Par ailleurs, un Plan de Surveillance des Levées (PSL) départementales d'Indre et Loire, incluant notamment la digue de Bertignolles, a été élaboré par le Conseil Départemental d'Indre-et-Loire dès novembre 2010. Sa dernière mise à jour date du 16 novembre 2011.

#### 4.4. Surveillance

La surveillance de la digue permet de détecter et de réparer les désordres afin d'assurer le fonctionnement correct de celle-ci. Elle a été établie pour la digue de Bertignolles dans le cadre des consignes écrites et du plan de surveillance des levées.

Le décret n° 2007-1735 du 11 décembre 2007 impose au propriétaire et à l'exploitant d'une digue, l'entretien régulier et la surveillance de son ouvrage.

Ces éléments, approuvés le 24 octobre 2016 par le Préfet d'Indre-et-Loire, sont présentés dans les paragraphes suivants.

##### 4.4.1.1. Surveillance hors crue

###### ❖ **La surveillance programmée**

L'objectif de cette surveillance en dehors de tout événement climatique est de :

- connaître le patrimoine,
- identifier les faiblesses et maintenir la digue en bon état,
- préparer la crise (préparation de la surveillance en crue, préparation des interventions d'urgence, organisation de la fermeture des vannes et clapets, formation des agents en charge de la surveillance,...).

Il faut lors des visites de terrain :

- observer les dégradations locales (terriers d'animaux, affouillements, fissurations, mouvements structuraux) en vue d'une intervention d'entretien,
- vérifier le dégagement de la végétation et le maintien des voies de service,
- vérifier les stocks de matériaux pour les interventions d'urgence,
- vérifier l'état des passages batardables et des dispositifs de fermeture, et notamment des clapets. Cette vérification ne comprend pas de tests de fonctionnement,
- vérifier la disponibilité des équipements nécessaires à la surveillance en crue,
- développer et mettre à jour la connaissance des levées.

La surveillance de la digue est organisée deux fois par an à pied, côté val et côté rivière, en utilisant un modèle de fiche d'observations. Elle est réalisée par un ou deux agents encadrés par un chef d'équipe.

Les points de vigilance suivants font alors l'objet d'une attention particulière lors des visites : présence d'animaux fouisseurs sur le linéaire compris entre les PR 47 et 48.

Par ailleurs, dans le cadre de la patrouille routière organisée sur le réseau routier départemental, une attention particulière est portée aux sections de digue afin de profiter du passage régulier des agents du département pour identifier les éventuels désordres en crête de digue. En cas d'anomalie constatée, la mention dans le registre de patrouille est complétée par une alerte directe au chef des Services Territoriaux d'Aménagement (STA), qui jugera des suites immédiates à donner.

La fréquence de la surveillance (surveillance visuelle en véhicule), assurée par les agents de surveillance active, est de 2 fois par semaine.

La période hors crue est également mise à profit pour former les agents en charge de la surveillance. Cette formation, qui dépasse la seule connaissance des lieux, doit permettre aux différents acteurs d'acquérir les bases nécessaires pour interpréter correctement les observations faites en cas de crise :

- compréhension des phénomènes susceptibles de se produire dans la digue et capacité à observer les bonnes choses au bon endroit pour les agents en charge de la surveillance sur le terrain,
- capacité à analyser les observations et en déduire les éventuels travaux d'urgence à entreprendre pour le responsable d'équipe et le chef de poste.

Cette formation a été dispensée à tous les agents susceptibles d'intervenir sur les digues lors de séances de formation organisées les 28 et 30 novembre 2012. Elle sera le cas échéant renouvelée en fonction de l'évolution des effectifs.

Compte tenu du linéaire de digues relativement modeste, le Conseil Départemental ne développera pas en interne d'expertise poussée en matière d'ouvrages de protection contre les crues. Il s'appuiera soit sur des bureaux d'études spécialisés dans le cadre de ses obligations de contrôle de sûreté, soit sur l'expertise des services de l'État en cas de crise.

L'organisation administrative et géographique des services départementaux justifie la mise en place de 2 postes distincts, rattachés respectivement au STA nord-ouest et au STA sud-ouest. Le poste du STA sud-ouest est lui-même découpé en deux secteurs, couvrant chacun un tronçon de digue (cf. Tableau 24).

Poste	Secteur	Localisation
Poste 1 STA nord-ouest	Secteur 1 Digue de Cinq-Mars-la-Pile	Deux tronçons situés au droit de l'échangeur de l'A85 et au niveau de la déviation de Cinq-Mars-la-Pile.
Poste 2 STA sud-ouest	Secteur 1 Digue de Bois Chétif	Depuis l'île Saint Martin sur la RD16 jusqu'à l'extrémité aval de la digue, à l'embouchure d'Indre
	Secteur 2 Digue de Bertignolles	Depuis le CNPE jusqu'à l'aval de Bertignolles

**Tableau 24 : Organisation administrative et géographique des services départementaux**  
(Source : Consignes écrites)

Enfin, le Département se réserve le droit d'organiser des exercices pour la mise en place des bouchures.

Par ailleurs, le STA produit un rapport de surveillance tous les cinq ans, comprenant :

- une synthèse des opérations de surveillance régulière réalisées depuis le précédent rapport, y compris sur les ouvrages traversants (clapets...),
- la description des éventuels incidents intervenus et les dispositions prises pendant et après l'événement,
- le bilan des éventuels tests de fonctionnement des ouvrages traversants dont la gestion relève du Conseil départemental,
- le récapitulatif des travaux engagés, soit en régie, soit par une entreprise, y compris les travaux récurrents d'entretien.

Ce rapport sera transmis au Service Entretien et Exploitation des Routes (SEER) et au Service Etudes et Travaux Neufs (SETN), chargés de sa vérification et de sa transmission aux entités suivantes :

- le Préfet,
- le Service Police de l'eau,
- le Service de Contrôle de la Sécurité des Ouvrages Hydrauliques (SCSOH),
- la DREAL centre Val de Loire.

La transmission aux services de l'État du rapport de surveillance de l'année n sera réalisée durant le premier semestre de l'année n+1.

#### ❖ **Les Visites Techniques Approfondies**

Les visites détaillées de l'ouvrage sont menées par un personnel compétent notamment en hydraulique, en géotechnique, en génie-civil et en ayant une connaissance suffisante du dossier et des résultats d'auscultation de l'ouvrage.

Ces Visites Techniques Approfondies seront organisées à minima à la fréquence prescrite par l'arrêté de classement des digues, à l'initiative du chef du STA en charge de la surveillance, soit tous les 2 ans pour la digue de Bertignolles (classe C).

En fonction des observations précédemment réalisées, elles associeront :

- les agents du STA en charge de la surveillance régulière,

- si besoin, des spécialistes du Conseil départemental en matière d'hydraulique, de géotechnique, de structure,
- des experts sur des thématiques identifiées, le cas échéant (DREAL, bureau d'études).

Les Visites Techniques Approfondies sont réalisées selon les mêmes modalités que les visites programmées. Elles comprennent en complément un test de fonctionnement des ouvrages hydrauliques (clapets) et une vérification de la présence des batardeaux de bouchures dans leurs lieux de stockage.

➤ Contrôle des ouvrages hydrauliques (clapets) :

La digue de Bertignolles est équipée d'ouvrages hydrauliques. Les 3 clapets à vidange manuelle ont été remplacés par des clapets à vidange automatique qui sont repérés sur la chaussée par un marquage au sol spécifique.

Le contrôle du fonctionnement est réalisé manuellement en actionnant les pièces mobiles, et en vérifiant l'état de l'intérieur des buses.

➤ Stockage des batardeaux de bouchures :

Les batardeaux de bouchures sont stockés au centre d'exploitation de l'île Bouchard. La mise en place de ces batardeaux ne fait pas partie de la VTA.

➤ Fiches d'observations :

Le modèle de fiche d'observations constitue le support privilégié. Il peut si besoin être complété par tout document spécifique (rapport d'étude, photographies, note technique).

Les rapports de Visites Techniques Approfondies sont transmis par le chef de STA au SEER ainsi qu'au chargé de mission du SETN, accompagnés des éventuelles propositions d'interventions. Le SEER propose à l'exécutif départemental les suites qu'il envisage de donner en matière de confortement, d'exploitation ou de surveillance. Il adresse au Préfet et à la DREAL Centre - Val de Loire dans le premier trimestre de l'année une copie des rapports de visite de l'année précédente, en précisant, le cas échéant, les mesures correctrices qu'il compte engager.

#### 4.4.1.2. Surveillance en crue

❖ **Les modalités de surveillance**

La surveillance pendant la crue doit permettre de :

- détecter les désordres et réaliser les interventions d'urgence nécessaires,
- transmettre les informations nécessaires à la mise en œuvre des mesures de sécurité civile, qui n'incombent pas au Conseil Départemental,
- procéder à la mise en place des batardeaux des bouchures. L'installation de ces dispositifs s'effectue à partir du seuil de crue suivant.

Lors de la crue de juin 2016, à la hauteur d'eau de 3,50 m constatée à l'échelle de Langeais, le niveau de l'eau se situait à 0,54 cm en dessous du seuil des bouchures,

Les batardeaux de bouchure sont mis en place dès que le seuil de 3,00 m à l'échelle de Langeais est atteint.

Trois niveaux ont été identifiés :

- **la pré-alerte** : l'atteinte des cotes de pré-alerte (3,50 m à l'échelle de Langeais) provoque la mobilisation des services départementaux. Une visite d'inspection est organisée en urgence (si possible dans les 48 heures) par les STA, pour consolider les données disponibles. Il est procédé aux éventuelles réparations jugées nécessaires. Le SEER préfigure la cellule de crise interne et relaie toute l'information utile aux STA,
- **la crue moyenne à forte** : dès que le niveau de 4,75 m à l'échelle de Langeais est annoncé par le service de prévision des crues, une surveillance renforcée est organisée. Son importance dépend des enjeux présents dans le val.  
Pour la digue de Bertignolles (classe C), ce contrôle intervient deux fois par semaine, pendant les jours ouvrés.  
Les relevés terrain sont consolidés et analysés en cellule de crise du Conseil Départemental, qui détermine les éventuelles mesures correctives à apporter. Une copie des relevés de terrain est adressée aux services de l'État (cellule de crise de la DDT), à titre d'information,
- **la crue très forte** : la surveillance mise en œuvre pour les crues moyennes est maintenue jusqu'à ce que le niveau de 6,00 m au niveau de l'échelle de Langeais soit atteint (au-delà de la crue cinquantennale). A partir de cette hauteur d'eau, la sécurité de la digue ne peut pas être garantie. Les agents chargés de la surveillance courent des risques à inspecter les digues à pied et, pour leur sécurité, l'arrêt de la surveillance doit être organisé. Le Département informe la cellule de crise de l'État du risque de rupture brutale des ouvrages de protection, afin que l'État puisse statuer et organiser l'évacuation du val menacé. Dans la mesure du possible, la surveillance sera prolongée jusqu'à la fin de l'évacuation. La décision concernant l'opportunité de poursuivre la surveillance en cas de crue très forte appartient au Président du Conseil Départemental d'Indre-et-Loire, sur proposition des services.

Ces différentes étapes sont synthétisées sur la figure suivante :

<p><b>Hors crue</b></p>	<p>Surveillance régulière de la digue :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- en crête dans le cadre de la patrouille routière</li> <li>- 2 fois par an à pied, côté val et côté rivière</li> </ul> <p>Travaux de confortement nécessaires.</p> <p>Surveillance des cotes de la Loire par le SEER</p>
<p><b>Pré-alerte</b> <b>3,5 m à Langeais</b></p>	<p>Surveillance spécifique de la digue, à pied, côté val et côté rivière.</p> <p>Transmission des cotes de la Loire par le SEER aux STA</p> <p>Pré configuration de la cellule de crise.</p>
<p><b>Crue moyenne</b> <b>4,75 m à Langeais</b></p>	<p>Surveillance régulière de la digue, à pied, côté val et côté rivière :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- deux fois par semaine pour la digue de Bertignolles (classe C)</li> </ul> <p>Travaux de confortement en urgence si nécessaire</p> <p>Traitement de la problématique des digues au sein de la cellule de crise du Conseil Départemental de la DGAT (complémentarité routes / digues / transports).</p>
<p><b>Crue forte</b> <b>6,00 m à Langeais</b></p>	<p>Arrêt de la surveillance, après information du Préfet sur les risques de rupture brutale.</p> <p>Cellule de crise réunie quotidiennement.</p> <p>Travaux de confortement en urgence si nécessaire, sur demande des services de l'État, sous réserve de ne pas porter atteinte à la sécurité des agents</p>

Figure 42 : Niveaux de surveillance en crue (source : Consignes écrites)

#### ❖ **La cellule de crise du Conseil Départemental**

La cellule de crise du Conseil départemental, au sens du présent plan de surveillance des levées départementales, est l'organe de pilotage central au niveau de la DGAT. Elle est à séparer de la cellule de crise pilotée par le Préfet, à laquelle le Conseil départemental participe, et d'une éventuelle cellule de crise commune à l'ensemble des directions générales adjointes du Département.

Ses missions sont opérationnelles.

La cellule de crise du Conseil départemental est composée de :

- M le DGAT, qui la pilote,
- directeur des Routes et des Transports ou de son adjoint,
- membres du service entretien et exploitation des routes (SEER), chargés de son animation,
- chef du service des transports ou de son adjoint,
- chargé de mission sécurité crise,
- cadre d'astreinte et du directeur d'astreinte s'il le juge utile,
- chefs de STA concernés.

Elle est complétée en tant que de besoin par les personnes ressources dont la présence est jugée utile.

Elle est basée dans les locaux de la Direction générale adjointe « Territoires » (rue Etienne Pallu). En cas de crue majeure menaçant les bâtiments dans le val de Tours, elle pourra être délocalisée soit sur le site de La Mignonne (STA Centre, à Joué-les-Tours), soit à la Maison des Sports à Parçay-Meslay.

A compter de l'annonce de la prévision du dépassement de la cote « crue moyenne », soit 4,75 m au niveau de l'échelle de Langeais, la cellule de crise est susceptible de se réunir, en fonction des besoins de ses membres, de façon à préparer son travail en cas de crue annoncée.

Dès que cette cote annoncée est atteinte, la cellule de crise se réunit très régulièrement, y compris le week-end et les jours fériés si nécessaire.

Elle suit un ordre du jour constant :

- bilan des actions engagées depuis la dernière cellule de crise,
- synthèse des informations issues du terrain (surveillance),
- examen des perspectives d'évolution de la crue,
- décisions en termes de travaux de confortement d'urgence,
- décisions en termes de transports,
- proposition du niveau du plan de surveillance (alerte / crue moyenne à forte / crue très forte).

### ❖ **Les dispositions en cas d'anomalies constatées**

Conformément à l'arrêté du 21 mai 2010 définissant l'échelle de gravité des événements ou évolution concernant une digue ou son exploitation et mettant en cause ou étant susceptible de mettre en cause la sécurité des personnes ou des biens, le Conseil départemental doit déclarer les événements pouvant avoir un impact en termes de sûreté hydraulique auprès du Préfet, avec copie au service de l'environnement industriel et des risques de la DREAL Centre - Val de Loire. Sont concernés les dysfonctionnements liés aux défaillances de « barrières de sécurité » identifiées dans une étude de dangers, pouvant entraîner la perte de fonctions de sécurité du type « retenir l'eau », « maîtriser la cote de retenue » ou « maîtriser le débit relâché à l'aval ».

Le recensement des événements déclarés est destiné à alimenter une base de données et à faciliter la réalisation et la lecture critique de l'étude accidentologique requise dans les études de dangers.

Les événements sont classés selon la nomenclature suivante :

<b>Accidents</b>	Événement à caractère hydraulique ayant entraîné : <ul style="list-style-type: none"> <li>- soit des décès ou des blessures graves aux personnes,</li> <li>- soit une inondation totale ou partielle de la zone protégée suite à une brèche,</li> </ul>
<b>Incidents graves</b>	Événement : <ul style="list-style-type: none"> <li>- à caractère hydraulique ou consécutif à une crue ayant entraîné une mise en danger des personnes sans qu'elles aient subi de blessures graves,</li> <li>- ayant entraîné des dégradations importantes de l'ouvrage, quelles que soient leurs origines, mettant en cause sa capacité à résister à une nouvelle crue et nécessitant une réparation en urgence.</li> </ul>
<b>Incidents</b>	Événements à caractère hydraulique ayant entraîné une dégradation significative de la digue et nécessitant une réparation dans les meilleurs délais, sans mise en danger des personnes.

**Figure 43 : Nomenclature des événements importants (Source : Consignes écrites)**

La déclaration d'un événement, à compter de la date à laquelle le responsable de l'ouvrage a pris connaissance de l'événement, s'effectue :

- de façon immédiate pour les événements de couleur rouge,
- dans les meilleurs délais pour les événements de couleur orange, sans toutefois excéder une semaine,
- les événements de couleur jaune font l'objet d'une déclaration annuelle auprès du Préfet.

Le Préfet valide la proposition de niveau de classification et la notifie au responsable ou notifie à ce dernier un autre niveau de classification. Le cas échéant, le Préfet notifie au responsable le délai au terme duquel celui-ci doit lui transmettre un rapport précisant les circonstances de l'événement, analysant ses causes et indiquant les mesures prises ou envisagées pour éviter qu'il ne se reproduise.

Les événements sont constatés par le STA. Ils sont transmis au SETN qui organise la notification.

Par ailleurs, quel que soit le niveau de l'événement, le SEER informe soit le directeur d'astreinte en dehors des heures ouvrables, soit le Chargé de mission sécurité, pour mise en œuvre de la procédure relative aux inondations, prévue dans le dispositif général d'astreinte du Conseil départemental.

#### 4.4.1.3. Surveillance post crue

Après un épisode de crue dont la cote a atteint ou dépassé le seuil de pré-alerte (3,50 m sur l'échelle de Langeais) ayant sollicité les digues, il est nécessaire de réaliser une surveillance post-crue pour :

- identifier et évaluer les dommages subis par la digue,
- remettre en état la digue avant la prochaine crue.

La visite d'ensemble de la digue doit ainsi permettre de :

- relever l'ensemble des désordres résultant des contraintes hydrauliques ou mécaniques externes subies par la digue (charge hydraulique, surverse, vagues) ou des mécanismes internes déclenchés par la mise en eau (circulations d'eau à travers la digue ou sous le corps de digue), sans négliger les indices de surverse (herbe couchée, ravinement),
- estimer l'importance des désordres,
- définir les travaux à réaliser,
- définir les priorités des interventions en vue de l'engagement des travaux de réparation.

Ces visites de contrôle après crue seront réalisées selon les mêmes modalités organisationnelles que les visites programmées. Elles seront restituées en cellule de crise départementale lors d'une réunion de débriefing. Elles seront réalisées dans le mois qui suit la fin de toute crue ayant atteint le pied de digue côté fleuve. Ce délai sera ramené à 15 jours si la crue a dépassé 4,75 m à l'échelle de Langeais (crue moyenne, d'un débit d'environ 3 300 m<sup>3</sup>/s).

En cas de séisme, une visite de contrôle sera conduite dans les mêmes conditions qu'en cas de crue si des désordres sont constatés sur le réseau routier départemental à proximité des digues. Il est considéré que l'état de la chaussée supportée par la digue est de nature à attester d'éventuels désordres de l'ouvrage. Les visites seront réalisées dans un délai d'un mois après la survenue du séisme. Ce délai est ramené à 15 jours en cas de séisme d'intensité supérieure à 5,0 sur l'échelle de Richter.

Les rapports de visites de contrôle seront transmis par le chef de Services Territoriaux d'Aménagement (STA) au Service Etudes et Travaux Neufs (SETN), accompagnés des éventuelles propositions d'interventions. Le SEER proposera à l'exécutif départemental les suites qu'il envisage de donner en matière de confortement, d'exploitation ou de surveillance. Si des désordres ont été constatés, il déclarera l'évènement, en joignant une copie des rapports de visite.

Un rapport « post-crue » sera transmis au Préfet (DDT, copie SCSOH), y compris en l'absence d'incident et de désordres sur le système d'endiguement dès que la crue atteindra la côte de 4,75 m à l'échelle de Langeais.

Ce rapport sera transmis dans un délai de 2 mois après l'événement.

## **4.5. Procédures d'évaluation du risque**

### *4.5.1. Étude de dangers*

La présente étude constitue la première étude de dangers de la digue de Bertignolles. Elle sera actualisée dans les dix ans après son dépôt. Elle pourra faire l'objet d'une actualisation avant cette date si la situation l'exige, notamment en cas de forte crue ou de séisme important.

Elle devra être actualisée au moins tous les 10 ans.

### *4.5.2. Revue de sûreté*

La digue de Bertignolles est une digue de classe C. À ce titre, l'arrêté préfectoral de classement en date du 11 décembre 2009 ne demande pas la réalisation de revue de sûreté.

## 5. Identification et caractérisation des potentiels de dangers

Les potentiels de dangers relatifs au système d'endiguement du val de Véron résultent principalement de l'irruption accidentelle d'eau dans la zone protégée. Les situations d'entrée d'eau, par ordre de gravité décroissante, sont les suivantes :

- ouverture d'une brèche partielle ou totale sur un tronçon de digue,
- surverse sans brèche au-dessus de la crête d'un tronçon de digue,
- dysfonctionnement des clapets anti-retours des canalisations traversant la digue.

D'autres phénomènes qui ne sont pas directement liés à la ligne de défense principale, peuvent être responsables d'inondations dans la zone protégée :

- remontée de nappe dans le val en arrière du système d'endiguement,
- contournement de la digue au niveau de la zone de raccordement aval (phénomène de remous en cas d'inondation par l'aval),
- inondation par ruissellement.

### 5.1. Ouverture d'une brèche partielle ou totale sur un tronçon de la digue

La libération d'eau dans la zone protégée, en cas de brèche dans le système d'endiguement, sera d'autant plus violente que le niveau d'eau devant la digue sera haut par rapport au niveau des terrains côté zone protégée. La hauteur d'une digue est définie par la dénivellation entre le sommet de la digue et le niveau du terrain naturel côté zone protégée à proximité. On notera que sur un linéaire total de l'ordre de 4 250 m, 1 750 m environ (41 %) de la digue de Bertignolles présentent une hauteur supérieure à 1 m dont 250 m environ (6 %) dépassent 2 m.

Cette situation est potentiellement dangereuse car elle conduirait à une inondation d'une intensité importante en arrière immédiat de la digue en cas de brèche. La libération de l'eau serait brutale, les vitesses des écoulements libérés seraient importantes, ce qui induirait une mobilisation des matériaux du corps de digue, de la fondation de l'ouvrage et du terrain naturel du val, entraînant la création d'une fosse d'érosion.

La partie de la zone protégée située en arrière immédiat des digues est, de fait, considérée comme une zone de dangers extrême du fait de la dissipation d'énergie qu'occasionnerait l'apparition d'une brèche.

En arrière des brèches historiques connues sur la Loire, on constate la présence de fosses d'érosion d'une étendue et d'une profondeur telles que la résistance d'un bâtiment, même solide, est improbable (exemples sur les levées de la Loire à Saint-Denis-en-Val et à Amboise). Le risque de destruction totale des bâtiments situés dans cette zone est élevé et la présence d'un étage au-dessus du niveau d'eau ne garantit pas la sécurité des occupants. Le danger dans cette zone de dissipation d'énergie peut donc atteindre les étages supérieurs d'un bâtiment par destruction totale de celui-ci (Études de dangers des

digues de classe A de la Loire et de ses affluents : études des brèches historiques, DREAL Centre, 2013).

## **5.2. Surverse sans brèche au-dessus de la crête d'un tronçon de la digue**

Les surverses sans brèche représentent un danger "relativement" faible au regard de la situation précédemment décrite. En effet, l'écoulement se trouve limité à la lame d'eau dépassant la crête de l'ouvrage et s'apparente à un « simple » débordement de cours d'eau vers la zone protégée.

Cependant, il est courant qu'une telle situation évolue rapidement vers la création d'une brèche totale ou partielle du fait de l'action érosive des écoulements sur l'ouvrage et son pied côté zone protégée, a fortiori si l'ouvrage n'est pas conçu pour être résistant à la surverse (cas des digues en terre notamment). Dans ce cas, le scénario deviendrait celui de la brèche, décrit dans le paragraphe 5.1.

## **5.3. Entrée d'eau par les canalisations traversant la digue**

La digue de Bertignolles est traversée par 4 ouvrages traversants permettant de rejeter les eaux pluviales vers la Loire. Trois de ces ouvrages sont munis de clapets anti-retours. Ceux-ci pourraient toutefois être défaillants (cf. §3.1.6.3 en page 53).

Pour autant, les débits en cause en cas d'absence ou de non fermeture des clapets anti-retour restent faibles et limités par la capacité de la canalisation. Ce phénomène peut avoir des conséquences localement importantes, mais qui restent limitées à l'échelle des autres potentiels de dangers.

## **5.4. Remontée de nappe dans le val en arrière de la digue**

La nappe d'accompagnement de la Loire a tendance à suivre les évolutions du niveau du fleuve en cas de crue de celui-ci. Il peut être observé des remontées au-dessus du niveau du terrain naturel, en particulier dans les zones basses et où la perméabilité du sous-sol est importante. Selon la carte des remontées de nappe du BRGM, la zone protégée du val de Véron a une sensibilité variable à ce phénomène (de sensibilité très faible à zone de nappe sub-affleurante selon les secteurs).

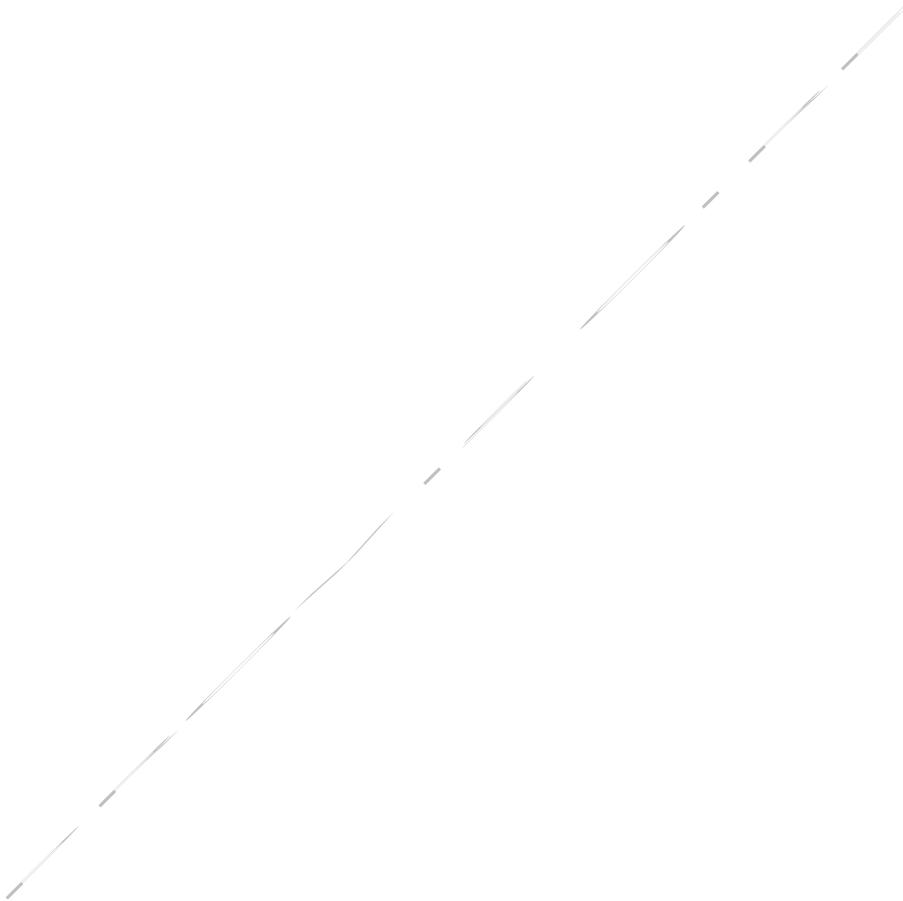
Ce type d'inondation est difficilement quantifiable. Il s'agit toutefois de phénomènes relativement lents, et dont les conséquences sont a priori limitées aux parties basses de la zone protégée. Les hauteurs d'eau et vitesses attendues restent limitées. On peut noter que l'on observe souvent un décalage entre le pic de la crue fluviale et le phénomène de remontée de nappe.

## 5.5. Inondation par ruissellement

La présence du système d'endiguement limite voire empêche l'évacuation des apports d'eau issus du val. Des fossés trouvent notamment leur exutoire en Loire via des ouvrages traversants le système d'endiguement du val de Véron.

En cas de pluie majeure, pouvant être ou non concomitante avec une crue de la Loire, des débordements peuvent survenir, générant des inondations dans la zone protégée.

Ce phénomène reste toutefois relativement limité au regard des caractéristiques et des temps de réponse des différents bassins versants en jeu.



## 6. Caractérisation des aléas naturels

### 6.1. Hydrologie : crues de la Loire

#### 6.1.1. Présentation générale du bassin versant – genèse des crues

La Loire draine respectivement un bassin versant de l'ordre de 56 480 km<sup>2</sup> à Langeais et de 81 200 km<sup>2</sup> à Saumur correspondant à une partie du bassin versant de la Loire Moyenne. Le secteur d'étude est par ailleurs situé entre la confluence de la Loire avec l'Indre en amont et la Vienne en aval. Ces affluents en rive gauche de la Loire représentent 5 % et 30 % de la surface du bassin versant de la Loire au niveau de leur confluence respective.

Le 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 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.

Les crues cévenoles 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 hauts 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 très rapidement, mais parfois, comme en 1907, si le front orageux remonte à l'intérieur du bassin, les crues acquièrent suffisamment de puissance pour se propager en Loire moyenne. La dernière crue cévenole ayant engendré des dégâts très importants date de septembre 1980. Elle a été provoquée par des cumuls de pluies dépassant les 600 mm en 24h. Une vitesse de montée des eaux de 6 cm par minute a été enregistrée à Brive-Charensac.

Les crues océaniques ont lieu surtout en hiver et au printemps. Elles sont provoquées par des fronts pluvieux venant de l'océan Atlantique. D'importance très variable, elles affectent l'ensemble du bassin versant. Les reliefs, notamment ceux du Morvan, jouent un rôle important dans la répartition des précipitations et de leur cumul. Ces crues sont plus marquées sur l'aval du bassin versant de la Loire.

Les crues mixtes naissent de la conjonction, 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 de la Loire, de l'Allier et de leurs affluents. C'est à ce type de crue qu'appartiennent les crues de 1846, 1856 et 1866.

### 6.1.2. Crues historiques

La plus forte crue connue sur le secteur d'étude est celle du 3 juin 1856, avec une hauteur d'eau à l'échelle de Port-Boulet de 6,25 m (zéro de l'échelle à 29,53 m NGF). Plus récemment, la crue de décembre 2003 a atteint un débit de 3 180 m<sup>3</sup>/s à Langeais.

Crues	Port Boulet		Langeais	
	Hauteur à l'échelle (m)	Occurrence associée	Hauteur à l'échelle (m)	Occurrence associée
Octobre 1846	5,85	T < 50 ans	6,30	70 ans < T < 100 ans
Juin 1856	6,25	70 ans < T < 100 ans	6,65	T ≈ 200 ans
Septembre 1866	6,10	50 ans < T < 70 ans	6,80	170 ans < T < 200 ans

Tableau 25 : Crues de la Loire à Port-Boulet et à Langeais

### 6.1.3. Influence du barrage de Villerest sur l'hydrologie de la Loire à Langeais

Le barrage de Villerest, mis en service en 1985, est propriété de l'Établissement Public Loire (EP Loire) et est géré par la société BRL Exploitation.

Selon l'EP Loire, l'effet théorique du barrage de Villerest attendu sur les crues de la Loire en aval immédiat est le suivant :

- le barrage n'intervient pas pour des crues inférieures à 1 000 m<sup>3</sup>/s,
- les crues comprises entre 1 000 m<sup>3</sup>/s et 2 000 m<sup>3</sup>/s sont écrêtées à 1 000 m<sup>3</sup>/s,
- les crues comprises entre 2 000 m<sup>3</sup>/s et 4 000 m<sup>3</sup>/s sont écrêtées de moitié,
- les crues supérieures à 4 000 m<sup>3</sup>/s sont écrêtées de 2 000 m<sup>3</sup>/s.

Au niveau du Bec d'Allier, lors de crues de fréquences très rares, l'ouvrage peut générer un écrêtement de 1 000 m<sup>3</sup>/s dans les conditions les plus favorables.

### 6.1.4. Détermination des débits de pointe pour les différentes crues de référence

L'hydrologie de la Loire au Bec d'Allier est définie par l'étude "Loire Moyenne" menée par l'équipe pluridisciplinaire PLGN en 2001 et complétée par une expertise hydrologique réalisée en 2011 (Hydro Expertise). Les hydrogrammes de référence sont définis au Bec d'Allier et propagés dans le modèle hydraulique LRPC2, mis à disposition par la DREAL Centre - Val de Loire. La propagation entre le Bec d'Allier et le secteur d'étude fait l'hypothèse de surverses sans brèches sur tous les vals amont (hypothèse sécuritaire pour la présente EDD puisqu'elle n'intègre pas l'éventuel effet d'amortissement de la crue suite à une brèche sur les vals amont).

Les hydrogrammes retenus intègrent un écrêtement par le barrage de Villerest de 1 000 m<sup>3</sup>/s sur le débit de pointe au bec d'Allier.

Les 4 crues étudiées dans le cadre de la présente étude de dangers sont présentées dans le tableau ci-dessous. Elles correspondent aux scénarios issus de l'étude Loire Moyenne.

Période de retour	Débit de pointe (m <sup>3</sup> /s)		Cote maximale à Saumur (m NGF)
	Loire à Langeais	Vienne à Chinon	
2 ans	2 720	780	27.60
5 ans	3 565	990	28.46
10 ans	4 015	1 135	28.91
20 ans	4 680	1 260	29.46

**Tableau 26 : Crues étudiées dans le cadre de l'étude de dangers du val de Véron**

#### 6.1.5. Influence de la rupture du barrage de Villerest

Le barrage de Villerest est le principal ouvrage pour lequel une rupture accidentelle pourrait avoir un impact sur l'hydrologie du fleuve au droit du val de Véron.

Le risque de rupture du barrage de Villerest a été étudié par EDF en 1974 (EDF LNH, 1974), puis révisé en 2001 par ISL (ISL, 2001) pour le compte de l'Établissement Public Loire (les études liées au barrage de Villerest intègrent la défaillance du barrage de Grangent en amont de celui-ci). Le linéaire de cette étude n'intègre cependant pas le val de Véron. Les résultats à Nevers, situé environ 300 km en amont du secteur d'étude, sont ainsi présentés.

L'objectif de ces études a été de déterminer l'hydrogramme provoqué par la rupture de l'ouvrage et les conditions de propagation de l'onde de crue qui lui est associée 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) et dans le cas d'une rupture lors d'une crue forte, de type 1846. Ils ont été réalisés depuis la retenue jusqu'en aval de la confluence avec l'Allier, et permettent ainsi de caractériser l'impact de la rupture de Villerest sur l'hydrologie en Loire moyenne.

L'étude conclut que l'onde de rupture sur front sec se propage en 18 h entre Villerest et Nevers, soit une vitesse moyenne de 8,7 m/s. Le maximum de l'onde arrive à Nevers en 36 h. Le débit de pointe à Nevers est d'environ 4 100 m<sup>3</sup>/s.

Dans le cas d'une onde de rupture sur front humide (crue de type 1846), les temps de propagation de l'onde de crue et de l'onde de rupture sont difficilement distinguables après plusieurs kilomètres. La vitesse de propagation de la pointe est augmentée et le maximum est atteint à Nevers en 27 h au lieu de 36 h sur front sec.

Une telle rupture du barrage de Villerest est cependant très improbable. Il a été conçu de façon à résister à la crue de temps de retour théorique 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.

La probabilité de rupture du barrage de Villerest est donc plus faible qu'une crue de même ampleur et largement inférieure aux probabilités de rupture de la digue de Bertignolles. La rupture de ce barrage n'a donc pas été prise en compte spécifiquement dans la présente étude de dangers.

## 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  $-70^{\circ}\text{C}$  :

$$\sum T(j) = -70^{\circ}\text{C}$$

Dans le cadre des études de dangers des digues de la Loire de classe A, une étude particulière<sup>10</sup> sur ce thème a été confiée à Zbigniew Gasowski du bureau d'études Hydro Expertise.

La caractérisation du phénomène d'embâcle de glace sur le secteur du val de Véron se base sur cette étude.

L'étude sur les embâcles de glace montre que ce phénomène, depuis le XV<sup>ème</sup> siècle, se reproduit en Loire moyenne 6 à 8 fois par siècle sans destruction et 1 fois par siècle avec destruction.

Ce phénomène apparaît donc relativement fréquemment. Les derniers exemples récents datent de 1985, 1986 et 1987 où des embâcles importants se sont formés en Loire moyenne. On pourra noter cependant qu'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 (ensoleillement notamment).

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.

Ce phénomène dangereux reste difficilement quantifiable. Les paragraphes ci-après décrivent les conséquences de ce phénomène, qu'il conviendra de garder en mémoire lors de l'analyse des risques de défaillance de la levée de Bertignolles.

Par ailleurs, si la Loire moyenne a fait l'objet d'une étude spécifique sur ce sujet, ce n'est pas le cas de la Vienne sur laquelle la connaissance de ce phénomène est très réduite. L'analyse des textes d'archives n'a pas fait remonter la présence d'embâcles de glace au niveau de la confluence avec la Loire lors des crues historiques.

<sup>10</sup> Glaces et embâcles-Risques associés, préconisations-Conséquences du changement climatique. Rapport 08-21-10-v2a-Hydro Expertise, Mai 2011.

### 6.2.1. Conséquences hydrauliques

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 deuxième 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 remontées importantes du niveau d'eau, ce qui peut mettre les digues en charge, voire provoquer des surverses.

### 6.2.2. Conséquences morphodynamiques

Le phénomène général d'embâcle se superpose surtout avec des phénomènes locaux beaucoup plus prégnants. 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 digues.

### 6.2.3. Conséquences mécaniques

L'embâcle et les accumulations de glace induisent des forces considérables qui peuvent provoquer des dégâts sur les ouvrages de protection contre les inondations. Les glaces 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-retours ou les prises d'eau.

## 6.3. Impact du changement climatique

Dans le cadre des études de dangers des digues de la Loire de classe A, une étude particulière<sup>11</sup> visant à analyser les conséquences potentielles du changement climatique

<sup>11</sup> Étude des dangers des digues de classe « A » de la Loire. Incidence du changement climatique. Rapport 08-21-11-v2a. Hydro Expertise, mai 2011.

sur les phénomènes de crues a été confiée à Zbigniew Gasowski du bureau d'études Hydro Expertise.

La caractérisation de l'impact du changement climatique sur la levée de Bertignolles se base sur cette étude.

L'analyse ne met pas en évidence de preuves formelles 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.

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

En conclusion, si aucun indice ne permet aujourd'hui de prévoir si l'influence du changement climatique aura des conséquences sur les crues de la Loire, et a fortiori de la Vienne, 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 phénomènes 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.

Ces conclusions peuvent être étendues à la Vienne, dont les crues les plus fortes sont également des crues mixtes, couplant une forte pluie centrée sur le bassin amont puis une pluie océanique en aval. Comme sur la Loire moyenne, le changement climatique aurait donc tendance à aggraver la probabilité de crues fortes.

La surveillance des évolutions éventuelles est développée dans le chapitre 9 de l'étude de dangers « Étude de réduction des risques ».

## 6.4. Géologie et morphodynamique

### 6.4.1. *Géologie et morphologie de la Loire de Roanne au Bec de Maine (approche globale)*

Dans le cadre des études de dangers des digues de la Loire de classe A, une étude géologique et morphologique de la Loire a été menée par le Laboratoire Régional de Blois entre Roanne et Angers.

Il apparaît qu'à l'échelle des temps géologiques, le cours de la Loire est d'origine relativement récente. Il fait suite aux derniers mouvements tectoniques qui l'ont détourné vers l'ouest, lui donnant dans le même temps la capacité de capter les écoulements venant du nord-ouest du Massif central (Vienne...) et son débouché sur l'Atlantique.

Le lit de la Loire s'étend sur des formations alluviales plus ou moins anciennes à dominante sablo-graveleuse mais pouvant comporter des niveaux d'argiles. La mise en place de ces formations se rapporte au Würm et sans doute une partie post-glacière. La tranche superficielle des alluvions est généralement plus silteuse (sables-silteux : produit de dépôts marécageux). Les déplacements successifs de la Loire et les aménagements récents intéressent essentiellement cette tranche ayant eu pour conséquence le colmatage des anciens méandres et la construction des digues au moyen de ce même type de matériaux fins. Ces derniers reposent sur des alluvions plus grossières (graves-sableuses) de perméabilité élevée. Les alluvions s'accumulent sur une dizaine de mètres et reposent sur un substratum argileux compact plus ou moins sableux et parfois marneux datant de l'Oligocène. Cette dernière formation peut s'accompagner de structures colluvionnaires argileuses pouvant être rencontrées en intercalation entre les formations Oligocène et les alluvions plus récentes sur quelques mètres.

### 6.4.2. *Dynamique morphologique de la Loire dans le secteur du val de Véron (approche locale)*

#### 6.4.2.1. Dynamique générale

Depuis environ 150 ans, la Loire connaît une dynamique d'enfoncement généralisé de son lit, expliquée par différents facteurs :

- l'apport en débit solide est réduit du fait de l'absence de grandes crues depuis le milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle. Il y a en effet une réduction de l'activité hydrologique depuis la fin du petit âge glaciaire qui impacte la dynamique fluviale mais pas uniquement en terme de transport de la charge grossière,
- durant le XX<sup>ème</sup> siècle, plusieurs ouvrages hydroélectriques ont été construits sur le cours de la Loire, piégeant les sédiments dans leurs retenues et causant ainsi un déficit de matériaux en aval,
- le lit mineur de la Loire sur l'ensemble de son linéaire a connu une extraction massive de matériaux alluvionnaires, supérieures aux apports, notamment durant la seconde moitié du XX<sup>ème</sup> siècle,

- les protections de berges se sont multipliées, diminuant ainsi l'action érosive sur les berges pour la reporter sur le fond du lit.

#### 6.4.2.2. Dynamique locale

D'un point de vue macroscopique, la levée de Bertignolles se situe au niveau d'un intrados du chenal du lit mineur de la Loire.

L'enfoncement global du lit de la Loire, que l'on constate aujourd'hui, a tendance à canaliser le fleuve dans son bras principal en fermant les bras secondaires et en favorisant le développement des îles.

Ce phénomène s'accompagne d'un développement de la végétation ligneuse sur les îles, alors qu'elles se présentaient auparavant sous la forme de larges bancs de sables découverts. En effet, le mécanisme d'incision du lit a provoqué une exondation plus fréquente et plus longue des bancs de sable et chenaux secondaires. La végétation a ainsi pu s'y développer et s'y densifier, ralentissant le courant. Cette diminution des vitesses d'écoulement a favorisé le dépôt de sédiments, ce qui a encore amplifié le processus.

La présence de la digue de Bertignolles limite en partie les possibilités d'évolution en plan de la Loire. Néanmoins, l'observation de l'évolution du lit mineur permet de constater une mobilité toujours active de ce dernier.

Les paragraphes qui suivent visent à illustrer quantitativement sur le secteur d'étude ces dynamiques d'évolution morphologique de la Loire.

#### 6.4.2.3. Évolution du transport sédimentaire : dépôts, érosion, îles, etc.

L'analyse conjointe des cartes manuscrites de 1850, des photographies aériennes de 1956 et des orthophotoplans de 2011 a permis de repérer en plan les zones d'érosion et les zones d'engrèvement de berges et d'îles. Cette analyse a été menée sur les périodes de 1850 à 1956 et de 1956 à 2011 afin d'apprécier au mieux les évolutions successives du lit mineur de la Loire.

Les figures suivantes illustrent les zones de dépôt de sédiments et les zones d'érosion observées sur les deux périodes.

De façon globale, des zones de dépôt en rive gauche (intrados) et des zones d'érosion en rive droite (extrados) sont visibles sur le linéaire de la Loire notamment sur la période allant de 1850 à 1956.

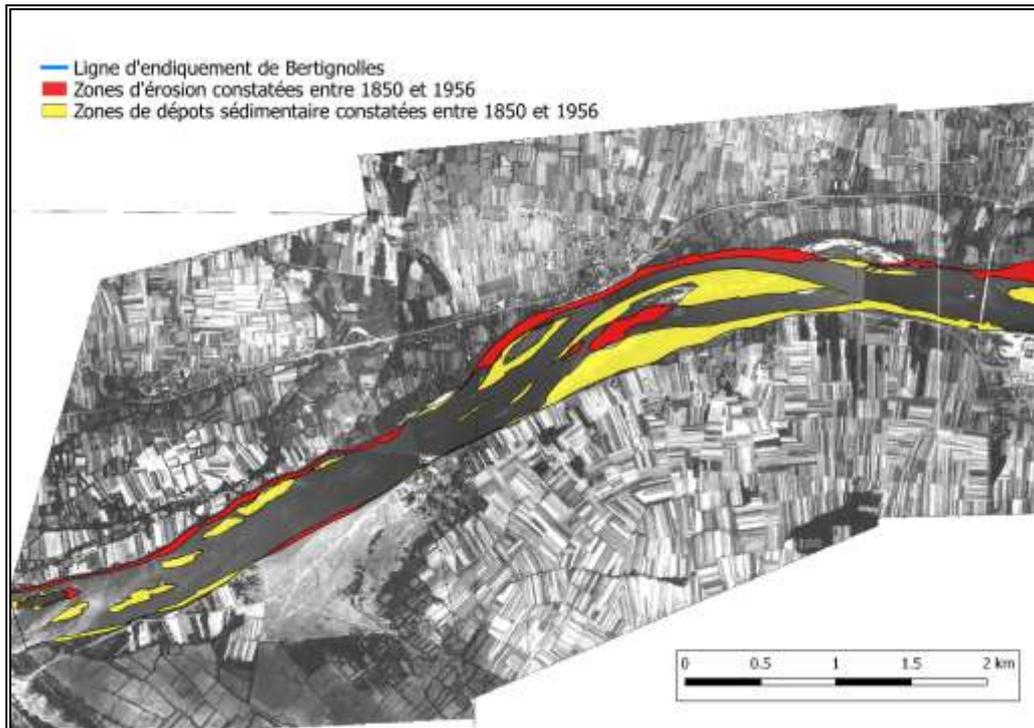


Figure 44 : Identification des zones de dépôt sédimentaire et d'érosion de 1850 à 1956 sur le secteur d'étude sur le fond des photographies aériennes de 1956 - (source : Antea Group)

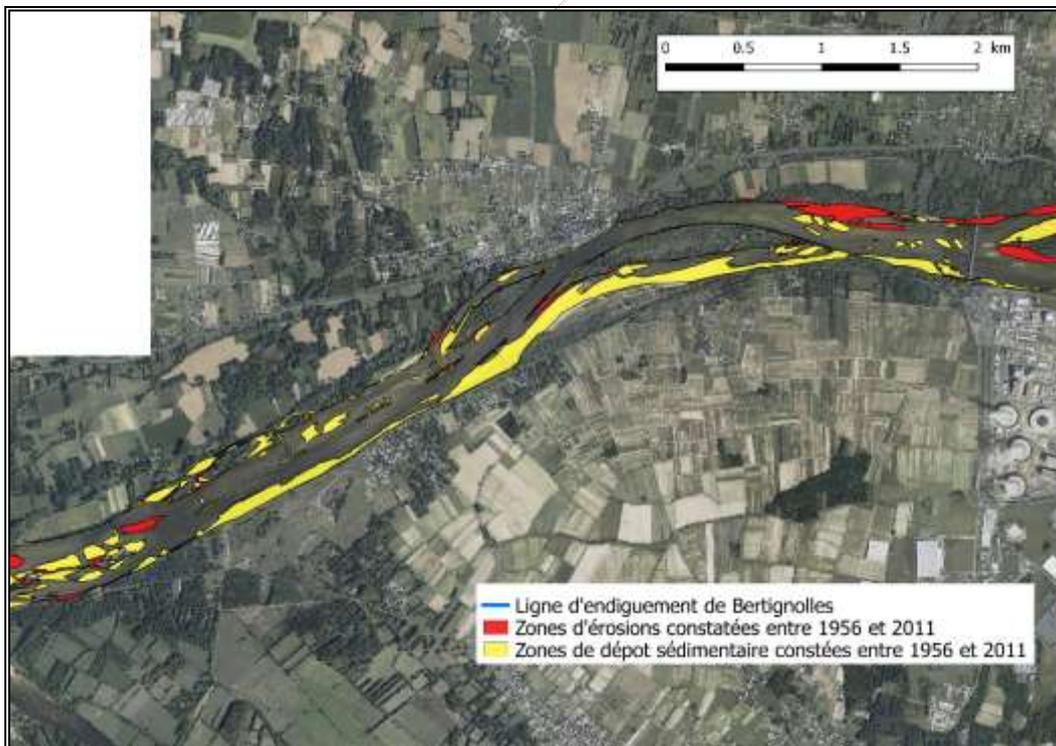


Figure 45\* : Identification des zones de dépôt sédimentaire et d'érosion de 1956 à 2011 sur le secteur d'étude sur le fond des orthophotoplans de 2011 (source : Antea Group)

Le bilan surfacique des zones érodées et des zones de dépôt est présenté dans le Tableau 27 ci-dessous :

Période observée	Phénomène d'érosion	Phénomène de dépôt sédimentaire
	Surface	Surface
Entre 1850 et 1956	42 ha	82 ha
Entre 1956 et 2011	24 ha	75 ha

**Tableau 27 : Bilan surfacique des phénomènes de dépôt et d'érosion**

Le découpage temporel retenu permet d'observer que les phénomènes de dépôt sédimentaire et d'érosion ont été plus marqués sur la période allant de 1850 à 1956. Le phénomène de dépôt sédimentaire est resté quant à lui relativement stable sur les deux périodes étudiées.

De façon globale, la diminution de la largeur de la bande active (par engraissement de l'emprise des bancs, îles et ilots) le long du val de Véron semble prépondérante. Néanmoins, les phénomènes d'érosion du fond du lit mineur ainsi que de dépôt sédimentaire ne sont pas entièrement retranscrits par ce bilan surfacique.

#### 6.4.2.4. Évolution de la végétation

Le phénomène de pérennisation de la végétalisation ligneuse sur les bancs de sable présenté précédemment est confirmé le long du val de Véron, où la végétation s'est développée sur l'ensemble du linéaire d'étude sur les 50 dernières années.

Il est à noter que la végétation s'est principalement développée au niveau des bancs de sable, des îlots et des rives convexes des méandres qui ont été générées par les évolutions du lit mineur de la Loire entre 1956 et 2011.

Les figures suivantes montrent un développement important de la végétation dans le lit mineur de la Loire entre 1956 et 2011. On note notamment une réduction conséquente de la largeur du lit vif sur certaines zones.

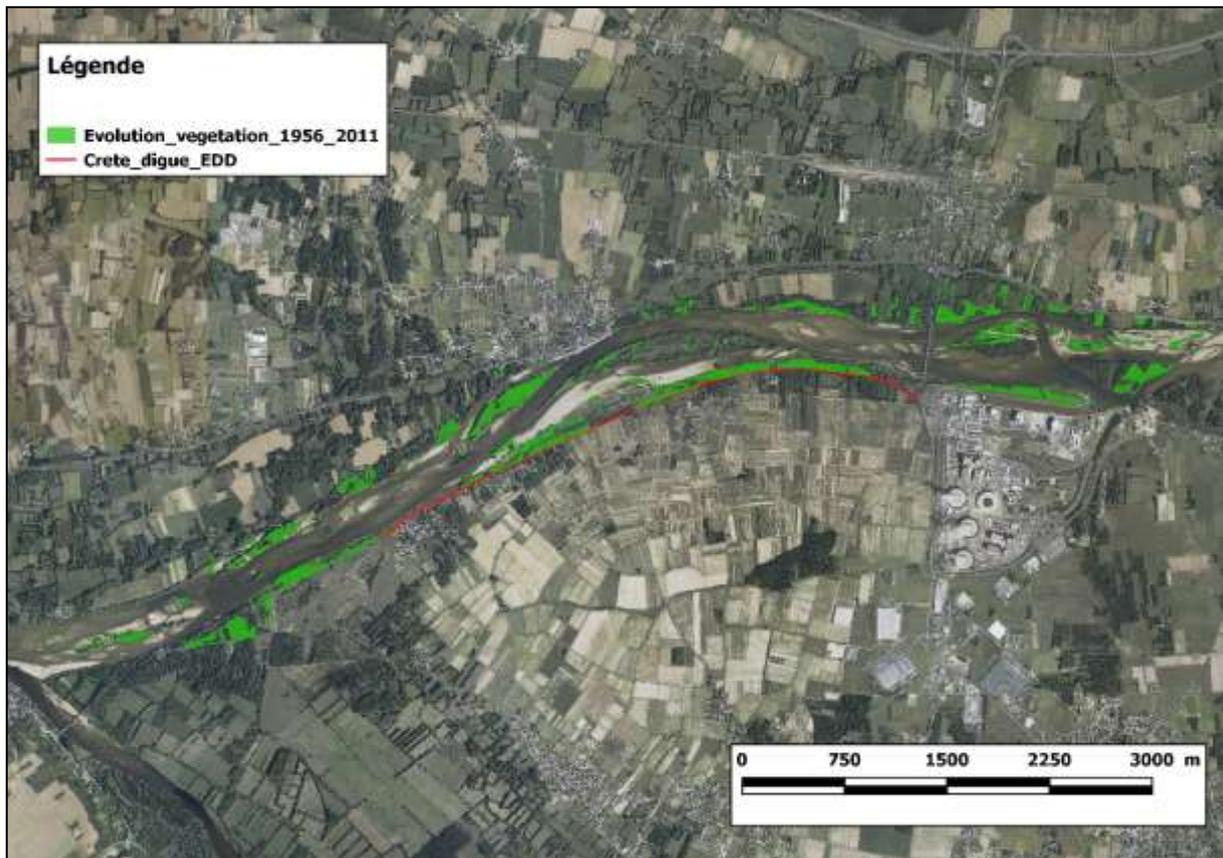


Figure 46\* : Mise en évidence des zones de développement de la végétation entre 1956 et 2011  
(source : Antea Group)

#### 6.4.3. Conséquences sur la levée

La dynamique morphologique de la Loire peut constituer une menace pour la digue de Bertignolles du fait de plusieurs phénomènes liés à l'enfoncement généralisé du lit :

- le développement important de la végétation sur les îles et berges à tendance à freiner les écoulements en crue et conduit par conséquent à rehausser la ligne d'eau, augmentant la sollicitation des digues,
- la levée, lors de sa construction, a été fondée sur les terrains en place, alors que le niveau du lit de la Loire n'avait pas encore connu de baisse importante. Aujourd'hui, sa fondation peut se retrouver à une cote supérieure au fond du lit, laissant les matériaux d'assise de la digue sans protection au regard des agressions du fleuve.

Une érosion externe par affouillement du pied de la digue est donc théoriquement rendue possible par la dynamique générale de la Loire. Sur certains secteurs, le risque de déstabilisation du talus côté Loire est toutefois limité par la largeur relativement importante du franc-bord. A contrario, certaines zones où cette largeur est limitée présentent une sensibilité potentiellement plus importante à ce phénomène (cf. § 3.2.1.2).

A noter dans le cas présent que sur les 50 dernières années, des dépôts ont eu lieu en rive gauche à proximité de la levée.

## 6.5. Aléa sismique

Les séismes peuvent avoir des effets sur une digue. L'aléa sismique au droit de la levée de Bertignolles a été appréhendé grâce aux informations fournies par le zonage sismique en France présent sur le site internet <http://www.planseisme.fr/>.

D'après la carte du zonage sismique en France, le val de Véron est situé dans le département d'Indre-et-Loire, il est donc classé en zone de sismicité faible (selon les décrets n° 2010-1254 et 2010-1255 du 22 octobre 2010).

La Figure 47 présente le zonage sismique sur le territoire Français.

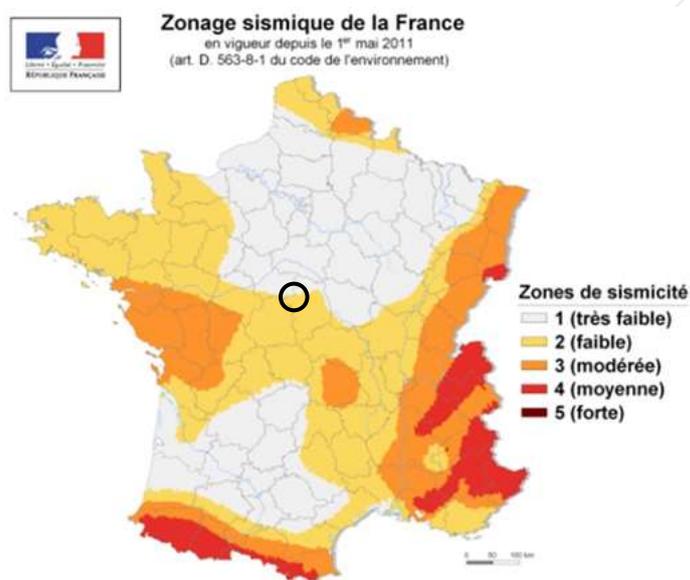


Figure 47 : Carte de la sismicité en France

Un séisme peut avoir un effet important sur une digue. Deux conditions sont à prendre en compte :

- la simultanéité d'un séisme et d'une crue,
- la survenue d'une crue après un séisme si les dégâts n'ont pas été réparés.

La première situation est la plus critique pour la digue, mais est a priori moins probable.

Les phénomènes à craindre sont :

- 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),
- 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.

Un séisme survenant pendant une crue rare cumulerait les effets de l'inondation et de la secousse sismique. Toutefois, la concomitance des deux événements est très improbable et largement inférieure aux probabilités de rupture des digues.

Le scénario séisme hors événement de crue 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, très hétérogène. Des protections telles que des perrés maçonnés (par exemple au niveau de la cale sur le talus côté Loire) sont sensibles à ce type de phénomène (fissuration/déstructuration).

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 (cf. chapitre 9 de l'étude de dangers).

## 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.

La caractérisation de l'aléa karstique au droit du val de Véron a été déterminée sur la base des informations fournies par un document du BRGM sur la présence de karts sous les levées domaniales du bassin de la Loire<sup>12</sup>.

D'après ce document, le risque karstique est identifié comme un risque d'importance nulle pour la levée de Bertignolles.

<sup>12</sup> Détermination de la présence de karsts sous les levées domaniales du bassin de la Loire et réduction du risque d'effondrement de la digue lié à la présence de ces conduits souterrains naturels- Tranche 1 : analyse géologique et hydrogéologique, BRGM/RP-55711-FR, BRGM, juin 2008.

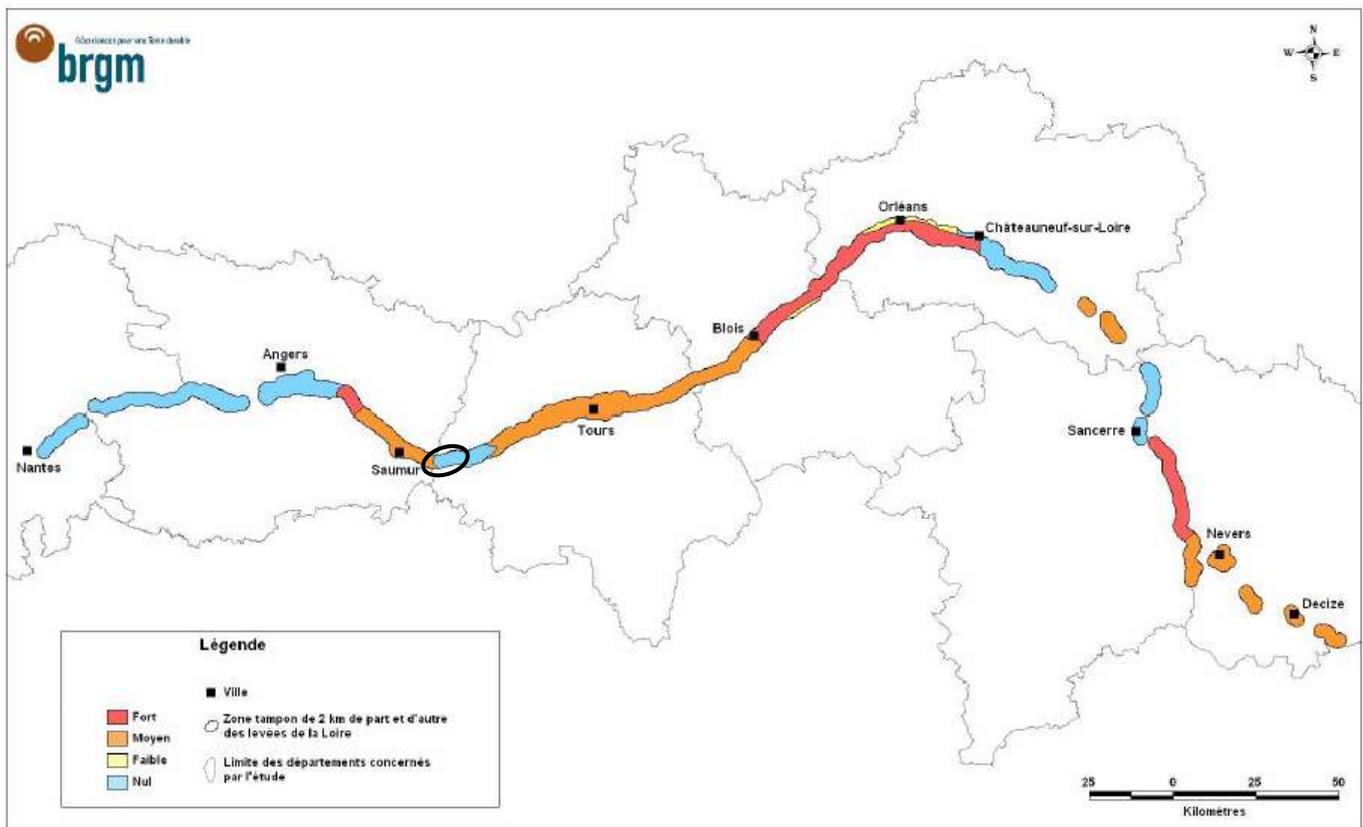


Figure 48 : Sensibilité à l'aléa karstique des levées de la Loire (source BRGM)

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.

Les événements récents (fin du XX<sup>ème</sup> siècle et début du XXI<sup>ème</sup> siècle, notamment dans le département du Loiret) ont alerté les gestionnaires (cf. § 7.1.3). Si le phénomène karstique est assez bien connu, son impact sur les digues reste mal appréhendé.

Pour mieux qualifier cet impact, trois axes de recherche ont été engagés :

- détection et localisation des karsts,
- connaissance des phénomènes de remontée de fontis dans la digue ou d'effondrement karstique et des scénarios de rupture de la digue,
- spécificités du cas de la Loire.

Les connaissances actuelles permettent d'affirmer que le phénomène de remontée de karst dans les digues peut prendre deux formes principales :

- une remontée de taille limitée, dite « remontée de bulle » : si la ponction des matériaux de l'horizon sablo-graveleux est limitée en volume, le vide de matériaux va se propager vers le haut par comblement du vide par les matériaux déstabilisés au-dessus. La progression peut être rapide dans les sols peu cohésifs et beaucoup plus lente dans les horizons argileux, comme le corps de digue. Ce

phénomène va décompacter les matériaux remobilisés mais aussi l'ensemble des matériaux adjacents en créant des fissurations et des arcs de décharge.

Les risques pour la levée, liés à ce phénomène, sont :

- l'érosion interne, par augmentation de la perméabilité des matériaux affectés,
- la surverse, car les matériaux ont tendance à se re-compacter et à engendrer un tassement général de la digue.

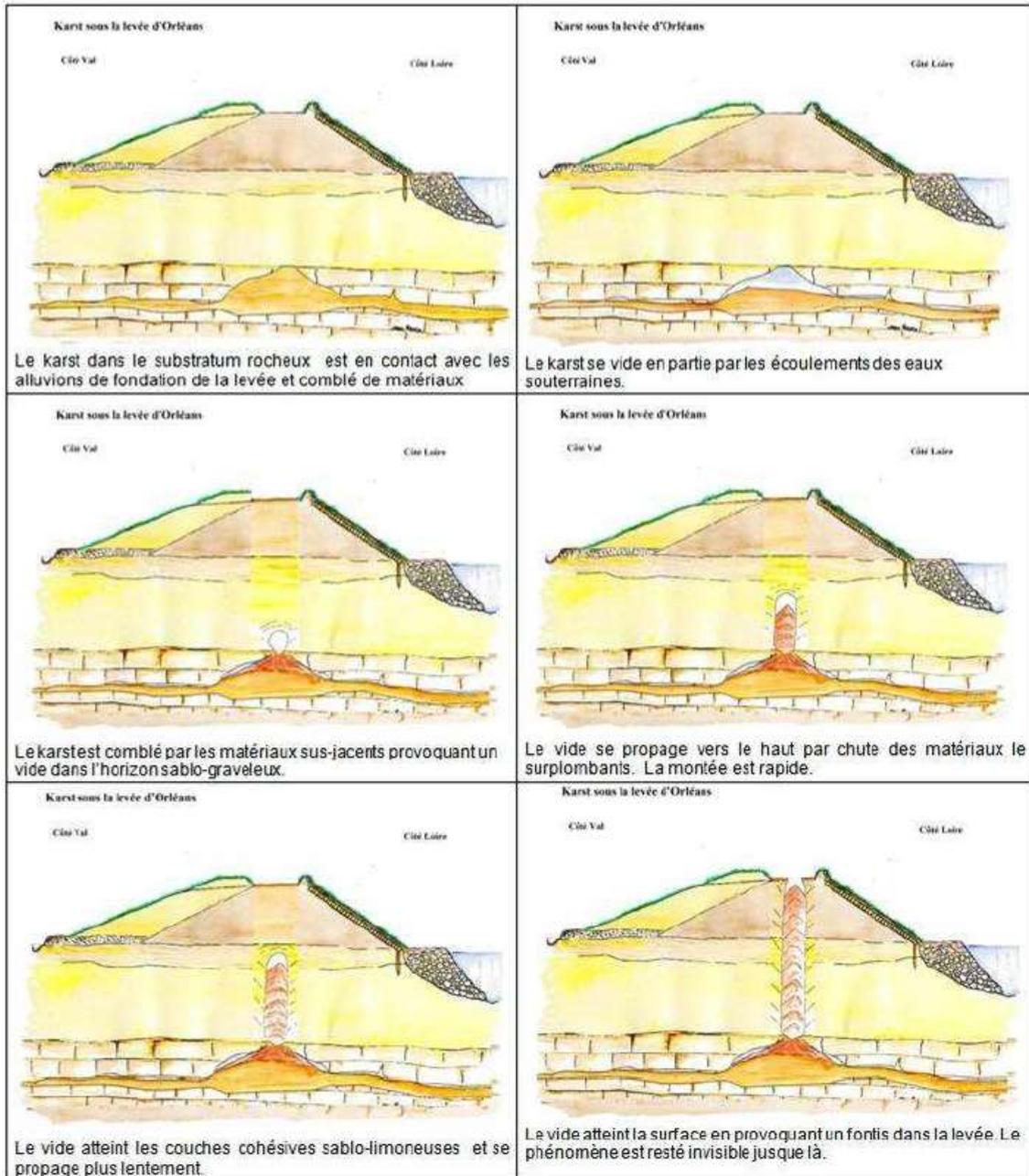
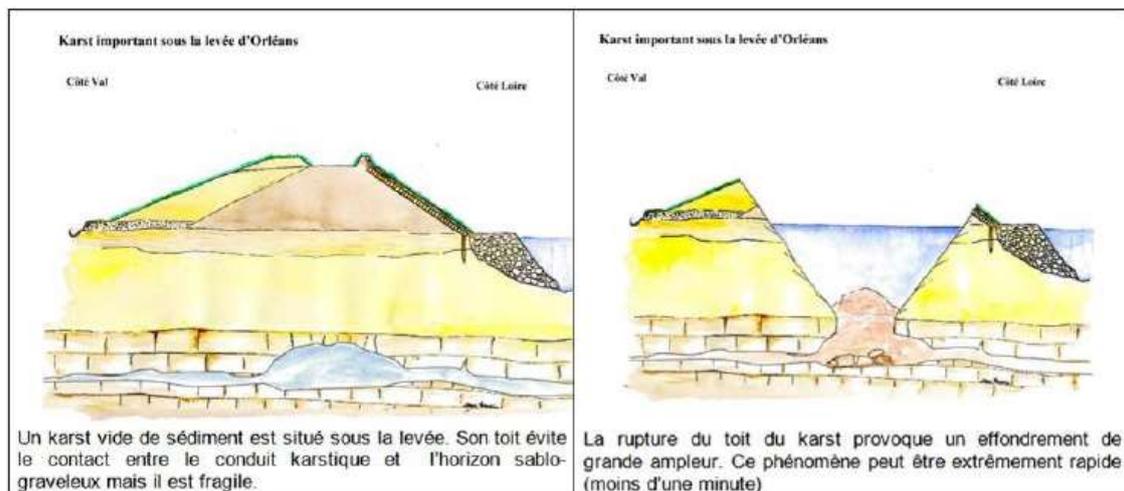


Figure 49 : Schémas de propagation d'un fontis de taille limitée (source : DREAL Centre)

- une remontée de taille importante, générée par l'effondrement d'une dalle ou d'une voûte dans le calcaire : elle peut alors remplir une salle karstique de grandes dimensions. Ce phénomène est susceptible d'effondrer la digue en quasi-totalité, ce qui provoque la disparition locale de celle-ci.

Le risque pour la levée, dans cette hypothèse, est l'apparition immédiate d'une brèche si l'événement se produit lors de la crue, ou juste avant.



**Figure 50 : Schémas d'un effondrement karstique (source : DREAL Centre)**

À la connaissance des rédacteurs de la présente étude de dangers, aucun fontis avéré n'a été repéré sur la levée de Bertignolles, ni lors des inspections de terrain réalisées par le CD37, ni lors de la Visite Technique Approfondie menée par Antea Group en novembre 2016.

Le risque d'apparition d'un effondrement général ou d'un fontis lors d'une crue n'est toutefois pas à exclure, car il est possible que ces deux événements soient liés.

Le mécanisme de rupture de la digue est évident en cas d'effondrement généralisé si le fontis est situé en dessous ou à quelques mètres de celle-ci.

Dans le cas d'une remontée de taille limitée, le mode de rupture sera plus complexe. Le phénomène de fontis n'est pas à lui seul susceptible de provoquer la rupture de la digue. Néanmoins, il est suffisamment déstabilisant pour générer une érosion interne de sa fondation qui, par un renard hydraulique, pourrait être à l'origine de sa rupture. Une autre hypothèse serait qu'un renard hydraulique puisse se produire entre le karst, dans lequel l'eau a quasiment la même charge que dans la Loire, et la base de la digue côté val (les pertes de charge dans le conduit karstique ouvert dans la Loire sont négligeables au regard de celles dans les matériaux). Si le renard en question ne serait pas capable a priori d'entraîner la rupture de la digue, un autre, venant de la Loire, pourrait par contre provoquer une brèche, et ce d'autant plus facilement que le fontis aurait déstabilisé l'ensemble de la fondation et de la digue en augmentant fortement la perméabilité des matériaux.

Compte tenu des connaissances et du niveau de la recherche dans le domaine, il est impossible de quantifier ce risque en termes de probabilité ni en termes de conséquences directes pour les levées. Il ne peut donc pas être pris en compte dans la présente étude. Il est abordé dans le chapitre 9 « Etude de réduction des risques » par le développement des connaissances et de la recherche.

## 6.7. Synthèse de la caractérisation des aléas naturels

Le Tableau 28 ci-dessous présente la synthèse des aléas naturels auxquels la digue de Bertignolles est soumise.

Aléa naturel	Qualification du risque pour les levées du secteur d'étude	Prise en compte dans l'étude de dangers	Caractérisation de l'aléa
Crue	Fort	Oui	Prise en compte d'une crue d'occurrence comprise entre 2 et 20 ans
Embâcle de glace	Fort	Non	La quantification n'est pas faisable dans l'état des connaissances actuelles Surveillance lors d'un évènement
Effondrement karstique	Nul	Non pas directement	Approche expérimentale en cours, les conséquences sont encore mal connues Surveillance de la levée
Évolutions morphologiques	Moyen	Oui	Prise en compte de risque d'érosion d'externe dans le calcul de l'aléa de rupture si le franc-bord est inférieur à 10 m Intégration de ce risque dans la surveillance de la digue
Séisme	Faible	Non	Intégration de ce risque dans la surveillance de la digue
Changement climatique	Non décelable	Non	Pourrait être approché en augmentant la probabilité de retour des crues mixtes et/ou sur la base de chroniques débitmétriques plus longues Intégration de ce risque dans la surveillance générale des évènements de crue

**Tableau 28 : Synthèse des aléas naturels pris en compte dans l'étude de dangers de la digue de Bertignolles**

## 7. Étude accidentologique et retour d'expérience

Depuis décembre 2003, le système d'endiguement du val du Véron n'a pas connu d'évènements susceptibles de le mettre réellement à l'épreuve.

En conséquence, les enseignements sont à rechercher dans les archives des crues historiques anciennes survenues au niveau du secteur d'étude, voire plus généralement à l'échelle de la Loire. On retiendra toutefois que le système de protection a évolué au fur et à mesure des crues de la Loire et de la Vienne, dans une volonté de protéger les populations exposées.

L'ensemble des informations historiques ayant pu être collectées sur la digue de Bertignolles sont présentées dans la note spécifique intitulée "Étude accidentologique", consultable en Annexe 11.

### 7.1. Événements récents

#### 7.1.1. Les évènements récents au droit du val du Véron – digue de Bertignolles

##### ❖ *Crues du XIX<sup>e</sup> siècle*

Dans un rapport du 11 mai 1867 de l'Ingénieur Ordinaire, ce dernier relate l'inondation d'octobre 1866 du village de Bertignolles par la crue de la Loire.

Lors de cette crue, les habitants se sont réfugiés sur la levée de Bertignolles pour échapper aux inondations. Le hameau de Bertignolles comptait alors 74 ménages, soit 214 habitants. La crue a emporté une grande partie de la levée. Cependant, aucune information concernant la localisation et le linéaire touché n'est disponible.

Cette crue a également eu pour effet de réduire considérablement le franc-bord. Ce dernier est passé de 30 - 60 m de largeur avant la crue à néant.

Suite à cet événement, la Loire sollicite au quotidien le pied de digue de Bertignolles. Il est même relaté le 1<sup>er</sup> mars 1867 dans une lettre du Maire de Savigny-en-Véron au sous-préfet de Chinon que la Loire a fait diminuer de 2 m la largeur de la digue en 2 mois. Ainsi, des travaux de confortement ont été demandés, sans savoir si cette demande a abouti.

Une première réclamation avait déjà été formulée en janvier 1861 par les habitants de Bertignolles pour la construction d'une digue circulaire insubmersible entourant le village.

En 1864, une nouvelle demande est formulée pour la réalisation d'un bourrelet submersible entre le pont de Port Boulet et le bac de Canver, situé à la confluence de la Vienne avec la Loire.

Les crues de 1872 et de 1897 ont causé des dégâts à la levée et au chemin de grande communication n° 17. Ces dégâts ne sont cependant pas détaillés.

### ❖ *Crues du XX<sup>e</sup> siècle*

Les effets des crues du XX<sup>e</sup> siècle sur la digue de Bertignolles et sa banquette sont peu détaillés. Ils sont évoqués via les différents projets d'exhaussement de la banquette de la digue de 1927-1928 et de 1979-1980 présentés dans le paragraphe 4.

Afin de justifier la demande d'exhaussement de la banquette en 1927, une analyse des crues ayant dépassé la hauteur de 4,5 m à l'échelle de Port-Boulet a été menée. L'ensemble de ces crues est listé dans le tableau ci-après.

Crues dépassant 4,5 m à l'échelle de Port Boulet					
Date	Hauteur à midi	Date	Hauteur à midi	Date	Hauteur à midi
16-17 janvier 1843	5,00	17 mars 1895	4,72	4 avril 1919	5,22
29 décembre 1854	4,50	3 novembre 1896	4,54	8 mars 1923	5,28
4 novembre 1855	4,81	8 février 1897	5,02	31 décembre 1923	5,38
4 juin 1856	5,88	25 mars 1901	4,70	2 janvier 1924	5,56
1er octobre 1866	6,26	4 avril 1902	5,06	31 décembre 1925	4,54
25 octobre 1872	5,12	22 février 1904	4,84	1er janvier 1926	4,50
17 mars 1876	4,58	25 novembre 1905	4,64	9 février 1926	4,64
4 janvier 1879	4,51	22 octobre 1907	5,31	23 mai 1926	5,20
13 janvier 1879	4,81	13 novembre 1910	4,95	15 mars 1927	5,10
13 février 1892	4,51	12 janvier 1912	4,56		
14 octobre 1893	4,50	29 décembre 1918	4,54		

**Tableau 29 : Synthèse des dates et niveaux des crues de la Loire ayant atteint ou dépassé la hauteur 4,50 m à l'échelle de Port-Boulet (source : Archives de Tours – S5288)**

Il convient de noter que les hauteurs d'eau relevées à midi ne traduisent pas le pic de crue de la Loire. Pour exemple, lors de la crue de 1856, le pic de crue à Port-Boulet a atteint une hauteur maximale de 6,25 m, alors qu'à midi il était de 5,88 m.

Dans le cadre des travaux de constitution d'une banquette de 1979-1980, il est évoqué que « la seule période de crue intéressante s'est située fin 1981 et début 1982 et qu'elle n'a pas occasionnée de dégâts dans la banquette » (rapport du C.T.P.E. à M le Chef de Subdivision), bien que la crue de 1982 ait engendré des surverses sur la digue (selon le rapport de visite du 16 mai 2013 du Service de Contrôle de Sécurité des Ouvrages Hydrauliques).

#### 7.1.2. *Les conséquences de la crue de 2003 sur d'autres levées de la 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 en cours. 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 51 : Levée de Beffes-Henry – réparations d'urgence lors de la crue de 2003**  
 (source : crédit photo DREAL Centre)

- deux brèches se sont produites sur des endiguements plus modestes que les levées domaniales de la Loire :
  - une brèche sur une digue en bordure de la Loire à Montrond-les-Bains, dans le département de la Loire (brèche de 20 mètres),
  - une brèche sur la digue de Mauboux en bordure de l'Allier, à Livry, dans le département de la Nièvre (digue de 2 m de hauteur, brèche de 40 m, fosse d'érosion de 50 m de diamètre, ce qui a causé la mort d'un troupeau de 130 bêtes),



**Figure 52 : Brèche dans la digue de Mauboux à Livry – crue de 2003**  
 (source : crédit photo DREAL Centre)

- sur l'ensemble du linéaire où les digues ont été en eau, il a été noté des remontées de nappe quasi-systématiques en arrière immédiat de la digue,
- les déversoirs de Passy, Léré et Saint-Martin-sur-Ocre 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 2003).



Figure 53 : Déversoir de Saint-Martin-sur-Ocre aujourd'hui et lors de la crue de décembre 2003 (source : Google Earth et crédit photo DREAL Centre)

### 7.1.3. Les incidents hors crue sur les autres levées de la Loire

Plusieurs ouvertures de fontis, vraisemblablement d'origine karstique, se sont produites dans la levée d'Orléans et celle de Bou ces dernières années. En 2010, l'effondrement total d'une maison s'est produit à 100 mètres d'une ancienne digue, à Saint-Pryvé-Saint-Mesmin en aval d'Orléans.



Figure 54 : Effondrement karstique sur la digue à Jargeau en 2009 et proche de la digue Saint-Pryvé-Saint-Mesmin en 2010 (source : crédit photo DREAL Centre)

Par ailleurs, la levée de Villandry (37) (digue de classe B en rive gauche du Cher) a connu en 2012 un glissement de la totalité du talus côté rivière, qui s'est produit alors que le

Cher était à l'étiage. Une fosse d'érosion de 1,5 à 2,0 mètres était présente en pied de levée et la pente du talus côté rivière était très forte, supérieure à 60%.

La stabilisation et le chargement de la base du glissement ont été réalisés en première urgence.

Cet événement illustre l'importance de traiter les affouillements en pied de levée en priorité, puisqu'ils sont capables d'entraîner un glissement partiel ou total de la levée en dehors des périodes de crues. Après le glissement, la levée est fragilisée et peut être en cas de crue l'objet d'érosion externe (puisque le perré a été détruit) et d'érosion interne (la levée ayant été amputée d'une partie de sa largeur).

Cet exemple met également en évidence l'importance de la présence de chemins de service en pied de levée, indispensables pour entretenir mais aussi pour intervenir en urgence sur une défaillance.



Figure 55 : Glissement de la levée de Villandry en octobre 2012  
(source : crédit photo DREAL Centre)

## 7.2. Crues historiques

Le tableau suivant présente la liste des principales crues historiques de la Loire observées à Langeais et à Saumur.

Crues	Cote à l'échelle de Langeais (m)	Cote à l'échelle de Saumur (m)	Crues	Cote à l'échelle de Langeais (m)	Cote à l'échelle de Saumur (m)
Novembre 1790		6,00	Janvier 1924	5,38	
Février 1823		6,06	Mai 1926	5,08	
Décembre 1825		5,98	Mars 1927	4,80	
Juin 1835		5,01	Avril 1932	5,01	
Février 1841		4,79	Mai 1940	5,01	
Janvier 1843	4,85	6,70	Janvier 1941	4,91	
Mars 1845	4,71		Décembre 1944	5,21	
Octobre 1846	6,30	6,01	Févier 1945	4,66	
Avril 1847	4,76		Décembre 1952	5,05	
Octobre 1855	4,99		Mars 1957	5,05	
Juin 1856	6,65	7,00	Décembre 1968	5,22	
Septembre 1866	6,80	6,88	Janvier 1969	5,01	
Octobre 1872	5,24	5,22	Mars 1970	4,88	
Octobre 1893		4,04	Juin 1977	4,76	
Mars 1895	4,71	4,27	Décembre 1981	4,85	
Févier 1897	4,66	5,80	Janvier 1982	5,56	6,05
Mars 1901	4,54		Mai 1983	4,66	
Avril 1902	4,88		Mai 1985	4,66	
Février 1904		5,95	Mars 1988	4,76	
Octobre 1907	5,35	5,25	Janvier 1994		5,36
Décembre 1910	4,99	6,40	Mai 2001	4,54	
Avril 1919	4,91	6,14	Décembre 2003	4,19	3,75
Mars 1923	5,09	6,22			

**Tableau 30 : Principales crues historiques de la Loire observées à Langeais et à Saumur**

L'altitude du zéro de l'échelle limnimétrique de Langeais est de 36,37 m NGF et celui de l'échelle limnimétrique de Saumur est de 24,12 m NGF.

### 7.3. Étude des brèches historiques

L'étude accidentologique a montré que peu d'informations sont disponibles sur les brèches survenues sur la digue de Bertignolles.

Hormis pour la crue de 1866 durant laquelle la levée a été emportée en partie, sans que la localisation et le linéaire d'une éventuelle brèche ne soit explicitée, aucune brèche n'est mentionnée dans les archives.

Les enseignements sur les brèches sont ainsi à rechercher dans les autres systèmes d'endiguement, et notamment sur les systèmes d'endiguement environnants.

#### 7.4. Enseignement des autres brèches sur les levées de la Loire

L'Étude de dangers de la levée d'Orléans a permis de définir les principales données de la brèche de Jargeau, en 1856. Les informations hydrologiques et historiques sur cette brèche, relevées lors de l'événement, ont permis de reconstituer l'hydrogramme du débit d'eau qui a traversé la brèche ainsi que la propagation de l'onde de submersion dans le val d'Orléans.

Les caractéristiques principales de l'hydrogramme de brèche de Jargeau sont les suivantes :

- débit de pointe de 2 400 m<sup>3</sup>/s,
- volume total d'eau traversant la brèche proche de 300 Mm<sup>3</sup>.

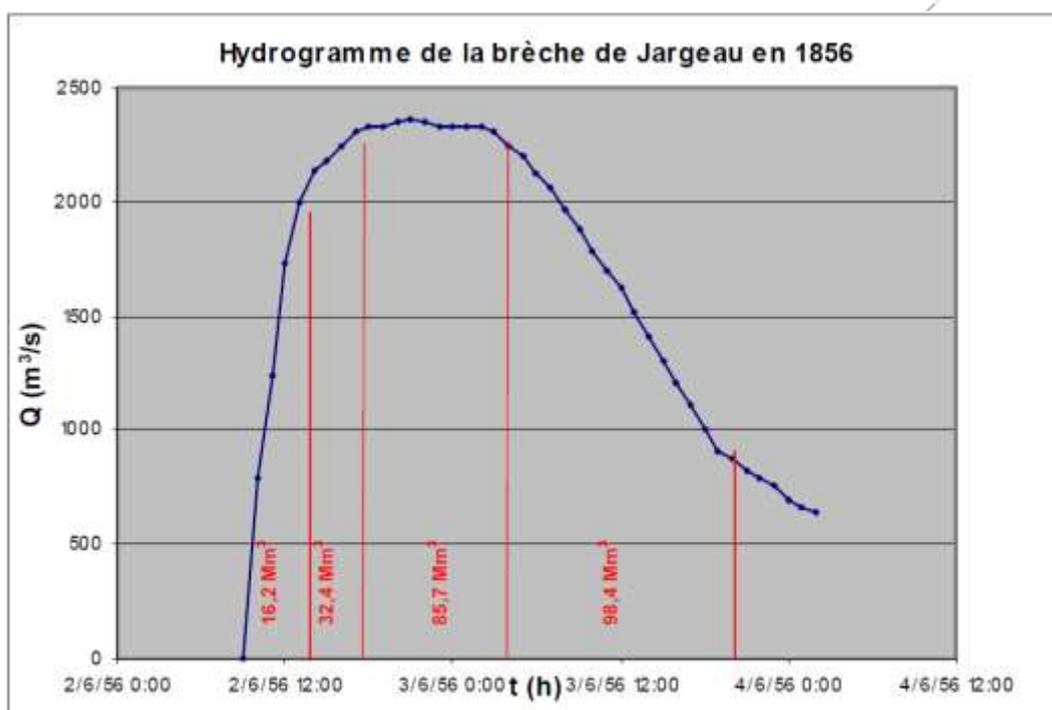


Figure 56 : Reconstitution de l'hydrogramme de la brèche de Jargeau  
 - volume total de 270 Mm<sup>3</sup> (source : DREAL Centre)

Trois études générales portant sur les 500 km de levées de la Loire moyenne permettent également de tirer d'autres enseignements utiles pour la digue de Bertignolles :

- l'Étude des brèches des levées de la Loire, réalisée par le Laboratoire Régional de Blois,
- l'étude Approche géomorphologique des brèches dans les levées de la Loire réalisée par William Halbecq (HALBECQ, 1996) qui analyse la localisation, la répartition des brèches et précise les causes de formation, les facteurs déclenchant la rupture et les facteurs aggravants. Cette étude prend en compte la géotechnique des digues de façon globale et ne traite pas de la tenue des levées à l'érosion interne. La modification des conditions d'écoulement, par l'exhaussement des levées, le nivellement des points bas, le renforcement des

ouvrages et la présence de Villerest diminuent le risque d'apparition de brèches. L'étude montre qu'il reste cependant des sites sensibles où ces ruptures peuvent survenir en raison de :

- la présence de sites d'extraction,
  - la présence d'arbres sur les levées,
  - l'accumulation de facteurs sur un même site,
  - la présence de ruptures systématiques pour chaque crue du siècle passé.
- l'Étude de reconnaissance et de caractérisation des brèches anciennes dans les digues de la Loire (DESCAMPS-DIREN Centre, 2008) présente une analyse des fosses d'érosion de chaque brèche à partir de l'exploitation hydromorphologique du modèle numérique de terrain (MNT Lidar 2002).

La présence de ces fosses d'érosion à l'arrière des brèches est le témoignage de la violence du phénomène dû à la dissipation de l'énergie libérée lors de l'ouverture de la brèche et la turbulence de l'écoulement torrentiel. L'analyse des dépressions derrière les levées donne une idée de l'étendue de la fosse d'érosion, la profondeur actuelle n'étant bien sûr plus celle d'origine, mais le contour reste souvent bien visible. Une qualification de la zone de danger derrière une digue, liée à la dissipation d'énergie en cas de brèche, a été possible grâce à l'analyse de 107 brèches dont les fosses d'érosion sont encore bien visibles aujourd'hui. Cette approche a permis d'estimer que la largeur de la zone de dissipation d'énergie à l'arrière de la digue surversée est de l'ordre de 100 fois sa hauteur.

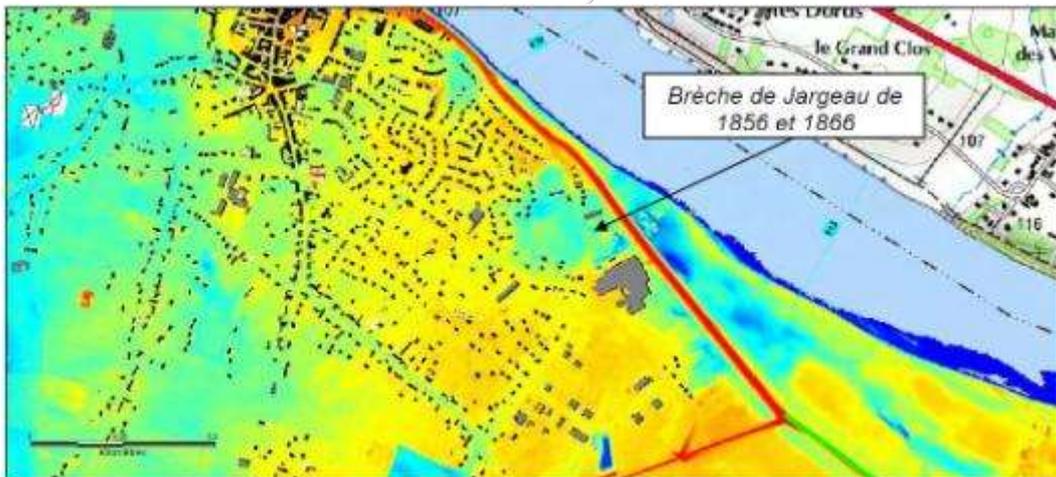


Figure 57 : Développement de la fosse d'érosion de la brèche de Jargeau 1856 et 1866  
- MNT Lidar 2002 (source : DREAL Centre)

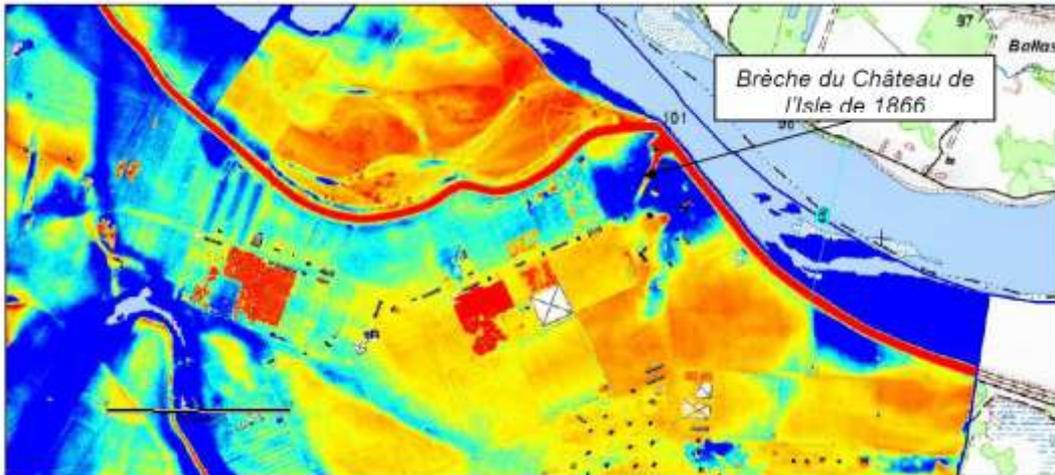


Figure 58 : Brèche du château de l'Isles 1866 – MNT Lidar 2002 (source : DREAL Centre)

Le château de l'Isle (Loiret) constitue un exemple intéressant pour définir la zone de dissipation de l'énergie à l'arrière d'une digue en cas de brèche. En septembre 1866, une brèche s'est ouverte en face du château, de construction massive. La distance entre la levée et le château est de 150 mètres. La dénivellation entre le sommet de la digue et son terrain d'assise est de 2,10 mètres (levée : 100,50 m NGF – terrain de fondation du château : 98,40 m NGF). Dans ce cas, la valeur de  $d/h = 71$ , alors que le bâtiment était très massif à l'inverse des constructions modernes et que la fosse d'érosion s'est propagée de chaque côté de l'obstacle qu'il constituait, comme on le voit sur la carte de la topographie réalisée au moyen du MNT laser.

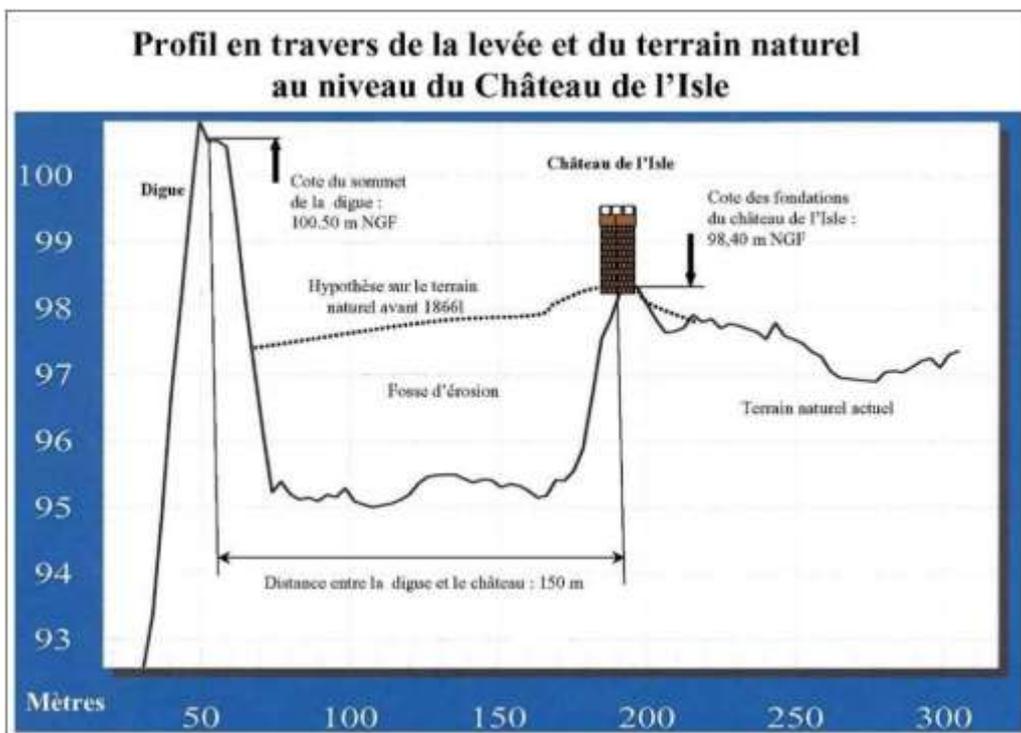


Figure 59 : Brèche du château de l'Isles 1866 – coupe schématique de la fosse d'érosion (source : DREAL Centre)

La brèche d'Amboise en 1856, sur la rive droite, est aussi un exemple édifiant. Tous les bâtiments entre la levée et la gare ont été détruits, à l'exception du bâtiment principal de la gare qui a été totalement dévasté mais est resté debout. La gare de marchandises, 2 hôtels et 30 maisons ont totalement disparu. La gare se situe entre 330 et 400 mètres de la levée qui était haute de 5 mètres.

## 7.5. Retour d'expérience sur d'autres systèmes d'endiguement

Ce paragraphe ne constitue pas un retour d'expérience à proprement parler, mais plutôt un examen rapide des enseignements que peuvent apporter les événements récents survenus sur d'autres systèmes d'endiguement dont certaines caractéristiques sont proches de celles des levées de la Loire.

Accident	Nombre victimes	Année	Enseignement pour l'Étude de dangers
Tempête en mer du Nord et rupture des digues en Hollande	1800	1953	<ul style="list-style-type: none"> <li>• L'évacuation de la zone protégée est indispensable à partir d'un certain niveau d'eau</li> </ul>
Crues du Rhône et rupture des digues de la Camargue	-	1993-1994	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formation de brèches au niveau des canalisations d'irrigation</li> </ul>
Crue de l'Oder en Pologne et en Allemagne	-	1997	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trace d'un réseau de trous laissés par les racines d'un ancien boisement à la périphérie d'une brèche</li> <li>• Techniques de réparations d'urgence</li> </ul>
Crue de l'Agly et rupture de la digue	35	1999	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rupture suite à surverse au niveau de la station d'épuration de Saint-Laurent-de-la-Salanque</li> </ul>
Crue du Gard et rupture de digues	8	2002	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Danger à proximité de la rupture</li> </ul>
Crue du Rhône et rupture d'un cordon de digue près d'Arles au niveau d'une trémie sous la voie ferrée	-	2003	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Protection d'urgence pour éviter le passage de l'eau sur la trémie conduisant à la surverse de la digue</li> <li>• Relogement d'une centaine de personnes pendant 1 an</li> </ul>
Cyclone Katrina et rupture des digues du Mississippi à La Nouvelle-Orléans	1500	2005	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nombreuses victimes derrière des brèches malgré la décision d'évacuer</li> </ul>
Tempête Xynthia et surverse des digues par la mer	50	2010	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 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</li> <li>• Certaines brèches liées à des canalisations</li> </ul>
Crues de la Vistule en Pologne et rupture des digues sur un très long linéaire	-	2010	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2 crues centennales consécutives (1 mois d'intervalle)</li> <li>• Phénomène déjà observé sur la Loire (trois pics de crue) en 1856</li> <li>• Nombreuses brèches liées à la présence de terriers d'animaux fouisseurs</li> </ul>
Crue de l'Agly et rupture de la digue	-	2013	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Forte diminution de la capacité hydraulique du lit mineur en raison de la présence abondante de végétation : débit de surverse bien inférieur à celui estimé théoriquement</li> <li>• Brèche sur environ 100 m de large, a priori déclenchée par la surverse - Fosse de 4 m de profondeur en aval de la brèche</li> </ul>

Tableau 31 : Enseignements des accidents sur d'autres systèmes d'endiguement

## 8. Identification et caractérisation des risques

Ce chapitre vise à identifier les scénarios de défaillance possible du système d'endiguement, puis de choisir et de caractériser ceux présentant le plus grand potentiel de danger. Il s'agit pour cela d'estimer la probabilité d'apparition des scénarios retenus puis de préciser les conséquences de l'inondation générée par ceux-ci. Le résultat de la démarche d'analyse de risques consiste en un positionnement des différents scénarios d'inondation dus à une défaillance de l'ouvrage dans une matrice de criticité exprimant le croisement entre leur probabilité d'occurrence et la gravité de leurs conséquences. Cette analyse et évaluation des risques constitue la base sur laquelle a été conduite l'étude de réduction des risques (chapitre 9).

La méthodologie développée dans les paragraphes suivants s'appuie sur celle utilisée dans les études de dangers des digues de classe A de la Loire moyenne<sup>13</sup>. Elle présente de manière concise tous les éléments utiles à la compréhension de l'analyse de risques. Le modèle de calcul de rupture de digue en remblai est l'outil CARDigue dans sa version 28.

Le lecteur est alerté sur les valeurs des probabilités de rupture de digue présentées dans le présent chapitre. Celles-ci restent des estimations liées à une approche semi-probabiliste qui intègre une part non négligeable de dires d'experts. Aussi, les valeurs de 0 % et de 100 % sont indicatives et ne doivent en aucun cas être comprises comme étant des certitudes.

### 8.1. Description et principes de la méthodologie

#### 8.1.1. Principe général

La méthodologie adoptée pour l'analyse de risques repose sur les étapes suivantes :

- l'analyse fonctionnelle (chapitre 3 de la présente étude de dangers),
- l'identification des scénarios de défaillance pouvant provoquer la ruine de l'ouvrage (paragraphe 8.1.2.1 ci-après),
- la modélisation des scénarios d'inondation par défaillance de l'ouvrage après avoir caractérisé le ou les mécanisme(s) initiateur(s) (brèche ou autre provoquant une ouverture dans le système d'endiguement) (paragraphe 8.2 ci-après),
- la détermination de la gravité des scénarios d'inondation par défaillance étudiés (paragraphe ci-après),
- l'analyse de la criticité des scénarios d'inondation par défaillance résultant du croisement de la gravité et de la probabilité d'apparition de chaque scénario (paragraphe 8.3.4 ci-après).

Théoriquement, la démarche d'analyse des risques doit permettre l'identification exhaustive des scénarios de défaillance du système que l'on étudie. Il existe plusieurs méthodes de modélisation de ces scénarios : méthode des arbres des causes, méthode

<sup>13</sup> DREAL Centre/SLBLB – Etudes de dangers des digues de classe A de la Loire moyenne – Méthodologie retenue pour le Calcul de l'Aléa Rupture de Digue (CARDigue) – version 2, décembre 2012

des arbres d'évènements, méthode du nœud papillon, etc. Toutefois, ces méthodes restent, à l'heure actuelle, difficilement applicables aux systèmes d'endiguement dont les composants hydrauliques et géotechniques présentent une grande variabilité.

En effet, l'analyse fonctionnelle réalisée au chapitre 3 met en relief une certaine variabilité des caractéristiques de l'ouvrage, notamment du fait de la présence de multiples singularités et / ou anomalies sur ce dernier (ouvrages traversants, végétation, etc.). Une approche « macroscopique » ne suffirait pas à conclure sur la localisation de secteurs susceptibles de présenter une défaillance.

En conséquence, il n'a pas été possible dans la présente étude de dangers d'aboutir à la mise en pratique d'une méthode intégrant toute la complexité des processus de rupture des digues. Il a donc été fait le choix de rester centré sur la méthode de diagnostic « classique » considérant les 5 « modes de rupture » de digue habituels : surverse, érosion interne, glissement de talus, érosion externe et soulèvement hydraulique.

Ces scénarios sont détaillés dans les paragraphes suivants sous la forme d'arbres de défaillance simplifiés et traduits en termes de fonctions et de composants géotechniques associés pour chaque profil en travers fonctionnel du système d'endiguement.

Dans les paragraphes suivants, nous nous attachons à évaluer la probabilité de rupture annuelle (en considérant que l'ouvrage est soumis à une gamme de sollicitations hydrauliques) pour chaque tronçon de 50 m de digue. Ainsi, sans présumer du ou des modes de défaillance de la digue, cette méthode dresse le bilan des caractéristiques intrinsèques de la digue par tronçon de 50 m sur lesquelles elle appuie son raisonnement probabiliste.

Le calcul de la probabilité de rupture est réalisé en tenant compte des éléments suivants :

- les caractéristiques géométriques de la digue (hauteur, largeur en crête, etc.) déterminés à partir des points caractéristiques de chaque profil en travers (cf. Figure 11 en page 33),
- la charge hydraulique s'exerçant sur la digue pour différentes occurrences d'après les résultats du modèle hydraulique,
- les dispositions constructives présentes, susceptibles de réduire ou non la probabilité de rupture (présence d'enrochements, de palplanches, etc. sur le talus côté Loire par exemple),
- les irrégularités et anomalies présentes sur l'ouvrage (ouvrage traversant, végétation arbustive, etc.) mentionnées en particulier dans l'analyse fonctionnelle (cf. chapitre 3),
- la géotechnique des terrains d'assise, caractérisés par les essais réalisés dans le cadre de l'étude de dangers.

### 8.1.2. Caractérisation du potentiel de rupture

La caractérisation du potentiel de rupture de chaque tronçon de digue s'appuie sur deux étapes successives :

- l'identification des scénarios de défaillance potentiels,

- l'estimation des probabilités de rupture de chaque tronçon de digue.

#### 8.1.2.1. Identification des scénarios de défaillance envisageables

Cette étape passe par l'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE) du système d'endiguement. Celle-ci permet de passer de l'analyse fonctionnelle de chacun des profils en travers types de digue à la détermination des scénarios de défaillance qui lui sont attachés. Il s'agit pour cela d'identifier les potentialités de défaillance d'un ou de plusieurs composants géotechniques qui conduirait le système d'endiguement à ne plus satisfaire ses fonctions hydrauliques (identifiées lors de l'analyse fonctionnelle hydraulique).

Les interactions possibles entre les différents composants structurels doivent être étudiées afin, théoriquement, d'aboutir à l'identification exhaustive de tous les scénarios de défaillance possibles.

Comme évoqué précédemment, cette démarche théorique est difficilement applicable aux systèmes d'endiguement linéaires qui présentent une géométrie et des caractéristiques très variées (solicitation hydraulique, désordres de tous types, renforcements et protections, structure géotechnique, etc.).

Il a donc été fait le choix de rester centré sur la méthode de diagnostic classique considérant les cinq « modes de rupture » de digues habituels : surverse, érosion interne, glissement de talus, érosion externe, soulèvement hydraulique.

Plus précisément, les modes de défaillance ont été qualifiés par leur mécanisme initial. Ils mettent en évidence le plus souvent plusieurs mécanismes de détérioration :

- la rupture par surverse correspond à une surverse suivie d'une érosion externe de la crête et du talus côté zone protégée (côté val),
- la rupture par érosion interne (entraînement de particules soumis à un écoulement d'eau interne à la levée ou à sa fondation),
- la rupture par glissement de talus suivi d'une érosion interne,
- la rupture par érosion externe (affouillement) de la fondation de la digue, suivie d'un glissement de talus côté fleuve puis d'une érosion interne,
- la rupture par soulèvement hydraulique (claquage de la fondation en pied de digue côté zone protégée) puis érosion interne.

Ce dernier mode de défaillance n'a pas lieu de se présenter sur le système d'endiguement du val de Véron dans la mesure où l'ouvrage ne repose pas sur un horizon superficiel imperméable continu. Il ne sera donc plus considéré dans la suite de l'étude.

Ces scénarios distinguent, d'un côté, le mécanisme initiateur du mode de rupture (par exemple la surverse, l'affouillement, le soulèvement hydraulique) et, de l'autre, le ou les mécanismes responsables de la rupture. Cette distinction est au cœur du modèle d'aléa de rupture CARDigue développé par le LRPC de Blois / Irstea / DREAL Centre et utilisé dans la présente étude de dangers.

On notera que seule la surverse et l'érosion interne sont susceptibles d'entraîner à elles seules une brèche sur la digue.

#### ❖ Arbre de défaillance simplifié d'un scénario de rupture par surverse

Le phénomène de surverse survient lorsque le niveau d'eau devant la digue dépasse le niveau de la crête.

La rupture d'un tronçon de digue due à une surverse est conditionnée par les éléments suivants :

- d'une part, par l'aléa hydraulique (lame d'eau déversante sur la digue),
- d'autre part, par les caractéristiques de la digue et notamment sa nature, la largeur de la crête de l'ouvrage et la pente du talus de la digue côté val.

Ces deux paramètres influent sur la capacité d'érosion externe de la digue. Plus la pente du talus côté zone protégée sera importante, plus les vitesses d'écoulement seront grandes et le risque d'érosion important. À cela, seule l'importance de la largeur de la crête de digue pourra « venir s'opposer » à l'ouverture d'une brèche.

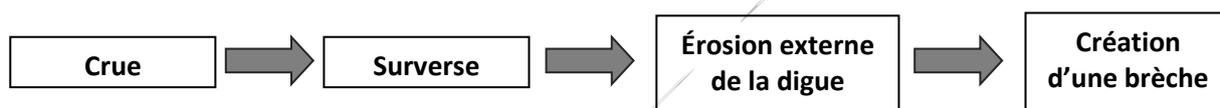


Figure 60 : Arbre de défaillance simplifié d'un scénario de rupture de digue par surverse

Le tableau ci-dessous présente les fonctions structurelles sollicitées lors de l'apparition de ce mode de défaillance et les composants correspondants.

Phénomène	Fonctions géotechniques	Composants
Résistance à l'érosion externe	Protection	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Crête goudronnée</li> <li>• Talus enherbé côté zone protégée</li> </ul>

Tableau 32 : Fonctions et composants structurels sollicités dans le cas d'un scénario de rupture par surverse

#### ❖ Arbre de défaillance simplifié d'un scénario de rupture par érosion interne

L'érosion interne traduit le phénomène d'entraînement des matériaux les plus facilement mobilisables du corps de digue par l'action d'un écoulement se produisant en son sein. Ce phénomène est ainsi lié à la capacité qu'aura le corps de digue à laisser transiter les écoulements en son sein, mais également au potentiel qu'aura l'écoulement à mobiliser et entraîner les particules du corps de digue.

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 en 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 digue. Elle est souvent liée à des facteurs extérieurs tels que les terriers des animaux fouisseurs, les racines d'arbres, les ouvrages traversant ou inclus, etc.

L'érosion interne désigne une famille de mécanismes qui, par expérience, peuvent provoquer à eux seuls la rupture totale ou partielle de digue. Ils peuvent néanmoins être associés à d'autres mécanismes (érosion par glissement, etc.), mais ils constituent toujours le mécanisme de rupture final.

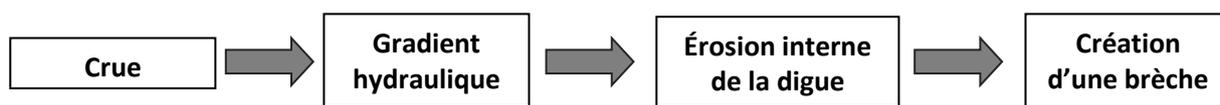


Figure 61 : Arbre de défaillance simplifié d'un scénario de rupture de digue par érosion interne

Le tableau ci-dessous présente les fonctions structurelles sollicitées lors de l'apparition de ce mode de défaillance ainsi que les composants correspondants.

Phénomène	Fonctions géotechniques	Composants
Résistance à l'érosion interne	Imperméabilité	• Corps de digue en remblai
	Filtration	• Corps de digue
	Auto-filtration	• Corps de digue
	Protection	• Talus enherbé côté cours d'eau • Perré au niveau de la cale de Bertignolles

Tableau 33 : Fonctions et composants structurels sollicités dans le cas d'un scénario de rupture par érosion interne

#### ❖ Arbre de défaillance simplifié d'un scénario de rupture par glissement

Le phénomène de glissement survient lorsque l'équilibre entre les forces et moments moteurs et les forces et moments stabilisateurs appliqués à l'ouvrage est rompu. Le bilan des forces et moments sur la digue fait état du poids des terrains, de l'action interne et externe de l'eau et de la résistance au cisaillement des sols (fonction de la cohésion et de l'angle de frottement interne).

Deux types de glissement sont susceptibles de se produire sur la digue objet de la présente étude de dangers :

- glissement de type circulaire côté zone protégée (cf. Figure 62),
- glissement de type circulaire côté cours d'eau (cf. Figure 63).

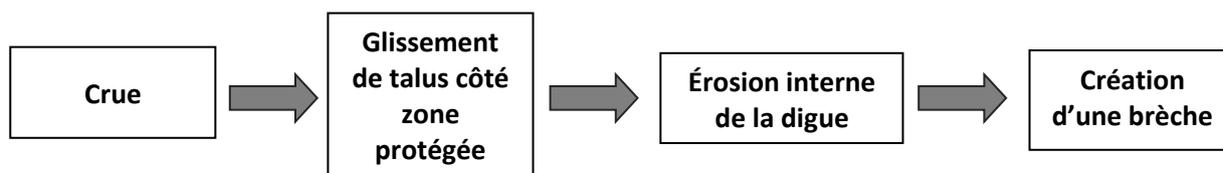
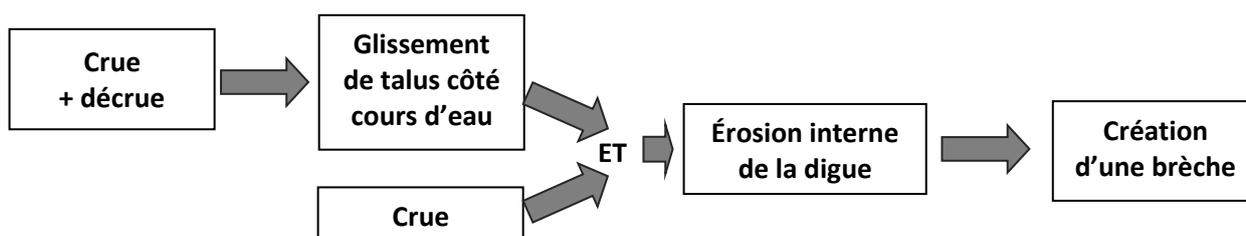


Figure 62 : Arbre de défaillance simplifié d'un scénario de rupture de digue par glissement côté val



**Figure 63 : Arbre de défaillance simplifié d'un scénario de rupture de digue par glissement côté cours d'eau**

Dans le modèle d'aléa de rupture CARDigue utilisé dans la présente étude, le scénario de rupture par glissement de talus côté cours d'eau n'est pas considéré directement mais comme un mécanisme élémentaire d'un scénario de défaillance de type érosion externe en pied de talus, présenté dans le paragraphe suivant.

Le tableau ci-dessous présente les fonctions structurelles sollicitées lors de l'apparition de ce mode de défaillance ainsi que les composants correspondants.

Phénomène	Fonctions géotechniques	Composants
Résistance au glissement	Stabilité d'ensemble	• Corps de digue, sol support
Résistance à l'érosion interne	Imperméabilité	• Corps de digue en remblai
	Filtration	• Corps de digue
	Auto-filtration	• Corps de digue

**Tableau 34 : Fonctions et composants structurels sollicités dans le cas d'un scénario de rupture par glissement**

#### ❖ **Arbre de défaillance simplifié d'un scénario de rupture par érosion externe**

À l'exception du cas des surverses, où l'érosion externe est la cause directe de la rupture, l'érosion externe est rarement capable de générer à elle seule la défaillance de l'ouvrage. Elle peut cependant initier un glissement, qui associé à l'érosion interne, provoque la rupture de l'ouvrage.

On distingue deux localisations possibles de l'action érosive des écoulements non surversants, susceptibles d'engendrer une défaillance de la digue :

- l'érosion externe au niveau du talus côté cours d'eau,
- l'érosion externe au niveau du pied côté cours d'eau de la digue.

L'érosion externe étant directement causée par l'action érosive du cours d'eau, elle ne peut être observée que côté cours d'eau (pas d'érosion externe côté val).

Par ailleurs, l'apparition du phénomène d'érosion externe en pied de digue sera d'autant moins probable que la largeur du franc-bord (distance entre le pied de digue et le lit du cours d'eau) sera grande et que le pied présentera une protection.

L'affouillement du pied venant déstabiliser la digue côté cours d'eau, un glissement sera alors susceptible d'apparaître. Puis, de façon similaire au scénario de défaillance par glissement décrit dans les paragraphes précédents, l'érosion interne sera accrue, ce qui pourra provoquer la création d'une brèche dans l'ouvrage (cf. Figure 64).

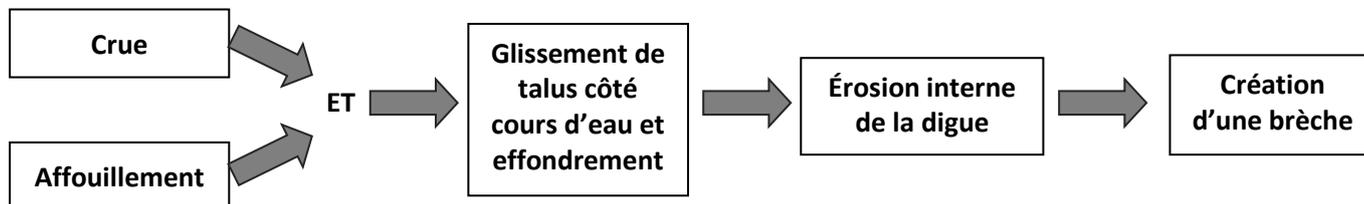


Figure 64 : Arbre de défaillance simplifié d'un scénario de rupture de digue par érosion externe en pied de talus

Le tableau ci-dessous présente les fonctions structurelles sollicitées lors de l'apparition de ce mode de défaillance ainsi que les composants correspondants.

Phénomène	Fonctions géotechniques	Composants
Résistance à l'affouillement	Protection	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Talus enherbé</li> <li>• Perré au niveau de la cale de Bertignolles</li> <li>• Largeur du franc-bord</li> </ul>
Résistance au glissement	Stabilité d'ensemble	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Corps de digue, sol support</li> </ul>
Résistance à l'érosion interne	Imperméabilité	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Corps de digue en remblai</li> </ul>
	Filtration	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Corps de digue</li> </ul>
	Auto-filtration	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Corps de digue</li> </ul>

Tableau 35 : Fonctions et composants structurels intervenant dans le cas d'un scénario de rupture par érosion externe

#### 8.1.2.2. Estimation de la probabilité de rupture des tronçons de digue

L'estimation du potentiel de rupture a été conduite dans la présente étude de dangers en mettant en œuvre le modèle d'aléa de rupture CARDigue (LRPC de Blois / Irstea / DREAL Centre) pour tous les profils en travers définis sur le système d'endiguement (cf. paragraphe 3.1.5.1) présentant un espacement de 50 m. Chaque profil est considéré représentatif du tronçon de 50 m (notion d'homogénéité à l'échelle du tronçon) au milieu duquel il est implanté (25 m de part et d'autre).

Par ailleurs, la rupture de chaque tronçon est considérée comme indépendante de celle des autres tronçons (ce qui veut dire que la rupture d'un tronçon n'a pas de conséquence sur la probabilité de rupture des autres tronçons). En pratique, cette notion d'indépendance n'est pas totalement réelle puisque la rupture d'un tronçon va modifier les conditions hydrauliques devant les autres tronçons et donc la probabilité de rupture associée. On notera toutefois que non seulement cette hypothèse est acceptable pour le calcul des probabilités de rupture, mais aussi que cela permet plus facilement, via le modèle d'aléa de rupture, de comparer les profils les uns aux autres et de mettre en évidence les secteurs de fragilité du système d'endiguement.

❖ **Fonctionnement du modèle d'aléa de rupture : éléments fondamentaux de compréhension**

Le calcul de la probabilité de défaillance géotechnique est réalisé par CARDigue pour chacun des 4 principaux scénarios susceptibles d'être rencontrés sur la digue de Bertignolles :

- surverse,
- érosion interne,
- glissement,
- érosion externe par affouillement du pied de talus côté cours d'eau.

Le modèle d'aléa de rupture permet de quantifier la probabilité de défaillance d'un tronçon de digue tous modes de défaillance confondus (surverse, érosion interne, glissement et érosion externe) pour un événement de crue donné. On parlera alors de **probabilité événementielle**, pour laquelle la grille suivante sera utilisée.

Probabilité	Probabilité événementielle en %
Quasi certaine	$P_a > 99 \%$
Très forte	$80 \% < P_a \leq 99 \%$
Forte	$20 \% < P_a \leq 80 \%$
Moyenne	$1 \% < P_a \leq 20 \%$
Négligeable	$0,1 \% < P_a \leq 1 \%$
Quasi nulle	$P_a \leq 0,1 \%$

**Tableau 36 : Grille d'analyse des probabilités événementielles utilisées pour caractériser la probabilité de défaillance pour une crue donnée**

Le modèle d'aléa de rupture permet également d'évaluer la **probabilité annuelle de défaillance d'un tronçon de digue** pour un scénario de défaillance donné (1 mode de rupture) ou en agglomérant l'ensemble des scénarios envisagés (prise en compte conjointement des différents modes de rupture possibles). On parlera alors de probabilité de rupture annuelle, pour laquelle la grille suivante sera utilisée :

Probabilité annuelle (Pa)		
Qualification	Classe	
	En %	En temps de retour
Très probable	$10 \% < Pa$	$T < 10$ ans
Probable	$1 \% < Pa \leq 10 \%$	$10 \leq T < 100$ ans
Moyennement probable	$0,5 \% < Pa \leq 1\%$	$100 \leq T < 200$ ans
Peu probable	$0,2 \% < Pa \leq 0,5\%$	$200 \leq T < 500$ ans
Très peu probable	$0,1\% < Pa \leq 0,2\%$	$500 \leq T < 1\,000$ ans
Improbable	$0,01 \% < Pa \leq 0,1\%$	$1\,000 \leq T < 10\,000$ ans
Très improbable	$Pa \leq 0,01 \%$	$T \geq 10\,000$ ans

**Tableau 37 : Grille d'analyse des probabilités de rupture annuelles**  
(source : EDD des digues de classe A / DREAL Centre)

Cette grille traduit, par exemple, qu'un tronçon de digue présentant une probabilité annuelle de rupture de 1 % présente 1 chance sur 100 de se rompre chaque année, ce que l'on peut également exprimer en associant une occurrence centennale au scénario de défaillance envisagé.

La probabilité de rupture annuelle se calcule en sommant le produit de la probabilité événementielle pour chaque crue par la probabilité de la crue, ceci pour une gamme de crues choisie.

En théorie, la gamme des crues considérées est limitée au niveau de protection apparent du système d'endiguement (niveau correspondant aux premières surverses sur la digue). En effet, la probabilité de rupture est proche de 1 dès lors que la digue, non résistante à la surverse, est surversée. Les crues supérieures à la crue déterminant le niveau de protection apparent ne font pas partie de la plage de fonctionnement de l'ouvrage. Les probabilités annuelles de défaillance sont donc calculées jusqu'à la crue définissant le niveau de protection apparent du système d'endiguement considéré. Cependant, au regard du faible niveau de protection apparent de la digue de Bertignolles, les probabilités annuelles de défaillance sont calculées jusqu'à la crue directement supérieure au niveau de protection apparent, à savoir  $T = 10$  ans.

**Comme indiqué précédemment, les valeurs de probabilités annoncées restent des estimations. Les valeurs de 0 % et de 100 % sont indicatives et ne doivent pas être considérées comme des zones pour lesquelles le risque de rupture est nul ou certain.**

#### ❖ Paramètres pris en compte dans CARDigue

CARDigue a été alimenté avec :

- la géométrie de chaque tronçon de 50 mètres de digue,
- les niveaux d'eau attendus sur la digue, côté cours d'eau et côté val, selon les résultats de l'étude hydraulique (prise en compte du remous),

- les observations réalisées lors des VTA de 2016 : bâtiments encastrés, végétation, canalisations traversantes, terriers, obstacles sur les talus, traces d'érosion, présence d'ouvrages de protection contre l'érosion,  
A noter que ces observations sont décrites globalement sous CARDigue par le biais de coefficients pondérateurs majorant ou minorant la probabilité de rupture.
- les informations disponibles sur la gestion des digues en cas de crue<sup>14</sup>,
- la géologie des sols supports et les caractéristiques de la digue qui est représentée via des profils types,
- la probabilité des crues considérées.

Dénomination	Occurrence
Q2	1 ans ≤ T < 3 ans
Q5	3 ans ≤ T < 7 ans
Q10	7 ans ≤ T < infini

Tableau 38 : Crues de référence au droit du secteur d'étude du val de Bertignolles

#### ❖ Niveau de sûreté

Le niveau de sûreté, correspondant au niveau d'eau au-dessus duquel la probabilité de rupture de la digue n'est plus négligeable, est déterminé comme suit : niveau d'eau, et occurrence de crue associée, pour lequel le (les) tronçon(s) le(s) plus fragiles du système présente(nt) une probabilité événementielle de rupture supérieure à 1 %.

#### ❖ Calage du modèle d'aléa de rupture

La levée a fait l'objet de plans de travaux :

- suite à l'érosion des pieds et bas de talus (1938), des enrochements ont été mis en place de façon à assurer une butée, les parties abimées du talus sont comblées par des matériaux sableux et le perré a été repris,
- une réfection de la banquettes a été réalisée en 1980.

Les documents d'archives consultés signalent quelques désordres importants mais sans en donner de description précise ni de localisation.

L'évolution de la végétation ligneuse, de la colonisation de la digue par des animaux fouisseurs et la réalisation de travaux et de canalisations postérieures à ces crues sont autant de phénomènes qui ne permettent pas de caler avec précision le modèle d'aléa de rupture sur l'une des crues du XIX<sup>ème</sup> siècle.

Au regard de ces éléments, de l'évolution de la digue et du peu de description des désordres de la digue, aucun élément ne permet de caler précisément le modèle d'aléa

<sup>14</sup> A ce stade et à titre conservatif, nous n'avons pas fait intervenir ce paramètre et avons indiqué dans le modèle « absence de surveillance ou surveillance non adaptée » (ASONA). Ceci ne réduit pas la probabilité de rupture de l'ouvrage, contrairement aux autres modes de gestion qui peuvent être insérés dans CARDigue.

de rupture sur les crues du XIX<sup>ème</sup> siècle. L'absence de désordre significatif pour les crues de 2003 et 2016 est à valoriser pour caler CARDigue.

#### ❖ Analyse de sensibilité du modèle d'aléa de rupture

Afin d'apprécier la robustesse du modèle et d'évaluer la pertinence des résultats fournis, une analyse de sensibilité sur le phénomène d'érosion interne, participant au calcul de la probabilité de défaillance de la plupart des modes de rupture, a été réalisée.

L'érosion interne est appréciée par le biais du critère de Bligh dans le modèle d'aléa de rupture. Ce critère traduit l'inverse du gradient hydraulique dans le corps de digue et doit être mis en relation avec la nature des matériaux constituant le corps de digue. Ainsi, pour une composition du corps de digue donnée, plus ce critère est faible, plus la probabilité d'apparition du phénomène d'érosion interne est importante. Trois échelles de Bligh, permettant d'apprécier la probabilité d'apparition du phénomène, ont été testées :

- une échelle dite "optimiste",
- une échelle dite "médiane",
- une échelle dite "pessimiste".

Nota : les valeurs retenues pour les trois jeux de paramètres sont celles de la version v28 de CARDigue.

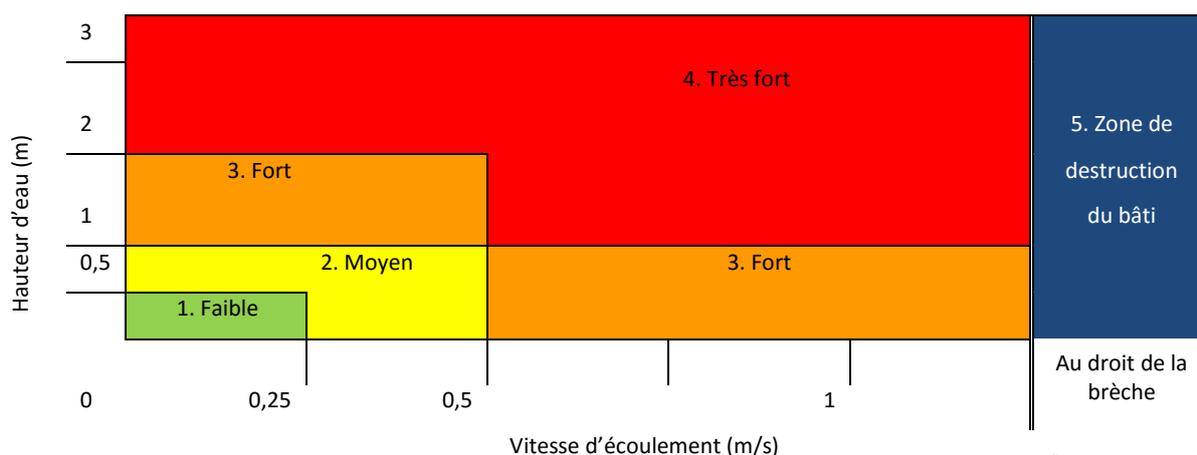
La note de présentation des scénarios d'inondation par brèche retenus, disponible en Annexe 13, présente en détail l'analyse de sensibilité menée sur le paramétrage de l'érosion interne, ainsi que les résultats. En conclusion de cette analyse, **le paramétrage médian du critère de Bligh a été retenu pour estimer les probabilités de défaillance du système d'endiguement du val de Véron.**

#### 8.1.2.3. Caractérisation des conséquences des scénarios de défaillance

##### ❖ Aléa hydraulique, vulnérabilité et gravité des scénarios d'inondation

L'évaluation de la gravité des scénarios d'inondation passe par l'estimation de l'aléa et de la vulnérabilité des enjeux exposés.

Dans le cadre de l'étude de dangers du système d'endiguement du val de Véron, il est proposé de retenir la grille présentée sur la figure ci-après pour la caractérisation de l'aléa inondation. Cette grille considère les paramètres hydrauliques "hauteur d'eau" et "vitesse d'écoulement".



**Tableau 39 : Grille d'intensité de l'aléa inondation**  
(source : EDD des digues de classe A / DREAL Centre)

Les scénarios d'inondation retenus ont été simulés au moyen d'un modèle hydraulique bidimensionnel. A partir des résultats de ces simulations et de la grille présentée ci-dessus, il est possible de dénombrer les enjeux par classe d'aléa et ainsi, d'évaluer les conséquences de ces scénarios d'inondation.

**Remarque concernant la zone de destruction du bâti :**

*Les outils de modélisation hydraulique existants et utilisés dans le cadre de la présente étude de dangers ne sont pas en mesure de décrire le phénomène local de dissipation d'énergie observable derrière une brèche. Les approches historiques menées sur la Loire par exemple montrent les effets destructeurs de ce type de phénomène sur le bâti situé à proximité.*

*Pour prendre en compte cette zone de dangers liée à la rupture de la digue, une zone de destruction du bâti a été intégrée dans la cartographie de l'aléa. Cette zone est définie selon une demi-ellipse de petit axe égal à la largeur de la brèche et de grand axe égal à 100 fois la charge hydraulique au moment de la rupture au droit de la brèche (soit la différence entre la hauteur d'eau au moment de la rupture et le niveau du terrain naturel coté zone protégée).*

L'exposition à un risque implique que le territoire potentiellement touché prenne des dispositions visant à limiter la vulnérabilité des biens et des personnes : évacuation de la population, consignes de replis dans les étages supérieurs, etc.

La grille ci-dessous présente un cadre pour le calcul de la population en danger lors d'une inondation en fonction de la typologie des bâtiments. Ces valeurs sont celles retenues pour les études de dangers des digues de classe A de la Loire et sont données à dire d'expert. **Elles n'ont pas vocation à refléter la réalité même du nombre précis de personnes en danger, mais à permettre la comparaison et la hiérarchisation des différents scénarios d'inondation retenus.**

Conseil Départemental d'Indre-et-Loire (CD 37)  
Étude de dangers de la digue de Bertignolles - Rapport A 85656 vA

Intensité de l'aléa inondation	Population susceptible d'être en danger		
	Habitat « R0 » (RDC uniquement)	Habitat « R1 » (RDC + 1 étage)	Habitat « R2 » et plus (RDC + 2 étages au moins)
5. Zone de destruction du bâti	95 %	95 %	95 % du total
4. Très fort	70 %	30 %	10 %
3. Fort	30 %	5 %	1 %
2. Moyen	5 %	1 %	0,5 %
1. Faible	0 %	0 %	0 %

**Tableau 40 : Calcul de l'indicateur de population susceptible d'être en danger selon la typologie de bâtiment et l'intensité de l'aléa inondation**

Sur les axes de circulation, la grille de calcul de l'indicateur « usager en danger » sera la suivante :

Intensité de l'aléa inondation	Usagers susceptibles d'être en danger « axes routiers »
5. Zone de destruction du bâti	95 %
4. Très fort	80 %
3. Fort	40 %
2. Moyen	10 %
1. Faible	1 %

**Tableau 41 : Calcul de l'indicateur « usagers susceptible d'être en danger » sur les axes routiers**

La gravité d'un accident sur l'ouvrage est directement fonction des conséquences qu'il engendre. La gravité des conséquences des scénarios d'inondation est ici estimée par le nombre de personnes en danger. Le tableau suivant qualifie le degré de gravité des scénarios d'inondation.

Gravité du scénario d'inondation	Nombre de personnes susceptibles d'être en danger
5 Désastreux	Supérieur à 10 000
4 Catastrophique	Entre 1 000 et 10 000
3 Important	Entre 100 et 1 000
2 Sérieux	Entre 10 et 100
1 Modéré	Inférieur à 10

**Tableau 42 : Classes de gravité des scénarios d'inondation  
(source : guide de lecture des EDD des digues)**

La population susceptible d'être en danger constitue l'indicateur le plus pertinent compte tenu de la typologie des enjeux situés dans la zone protégée. Cependant, la vulnérabilité d'autres types d'enjeux (cf. paragraphe 3.2.4) sera également étudiée et pourra conduire au surclassement éventuel de la gravité d'un scénario d'inondation.

### ❖ Criticité des scénarios

L'évaluation de la criticité des scénarios d'inondation constitue l'aboutissement de l'analyse des risques. Elle consiste à qualifier le risque en fonction de la probabilité du scénario d'inondation et de la gravité des conséquences qu'il engendre.

Criticité des scénarios		Probabilité annuelle des scénarios						
		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	10 000	Risque acceptable			Risque préoccupant		Risque intolérable	
	10 000	Risque acceptable			Risque préoccupant		Risque intolérable	
	1 000	Risque acceptable			Risque préoccupant		Risque intolérable	
	100	Risque acceptable			Risque préoccupant		Risque intolérable	
	10	Risque acceptable			Risque préoccupant		Risque intolérable	

Tableau 43 : Matrice de criticité (source : EDD des digues de classe A / DREAL Centre)

Conformément au guide de lecture sur les études de dangers, les différentes zones de la matrice de criticité sont associées aux éléments suivants :

- **la zone rouge** signifie que le risque est inacceptable. Des solutions adaptées permettant de sortir de la zone rouge devront être mises en œuvre pour réduire le risque. Certaines « barrières de sécurité » peuvent être proposées à titre transitoire dans l'attente de la réalisation de mesures structurelles lourdes. Le Préfet avertira les maires des communes concernées, notamment afin qu'ils prennent en compte le niveau de risque de rupture de l'ouvrage dans le Plan Communal de Sauvegarde lorsqu'il existe,
- **la zone orange** signifie que la sûreté de l'ouvrage ne peut pas être considérée par le service de contrôle comme satisfaisante. Dans cette hypothèse, le service de contrôle doit s'assurer de la présence de mesures de réduction de risques adaptées à la situation de l'ouvrage. Les actions à conduire par le responsable de l'ouvrage s'inscrivent sur le principe ALARP (« As Low As Reasonably Possible »), c'est-à-dire pour conduire à un niveau de risque aussi bas qu'il est raisonnablement possible y compris par des interventions en crue ou par l'information des autorités chargées de la mise en sécurité de la population,
- **la zone verte** signifie que l'ouvrage est réputé « sûr », au sens du concept anglo-saxon « As Low As Reasonably Possible » et que le maintien des conditions nominales de sûreté devra être vérifié par le service de contrôle.

## 8.2. Détermination des scénarios de défaillance et estimation de leur probabilité d'occurrence

Les principaux éléments liés à la mise en œuvre du modèle d'aléa de rupture sont présentés dans les paragraphes ci-dessous. Les fiches complètes des résultats du modèle CARDigue sont présentées profil par profil en Annexe 15 .

Dans les paragraphes suivants,

- nous rappelons le niveau de protection apparent associé,
- nous précisons les probabilités de rupture évaluées avec le modèle CARDigue (probabilité événementielle de rupture tous modes de rupture confondus et probabilité annuelle de rupture tous modes de rupture confondus),
- nous indiquons le mode de défaillance principal expliquant la probabilité de rupture annuelle (par exemple érosion interne, surverse, etc.).

La détermination des scénarios d'inondation par défaillance du système d'endiguement a fait l'objet d'une note spécifique figurant en Annexe 13. Elle présente notamment la démarche de calage du modèle CARDigue sur les observations réalisées lors des crues historiques.

### 8.2.1. Niveau de protection apparent

La note étude hydraulique, disponible en Annexe 5, montre que les premières surverses commencent à être observées sur la digue de Bertignolles pour une crue d'occurrence 5 ans.

L'aléa de rupture annuel sera calculé jusqu'à une occurrence directement supérieure, à savoir 10 ans.

### 8.2.2. Résultats du modèle d'aléa de rupture

Les résultats de la mise en œuvre du modèle d'aléa de rupture tous modes confondus sont présentés pour chaque événement de crue ainsi que pour l'aléa annuel de rupture dans le tableau ci-après ainsi que sur la Figure 65 en page 130.

Probabilité tous mode confondus Version médiane de l'échelle de Bligh recalée					
N° du Profil utilisé	Aléa évènementiel			Aléa annuel	Cause de rupture
	2 ans	5 ans	10 ans		
1	0%	0%	0%	0.00%	
2	0%	0%	0%	0.00%	
3	0%	0%	0%	0.01%	
4	0%	0%	0%	0.01%	
5	0%	0%	0%	0.00%	
6	0%	0%	0%	0.01%	
7	0%	0%	28%	4.00%	Surverse + VLC

Conseil Départemental d'Indre-et-Loire (CD 37)  
Étude de dangers de la digue de Bertignolles - Rapport A 85656 vA

Probabilité tous mode confondus Version médiane de l'échelle de Bligh recalée					
N° du Profil utilisé	Aléa évènementiel			Aléa annuel	Cause de rupture
	2 ans	5 ans	10 ans		
8	0%	18%	35%	8.44%	Surverse + VLG
9	0%	4%	7%	1.69%	
10	0%	4%	7%	1.76%	
11	0%	0%	7%	1.00%	
12	0%	0%	16%	2.31%	Erosion interne + surverse + VLG
13	0%	0%	13%	1.83%	Surverse + VLG
14	0%	0%	6%	0.92%	
15	0%	0%	14%	2.00%	
16	0%	5%	7%	1.86%	
17	1%	50%	0%	10.19%	Erosion interne + VLG
18	0%	10%	3%	2.43%	Surverse + érosion interne + VLG
19	0%	0%	45%	6.40%	Surverse + VLG
20	0%	0%	4%	0.64%	
21	0%	0%	7%	1.00%	
22	0%	0%	4%	0.64%	
23	0%	4%	5%	1.48%	Surverse + CanH + VLC
24	0%	0%	6%	0.82%	
25	0%	0%	9%	1.30%	
26	0%	0%	7%	1.00%	
27	0%	0%	10%	1.44%	Surverse + VLC
28	0%	0%	4%	0.58%	Surverse + VLG
29	0%	0%	5%	0.72%	
30	0%	0%	6%	0.82%	
31	0%	0%	20%	2.86%	
32	0%	7%	10%	2.81%	Erosion interne + surverse + VLG
33	0%	0%	10%	1.44%	
34	0%	8%	10%	2.96%	
35	0%	0%	10%	1.44%	
36	0%	7%	10%	2.81%	Surverse + VLC
37	0%	7%	10%	2.81%	
38	0%	7%	10%	2.81%	
39	0%	0%	6%	0.94%	
40	0%	99%	10%	20.29%	Surverse + érosion interne + VLG + CANH
41	0%	0%	10%	1.45%	Erosion interne + surverse + VLG
42	0%	0%	10%	1.44%	
43	0%	0%	3%	0.47%	
44	0%	0%	1%	0.15%	
45	0%	0%	1%	0.19%	Surverse + CAN (32,98) + VLG
46	0%	0%	6%	0.92%	Surverse + TERB + VLC
47	0%	0%	10%	1.44%	
48	0%	0%	6%	0.92%	
49	0%	0%	4%	0.58%	

Brèche  
Sc1

Conseil Départemental d'Indre-et-Loire (CD 37)  
Étude de dangers de la digue de Bertignolles - Rapport A 85656 vA

Probabilité tous mode confondus Version médiane de l'échelle de Bligh recalée					
N° du Profil utilisé	Aléa événementiel			Aléa annuel	Cause de rupture
	2 ans	5 ans	10 ans		
50	0%	0%	3%	0.46%	
51	0%	0%	4%	0.57%	
52	0%	0%	4%	0.64%	
53	0%	0%	6%	0.92%	
54	0%	0%	3%	0.46%	
55	0%	0%	4%	0.57%	
56	0%	0%	4%	0.58%	Surverse + VLG
57	0%	0%	1%	0.14%	
58	0%	0%	5%	0.72%	
59	0%	0%	8%	1.20%	Erosion interne
60	0%	0%	3%	0.36%	Surverse + VLG
61	0%	0%	1%	0.10%	
62	0%	0%	1%	0.08%	
63	0%	0%	0%	0.05%	
64	0%	0%	0%	0.05%	
65	0%	0%	0%	0.05%	
66	0%	1%	1%	0.27%	
67	0%	0%	1%	0.16%	
68	0%	0%	4%	0.58%	Erosion interne + VLG
69	0%	0%	1%	0.17%	
70	0%	0%	1%	0.12%	
71	0%	0%	1%	0.12%	
72	0%	0%	1%	0.12%	
73	0%	80%	2%	15.49%	Erosion interne + CAN (31,28) + VLG
74	0%	0%	0%	0.00%	
75	0%	0%	0%	0.00%	
76	0%	0%	0%	0.00%	
77	0%	0%	0%	0.00%	
78	0%	0%	0%	0.00%	
79	0%	0%	0%	0.00%	
80	0%	0%	0%	0.00%	
81	0%	0%	0%	0.00%	
82	0%	0%	0%	0.00%	
83	0%	0%	0%	0.00%	
84	0%	0%	1%	0.07%	
85	0%	5%	5%	1.58%	Surverse + CANH

Tableau 44 : Probabilité de rupture annuelle tous modes de rupture confondus

Conseil Départemental d'Indre-et-Loire (CD 37)  
Étude de dangers de la digue de Bertignolles - Rapport A 85656 vA

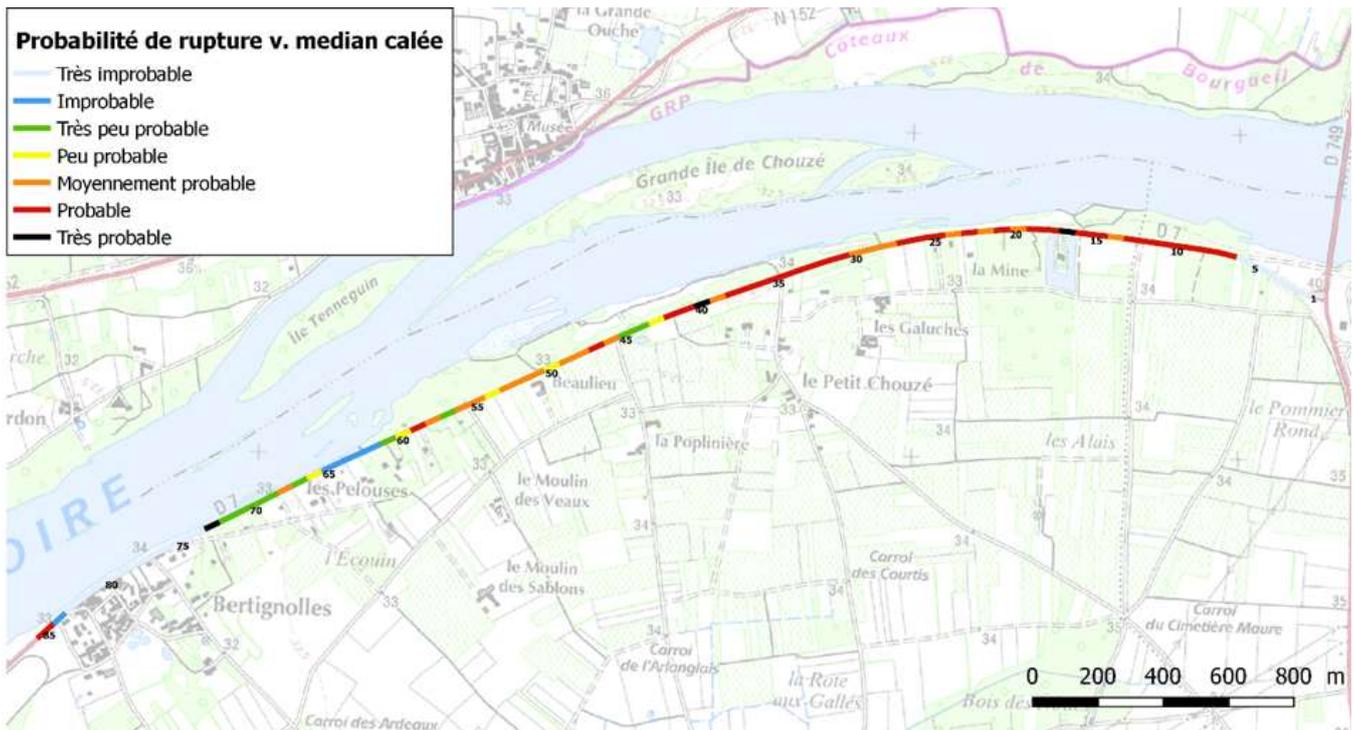


Figure 65\* : Probabilités annuelles tous modes de rupture confondus

Selon le modèle d'aléa de rupture, plusieurs profils présentent une probabilité de défaillance événementielle non négligeable (supérieure à 1 %) dont les causes sont détaillées dans le tableau précédent.

Le risque de rupture est avéré dès la crue de période de retour de 5 ans au droit de 15 profils ce qui représente environ 18 % du linéaire de la digue.

Au final, 64 profils en travers présentent un risque de rupture annuelle non négligeable (supérieure à 0,1%), répartis selon les probabilités suivantes :

- 9 profils présentent une probabilité annuelle de rupture qualifiée de "très peu probable",
- 5 profils présentent une probabilité annuelle de rupture qualifiée de "peu probable",
- 18 profils présentent une probabilité annuelle de rupture qualifiée de "moyennement probable",
- 29 profils présentent une probabilité annuelle de rupture qualifiée de "probable",
- 3 profils présentent une probabilité annuelle de rupture qualifiée de "très probable".

**En conséquence, le niveau de sûreté de la digue de Bertignolles peut donc être rattaché à la crue de période de retour 5 ans.**

Le niveau de protection apparent et de sûreté résultant de la présente étude de dangers sont synthétisés dans le tableau ci-dessous pour le système d'endiguement.

Niveau de protection apparent	Niveau de sûreté
T = 5 ans	T = 5 ans

Tableau 45 : Niveau de protection apparent et niveau de sûreté associés au système d'endiguement du val de Véron

### 8.2.3. Caractérisation des scénarii d'inondation retenus

#### 8.2.3.1. Scénario de brèche n°1 sur la partie amont de la digue (SC1)

Sur la partie située en amont du lieu-dit « la Mine », le profil n°17 présente une probabilité de rupture de 50 % pour la crue de période de retour 5 ans.

Il a été retenu de réaliser une simulation de rupture qui permettra de qualifier la gravité de ce scénario de défaillance dont la brèche est située sur la partie amont de la digue. Ce scénario permettra, en outre, de solliciter la majeure partie du val.

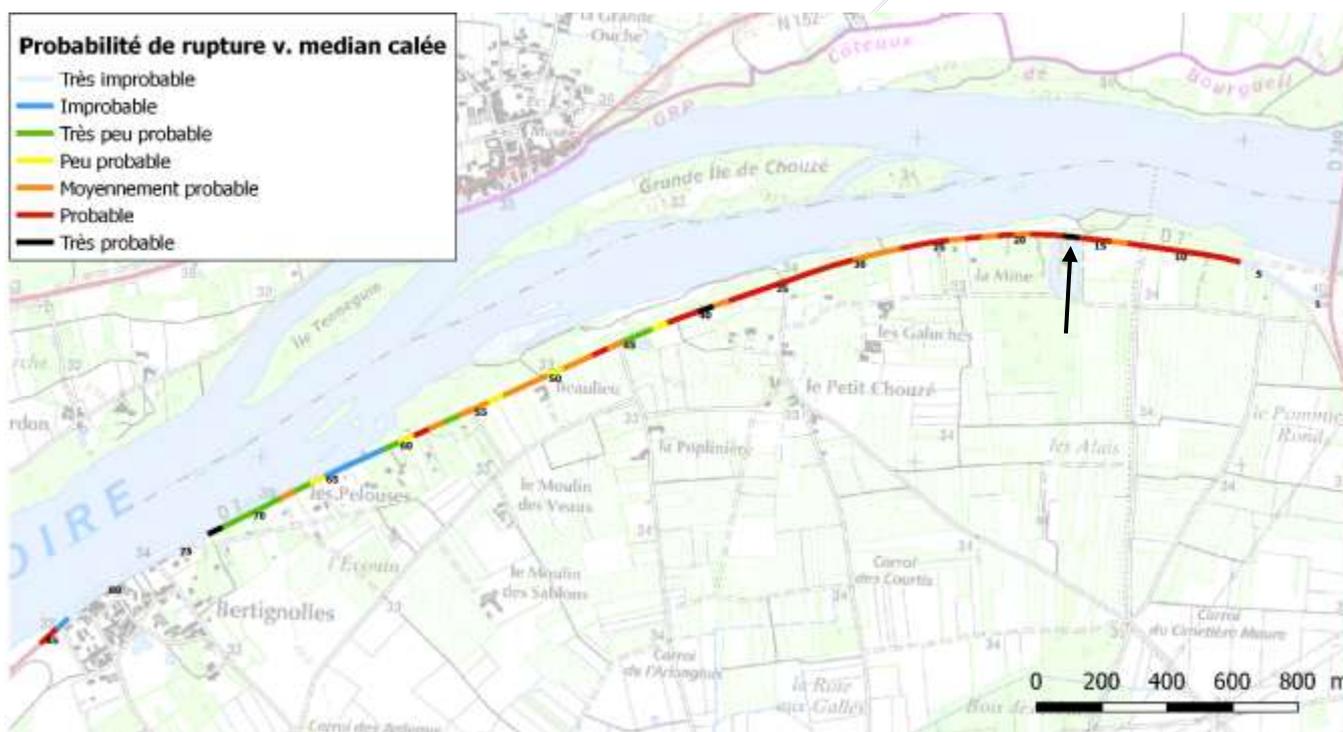


Figure 66\* : Localisation de la simulation de brèche en amont du lieu-dit La Mine

Le profil 17 présente une probabilité de rupture annuelle tous modes confondus non négligeable, principalement due à la présence d'un plan d'eau situé juste à l'arrière de la digue, imposant une hauteur de charge plus importante et à la présence de végétation généralisée, générant un risque d'érosion interne.

Un scénario d'inondation présentant les caractéristiques suivantes sera étudié :

- brèche implantée au droit du profil 17,
- brèche de 100 mètres de large. Cette largeur a été retenue au regard des connaissances des brèches historiques sur la Loire et ses affluents et de la hauteur relativement limitée de la digue de Bertignolles,
- brèche ouvrant la digue sur toute sa hauteur (jusqu'au niveau du terrain naturel côté val) en 2 heures. Il s'agit de la durée habituellement retenue sur la Loire et ses affluents et qui correspond par ailleurs à une situation assez préjudiciable (ouverture rapide de la brèche),
- modélisation de la crue de période de retour 5 ans correspondant sensiblement au niveau de protection apparent du système d'endiguement. La brèche s'ouvre lorsque le niveau de sûreté au droit du profil n°17 est atteint. Celui-ci correspond à une charge hydraulique appliquée à la digue d'environ 2,5 m.

### 8.2.3.2. Scénario de brèche n°2 situé en amont du bourg de Bertignolles (SC2)

Située sur la partie aval de la digue, le profil n°73 présente une forte probabilité de rupture pour la crue de période de retour 5 ans.

Il a été retenu de réaliser une simulation de rupture, qui permettra de qualifier la gravité de ce scénario de défaillance dont la brèche est située à proximité d'une zone d'enjeux, à savoir en amont immédiat du lieu-dit de Bertignolles.

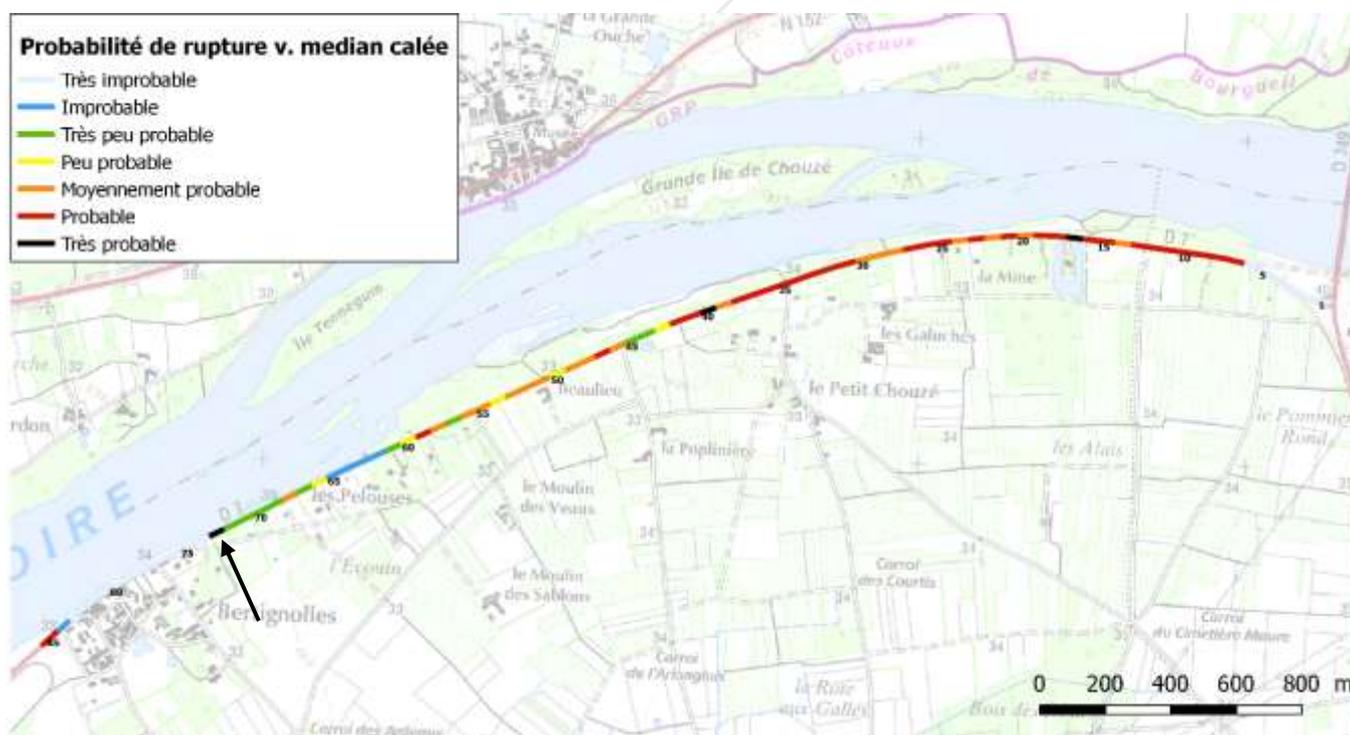


Figure 67\* : localisation de la simulation de brèche en amont du bourg de Bertignolles

Le profil 73 présente une probabilité de rupture annuelle tous modes confondus non négligeable, principalement due à la présence d'une canalisation et à la présence de végétation généralisée, générant un risque d'érosion interne.

Un scénario d'inondation présentant les caractéristiques suivantes sera étudié :

- brèche implantée au droit du profil 73,
- brèche de 100 mètres de large. Cette largeur a été retenue au regard des connaissances des brèches historiques sur la Loire et de ses affluents et de la hauteur relativement limitée de la digue de Bertignolles,
- brèche ouvrant la digue sur toute sa hauteur (jusqu'au niveau du terrain naturel côté val) en 2 heures. Il s'agit de la durée habituellement retenue sur la Loire et ses affluents et qui correspond par ailleurs à une situation assez préjudiciable (ouverture rapide de la brèche),
- modélisation de la crue de période de retour 5 ans correspondant sensiblement au niveau de protection apparent du système d'endiguement. La brèche s'ouvre lorsque le niveau de sûreté au droit du profil n°73 est atteint. Celui-ci correspond à une charge hydraulique appliquée à la digue d'environ 1,0 m.

#### 8.2.4. Synthèse des scénarii d'inondation par défaillance du système retenus

Le tableau ci-dessous synthétise les modélisations de brèches retenues pour évaluer la gravité des scénarios de défaillance. Le scénario n°1 (SC1) permettra d'évaluer la gravité des scénarios sur la partie amont du secteur d'étude tandis que le scénario n°2 (SC2) permettra d'évaluer la gravité des scénarios de défaillance au niveau du lieu-dit de « Bertignolles ».

Numéro de scénario de brèche (numéro de profil)	Secteur concerné	Largeur de la brèche	Durée de la formation de la brèche	Crue déclenchant la brèche	Crue Simulée
SC1 (PT 17)	Amont du lieu-dit « la Mine »	100 m	2 h	Q5	Q5
SC2 (PT 73)	Amont du lieu-dit de « Bertignolles »	100 m	2 h	Q5	Q5

Tableau 46 : Tableau de synthèse des modélisations de brèches retenues

### 8.3. Estimation du risque d'inondation par défaillance du système d'endiguement

#### 8.3.1. Intensité de l'aléa inondation

L'aléa inondation généré par les différents scénarios d'inondation a été calculé à partir des résultats du modèle hydraulique bidimensionnel. Les scénarios de brèche retenus ont été simulés indépendamment les uns des autres. On pourra se référer pour plus de détails à la note spécifique sur l'intensité et la cinétique des inondations (cf. Annexe 14).

### 8.3.1.1. Scénario de brèche n°1 sur la partie amont de la digue (SC1)

La crue de période de retour 5 ans est simulée. Lorsque le niveau de sûreté au droit du profil n° 17 est atteint (cote de 34,40 m NGF), la digue de Bertignolles cède sur une largeur de l'ordre de 100 m.

Le débit maximal théorique entrant dans la zone protégée par la brèche est de l'ordre de 37 m<sup>3</sup>/s. La brèche se déclenche quand le pic de crue est atteint au droit de la brèche.

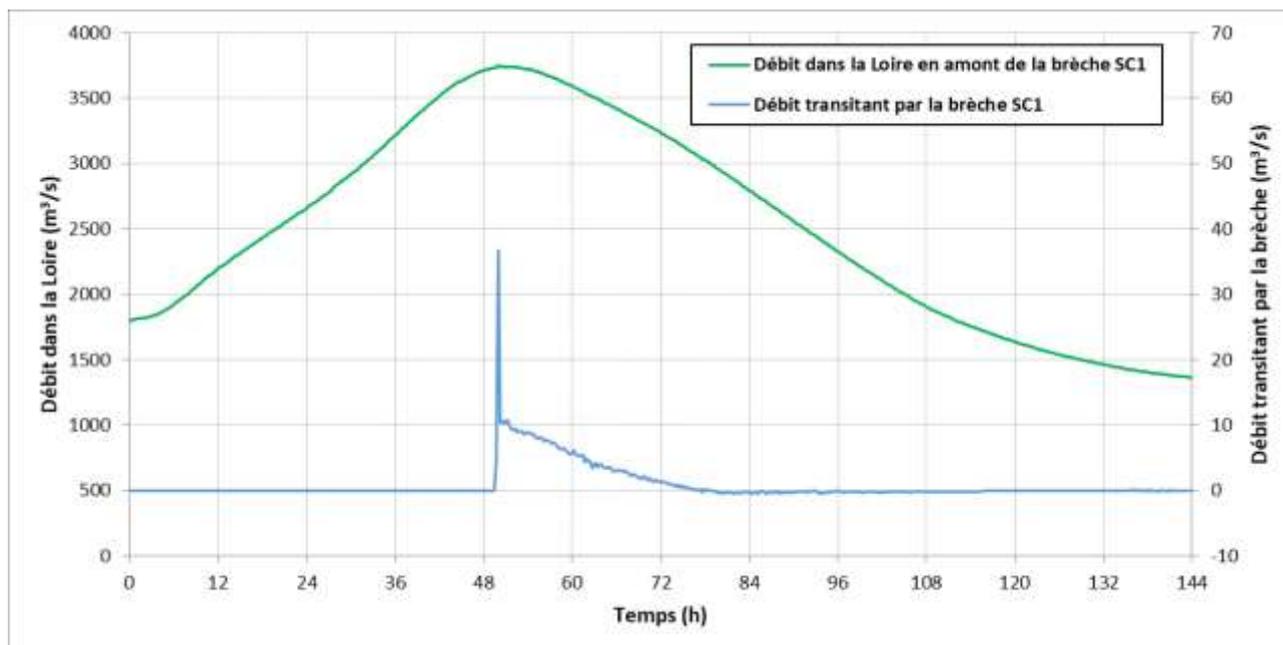


Figure 68 : Débits transitant en amont et au droit de la brèche SC1

Du fait de la création de la brèche, les eaux pénètrent dans la zone protégée et s'étendent vers l'aval via les zones topographiquement plus basses.

Le lieu-dit « les Pelouses » est touché par les inondations environ 12 h après l'ouverture de la brèche.

Globalement, les hauteurs d'eau sont globalement inférieures à 0,5 m dans la zone protégée hormis en aval de la brèche et au niveau des lieux-dits « les Galuches » et « Beaulieu » où les hauteurs d'eau sont supérieures à 1,0 m (cf. Figure 69).

Des vitesses d'écoulements fortes (supérieures à 0,5 m/s) sont observées en aval de la brèche ainsi qu'au niveau du lieu-dit les Pelouses (cf. Figure 70).

En conséquence, l'aléa hydraulique, résultant du croisement entre hauteur d'eau et vitesse d'écoulement, est très fort en aval de la brèche et au droit des lieux-dits « les Galuches », « Beaulieu » et « les Pelouses » (cf. Figure 71).

Les figures ci-après présentent les hauteurs d'eau maximales et les vitesses d'écoulement observées ainsi que l'aléa hydraulique en résultant, calculé selon la grille présentée précédemment.

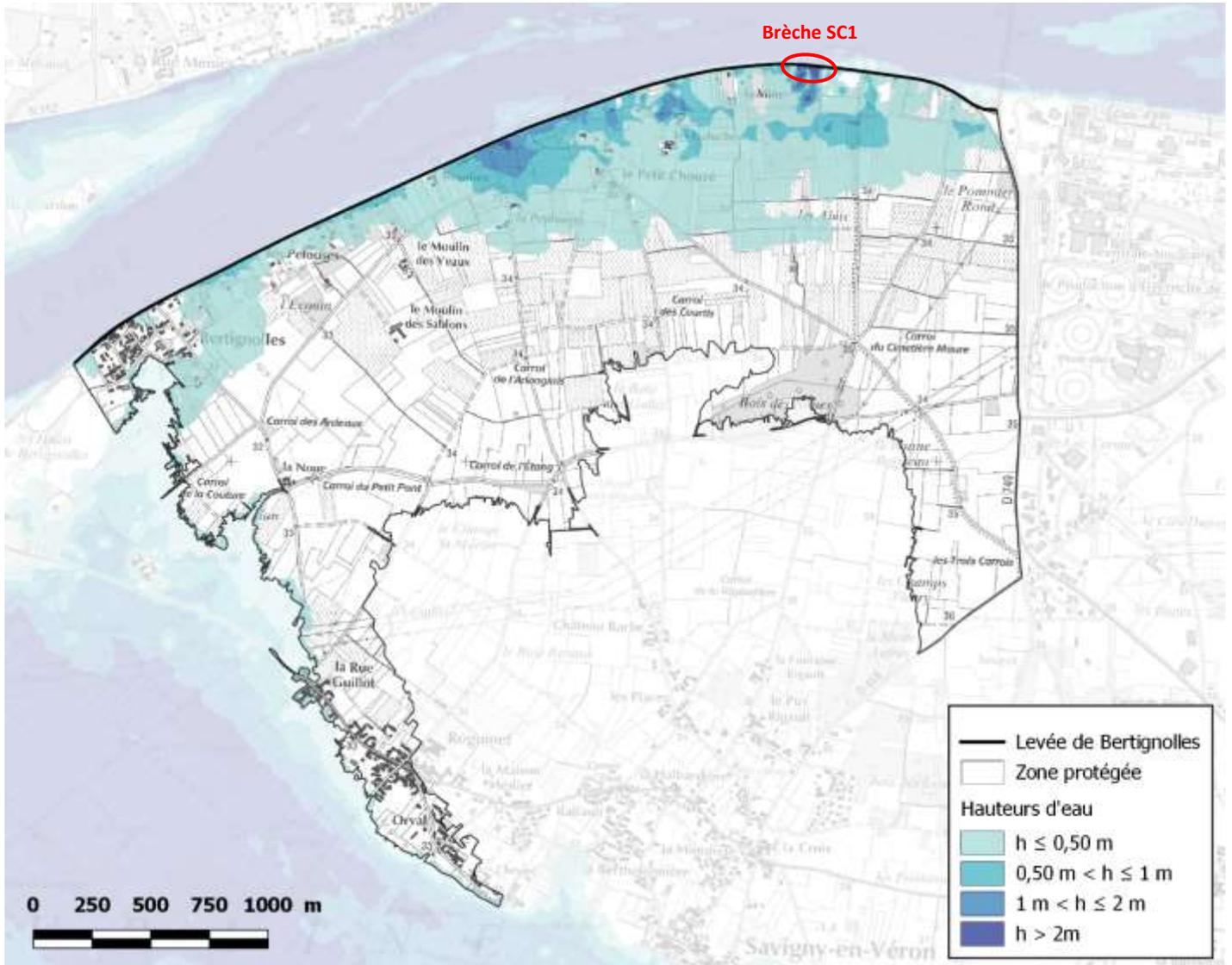


Figure 69\* : Scénario de brèche en amont du lieu-dit « la Mine » (SC1) – Carte des hauteurs d'eau maximales

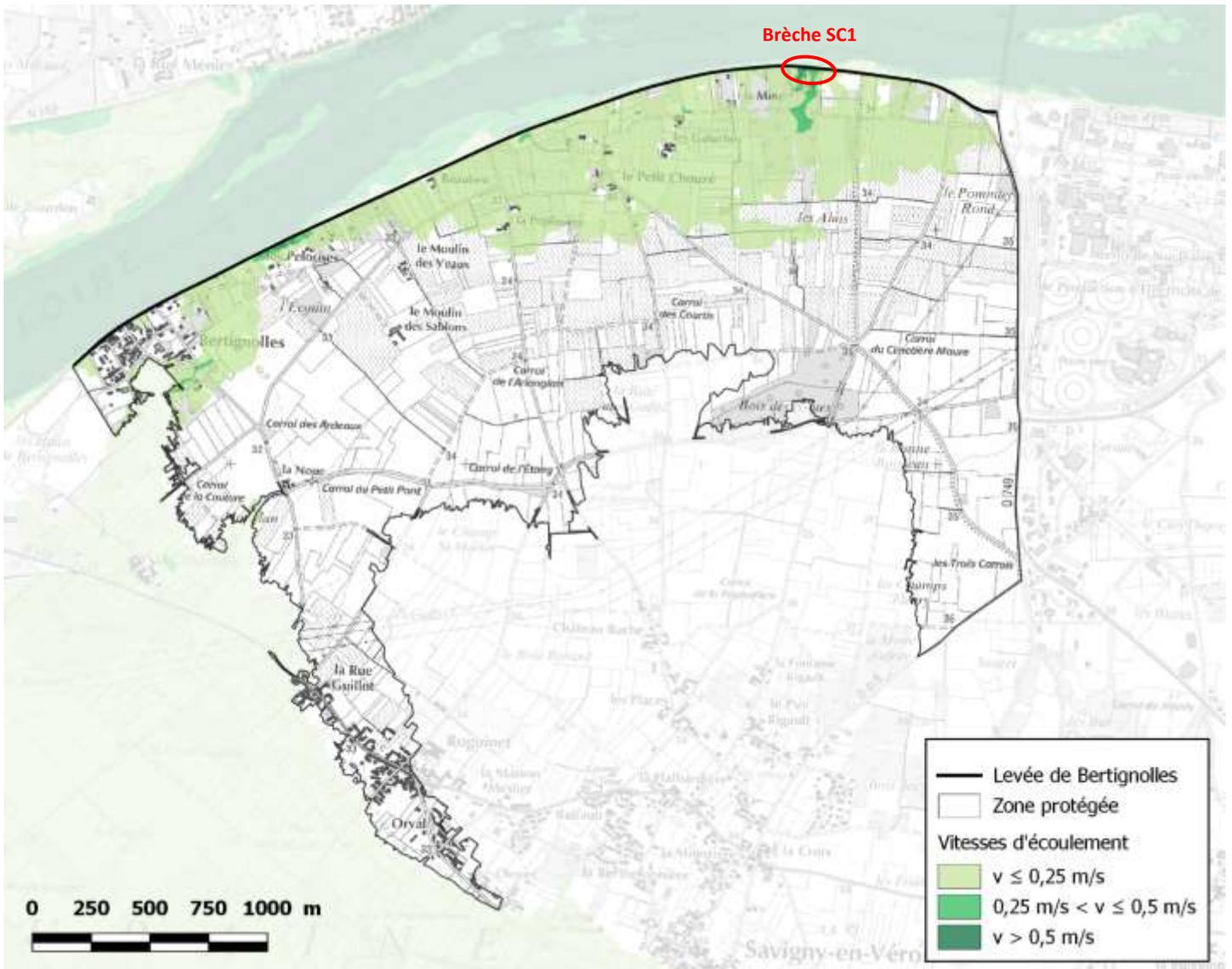


Figure 70\* : Scénario de brèche en amont du lieu-dit « la Mine » (SC1) – Carte des vitesses d'écoulement maximales

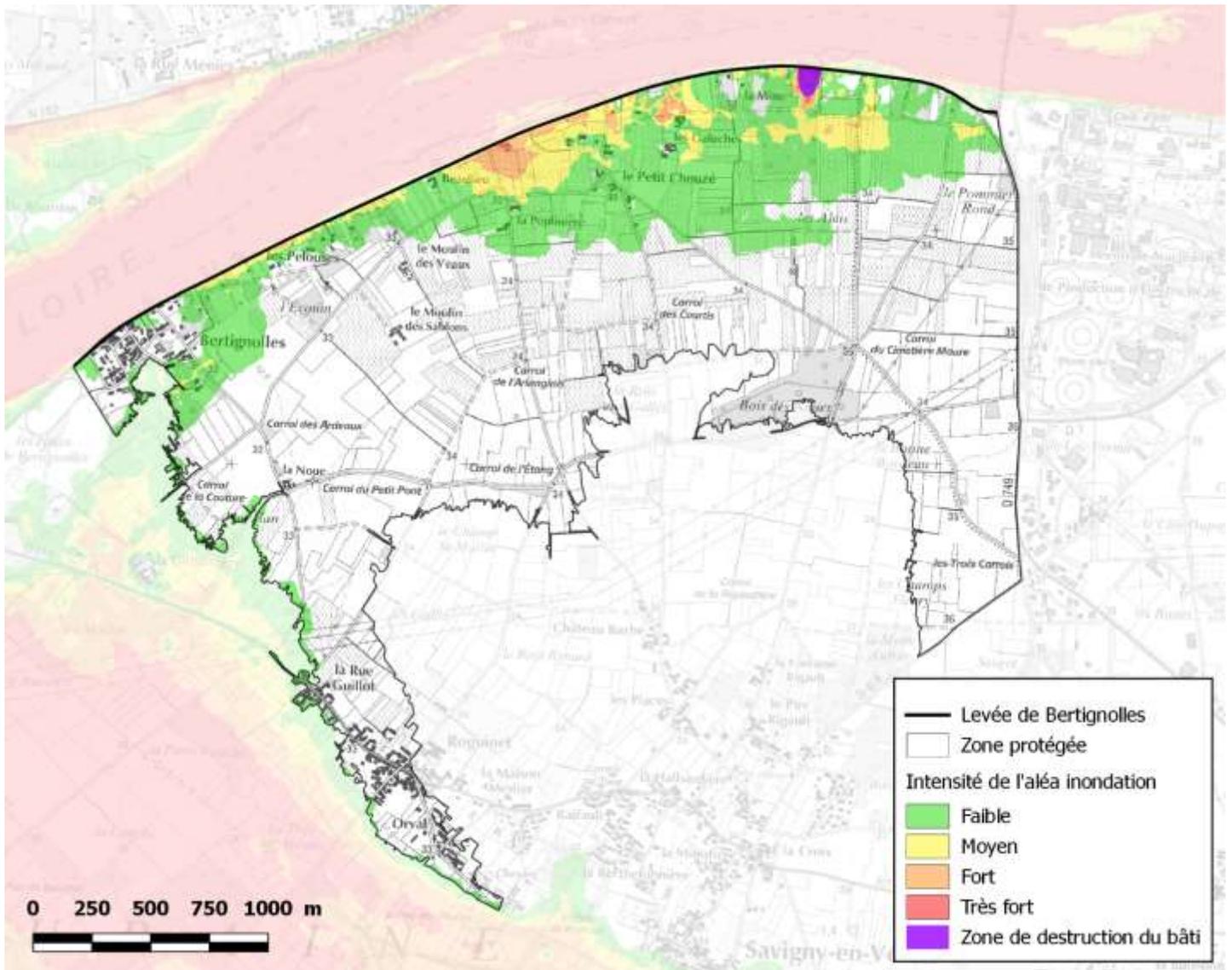
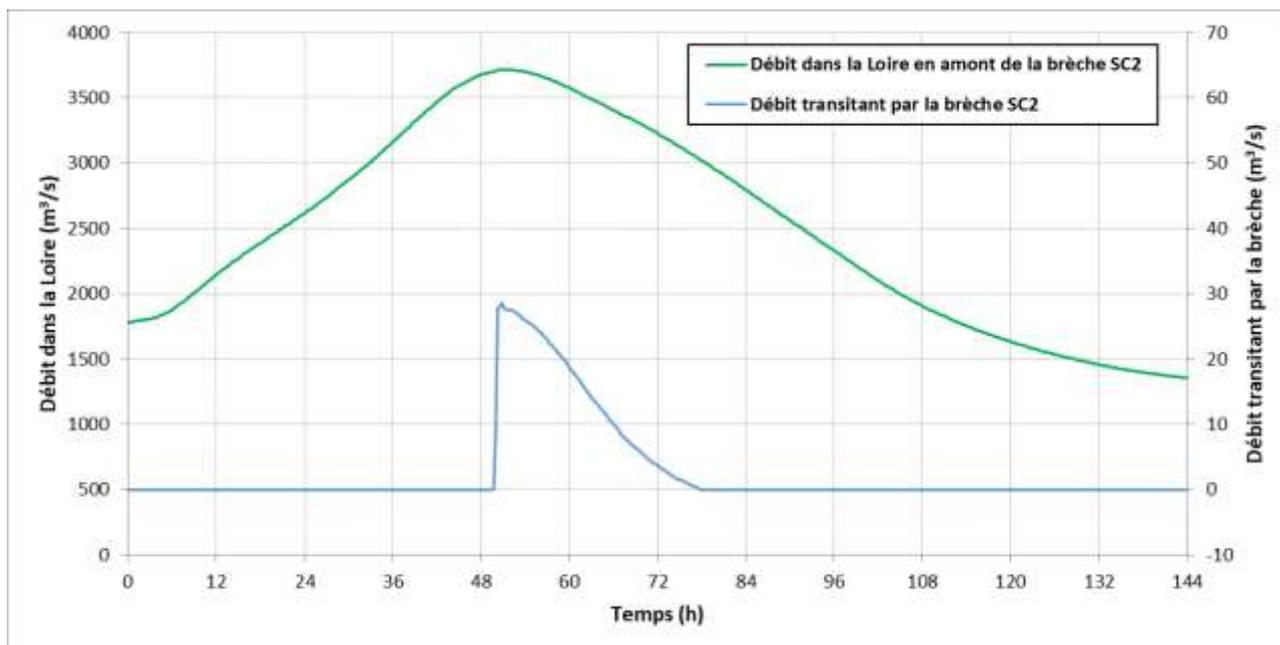


Figure 71\* : Scénario de brèche en amont du lieu-dit « la Mine » (SC1) – Carte de l'intensité de l'aléa hydraulique

8.3.1.2. Scénario de brèche situé en amont du bourg de Bertignolles (SC2)

La crue de période de retour 5 ans est simulée. Lorsque le niveau de sûreté au droit du profil n° 73 est atteint (cote de 33,28 m NGF), la ligne de défense principale cède sur une largeur de l'ordre de 100 m.

Le débit maximal théorique entrant dans la zone protégée par la brèche est de l'ordre de 29 m<sup>3</sup>/s. La brèche se déclenche quand le pic de crue est atteint au droit de la brèche.



**Figure 72 : Débits transitant en amont et au droit de la brèche SC2**

Du fait de la création de la brèche, les eaux pénètrent dans la zone protégée et s'étendent vers l'aval via les zones topographiquement plus basses. On notera par ailleurs que des surverses ont lieu en partie amont de la digue de Bertignolles.

Le lieu-dit de « Bertignolles » est partiellement touché par les inondations environ ½ h après l'ouverture de la brèche.

Globalement, les hauteurs d'eau sont globalement inférieures à 0,5 m dans la zone protégée hormis en aval de la brèche et aux droits de zones topographiquement basses en amont de la zone protégée où les hauteurs d'eau sont localement supérieures à 1,0 m (cf. Figure 73).

Des vitesses d'écoulements fortes (supérieures à 0,5 m/s) sont observées en aval de la brèche ainsi qu'au niveau du lieu-dit de Bertignolles (cf. Figure 74).

En conséquence, l'aléa hydraulique, résultant du croisement entre hauteur d'eau et vitesse d'écoulement, est très fort en aval de la brèche et localement fort au droit du lieu-dit de Bertignolles et de zones topographiquement basses (cf. Figure 75).

Les figures ci-après présentent les hauteurs d'eau maximales et les vitesses d'écoulement observées ainsi que l'aléa hydraulique en résultant, calculé selon la grille présentée précédemment.

Conseil Départemental d'Indre-et-Loire (CD 37)  
 Étude de dangers de la digue de Bertignolles - Rapport A 85656 vA

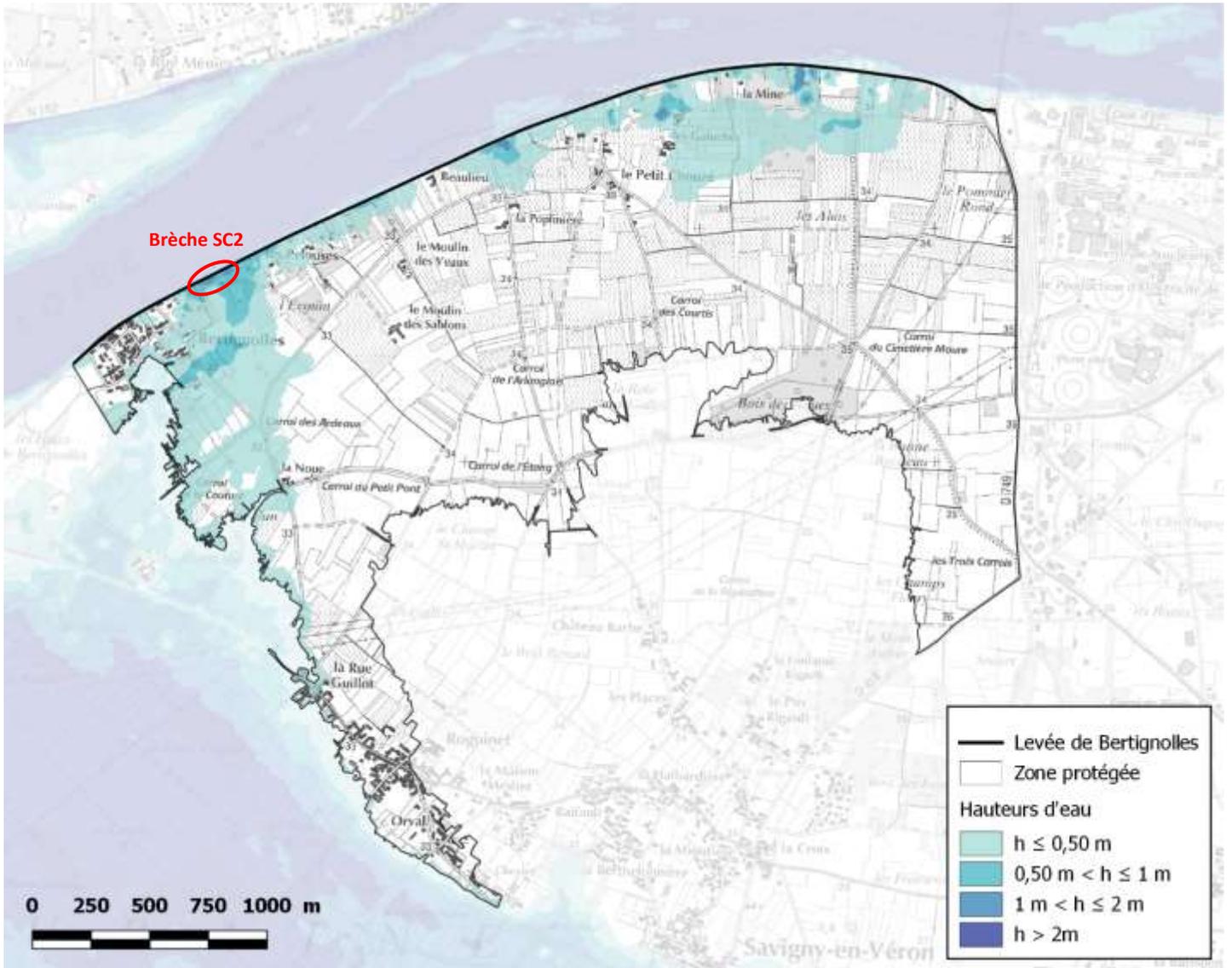


Figure 73\* : Scénario de brèche en amont du bourg de Bertignolles (SC2) – Carte des hauteurs d'eau maximales

Conseil Départemental d'Indre-et-Loire (CD 37)  
 Étude de dangers de la digue de Bertignolles - Rapport A 85656 vA

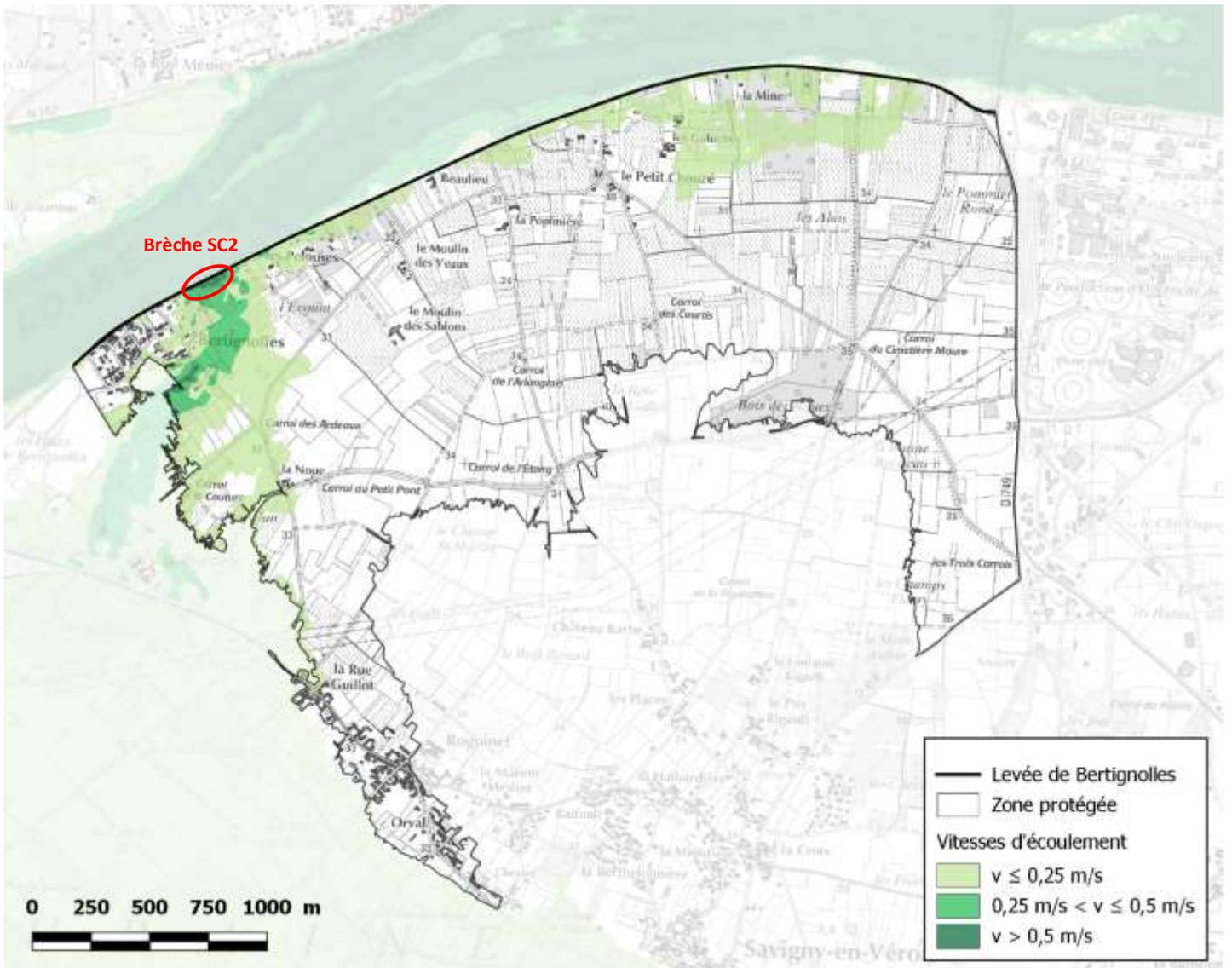


Figure 74\* : Scénario de brèche en amont du bourg de Bertignolles (SC2) – Carte des vitesses d'écoulement maximales

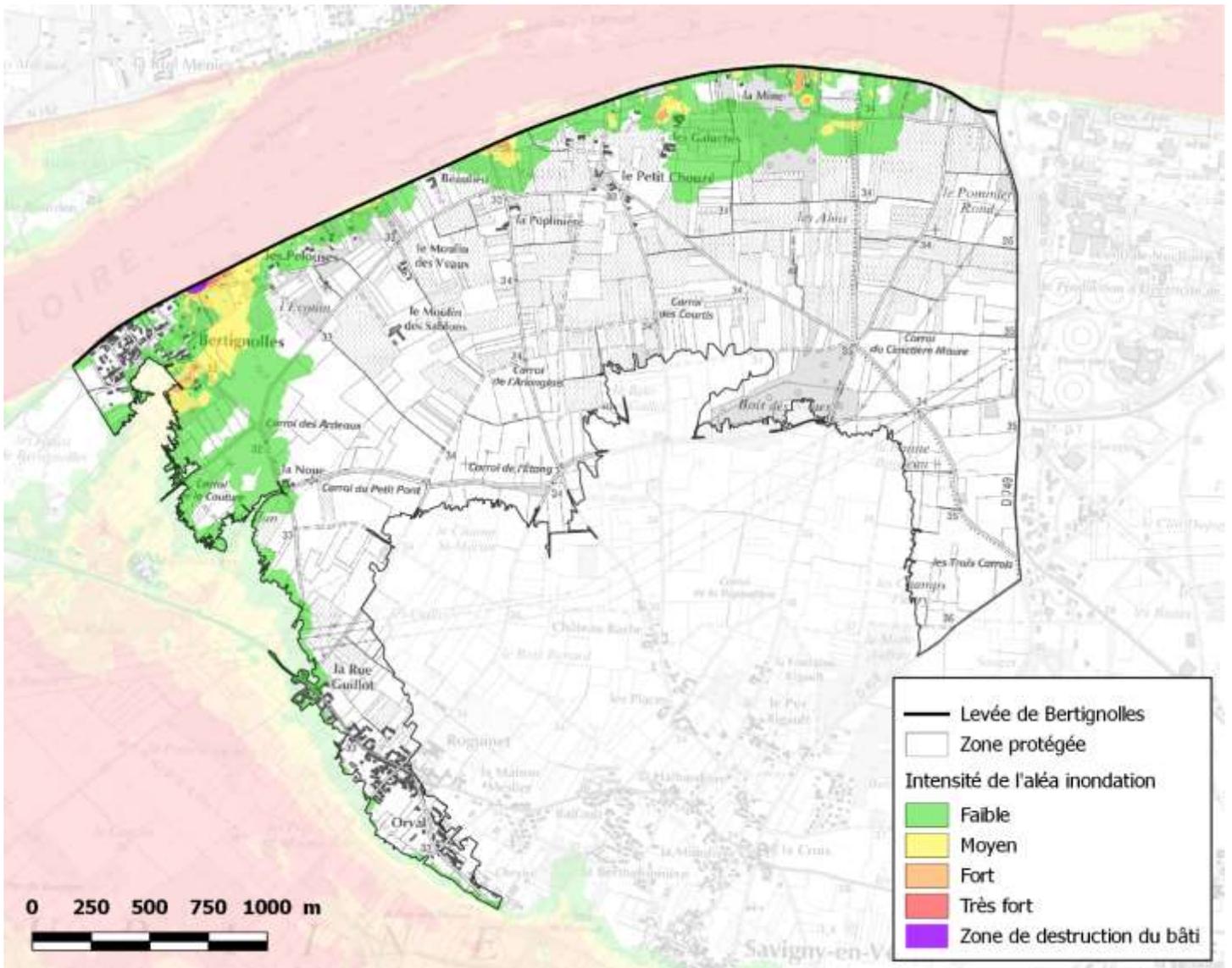


Figure 75\* : Scénario de brèche en amont du bourg de Bertignolles (SC2) – Carte de l'intensité de l'aléa hydraulique

### 8.3.2. Vulnérabilité des enjeux

La vulnérabilité des enjeux vis-à-vis des scénarii d'inondation par défaillance est évaluée selon la méthode présentée au paragraphe 8.1.2.3 (cf. Tableau 40 et Tableau 41). Elle s'appuie sur le comptage de la population susceptible d'être en danger du fait de la défaillance de la digue.

**Les valeurs de population concernée et de population susceptible d'être en danger fournies dans les paragraphes ci-après ne constituent que des estimations. Les valeurs n'ont pas été arrondies.**

### 8.3.2.1. Scénario de brèche n°1 en amont du lieu-dit « la Mine » (SC1)

Le comptage de la population résidente et des usagers de la route susceptibles d'être en danger du fait de la défaillance de la levée du val de Véron en amont du lieu-dit La Mine et pour un évènement d'occurrence 5 ans est présenté dans le tableau ci-dessous.

	Zone de destruction du bâti		Aléa très fort		Aléa fort		Aléa moyen		Aléa faible		TOTAL	
	pop. concernée	pop. en danger	pop. concernée	pop. en danger	pop. concernée	pop. en danger	pop. concernée	pop. en danger	pop. concernée	pop. en danger	pop. concernée	pop. en danger
NB hab. R0	1	1	0	0	0	0	2	0	45	0	48	1
NB hab. R1	1	1	0	0	0	0	2	0	27	0	30	1
NB hab. R2 et +	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NB pers routes	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	5	0
<b>TOTAL</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>77</b>	<b>0</b>	<b>83</b>	<b>2</b>

**Tableau 47 : Estimation de la population impactée pour le scénario de brèche étudié en amont du lieu-dit « la Mine » pour un évènement d'occurrence 5 ans**

Par ailleurs, aucune entreprise présente au sein de la zone protégée de la levée du val de Véron n'est susceptible d'être impactée en cas de défaillance de cette dernière en amont du lieu-dit « la Mine ».

Enfin, parmi les enjeux sensibles présents au sein de la zone protégée de la levée du val de Véron (ERP, ICPE, établissement de gestion de crise), aucun n'est susceptible d'être impacté en cas de défaillance de cette dernière en amont du lieu-dit « la Mine ».

### 8.3.2.2. Scénario de brèche n°2 situé en amont du bourg de Bertignolles (SC2)

Le comptage de la population résidente et des usagers de la route susceptibles d'être en danger du fait de la défaillance de la levée du val de Véron en amont du bourg de Bertignolles et pour un évènement d'occurrence 5 ans est présenté dans le tableau ci-dessous.

	Zone de destruction du bâti		Aléa très fort		Aléa fort		Aléa moyen		Aléa faible		TOTAL	
	pop. concernée	pop. en danger	pop. concernée	pop. en danger	pop. concernée	pop. en danger	pop. concernée	pop. en danger	pop. concernée	pop. en danger	pop. concernée	pop. en danger
NB hab. R0	0	0	0	0	0	0	4	0	24	0	28	0
NB hab. R1	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	12	0
NB hab. R2 et +	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NB pers routes	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	4	0
<b>TOTAL</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>40</b>	<b>0</b>	<b>44</b>	<b>0</b>

**Tableau 48 : Estimation de la population impactée pour le scénario de brèche étudié en amont du bourg de Bertignolles pour un évènement d'occurrence 5 ans**

Par ailleurs, aucune entreprise présente au sein de la zone protégée de la levée du val de Véron n'est susceptible d'être impactée en cas de défaillance de cette dernière en amont du bourg de Bertignolles.

Enfin, parmi les enjeux sensibles présents au sein de la zone protégée de la levée du val de Véron (ERP, ICPE, établissement de gestion de crise), aucun n'est susceptible d'être impacté en cas de défaillance de cette dernière en amont du bourg de Bertignolles.

### 8.3.3. Gravité des conséquences des scénarios d'inondation étudiés

La gravité des scénarii d'inondation étudiés est évaluée selon la méthode présentée au paragraphe 8.1.2.3.

Numéro du profil	Scénario d'inondation	Population concernée	Population en danger	Enjeux sensibles concernés	Gravité du scénario
PT 17	Brèche en amont du lieu-dit « la Mine » (SC1)	83	2	0	Modéré
PT 73	Brèche en amont du bourg de Bertignolles (SC2)	44	0	0	Modéré

**Tableau 49 : Gravité des scénarii d'inondation par défaillance considérés**

### 8.3.4. Criticité des scénarios

Le croisement de la gravité d'un scénario d'inondation par sa probabilité d'apparition permet d'en déduire sa criticité.

Scénario d'inondation	Probabilité annuelle d'apparition du scénario d'inondation		Gravité du scénario d'inondation	Criticité du scénario d'inondation
	Probabilité	Niveau		
Brèche en amont du lieu-dit « la Mine » (SC1)	9,52 %	Probable	Modéré	Risque préoccupant
Brèche en amont du bourg de Bertignolles (SC2)	15,24 %	Très probable	Modéré	Risque préoccupant

Tableau 50 : Criticité des scénarios d'inondation par défaillance considérés

Pour mémoire, ces niveaux de risque résultent toutefois de la modélisation de scénarios ponctuels associés à des hypothèses déterminées.

**La présente étude de dangers montre que les scénarios d'inondation sur la levée du val de Véron conduisent à un risque préoccupant.**

Au regard de cette conclusion et dans l'objectif d'atteindre un niveau de risque aussi bas que possible, un programme de mesures de réduction du risque est proposé et décrit dans le chapitre 9.

Criticité des scénarios		Probabilité annuelle des scénarios						
		0,01 %	0,1 %	0,2 %	0,5 %	1 %	10 %	
		Très improbable	Improbable	Très peu probable	Peu probable	Moyennement probable	Probable	Très probable
Gravité du scénario d'inondation	5. Désastreux	Risque acceptable			Risque préoccupant		Risque intolérable	
	4. Catastrophique	Risque acceptable			Risque préoccupant		Risque intolérable	
	3. Important	Risque acceptable			Risque préoccupant		Risque intolérable	
	2. Sérieux	Risque acceptable			Risque préoccupant		Risque intolérable	
	1. Modéré	Risque acceptable			Risque préoccupant		SC1	SC2

Tableau 51 : Matrice de criticité avec les scénarios d'inondation par défaillance considérés

## 9. Étude de réduction des risques

### 9.1. Réduction des risques par des mesures de gestion

#### 9.1.1. Mesures à mettre en œuvre par le gestionnaire

##### 9.1.1.1. Classement des ouvrages

La réglementation relative à la sécurité des ouvrages hydrauliques a évolué récemment, via la parution du décret n°2015-526 du 12 mai 2015 relatif aux règles applicables aux ouvrages construits ou aménagés en vue de prévenir les inondations et aux règles de sûreté des ouvrages hydrauliques.

Ce décret, dont la publication est postérieure à l'arrêté préfectoral de classement de l'ouvrage et au démarrage de la présente étude de dangers, modifie notamment les règles de classement des systèmes d'endiguement.

Selon le décret du 12 mai 2015, les classes sont déterminées de la façon suivante :

- *« Classe A : population protégée par le système d'endiguement ou l'aménagement hydraulique > 30 000 personnes,*
- *Classe B : population protégée par le système d'endiguement ou l'aménagement hydraulique comprise entre 3 000 et 30 000 personnes,*
- *Classe C : population protégée par le système d'endiguement ou l'aménagement hydraulique comprise entre 30 et 3 000 personnes.*

*La population protégée correspond à la population maximale exprimée en nombre d'habitants qui résident et travaillent dans la zone protégée, en incluant notamment les populations saisonnières.*

*La classe d'une digue, est celle du système d'endiguement dans lequel elle est comprise. N'est toutefois pas classée la digue dont la hauteur, mesurée verticalement entre le sommet de l'ouvrage et le terrain naturel du côté de la zone protégée à l'aplomb de ce sommet, est inférieure à 1,5 mètre, à moins que la commune ou l'établissement public de coopération intercommunale à fiscalité propre compétent pour la prévention des inondations le demande. »*

Au regard de cette nouvelle réglementation, il est proposé que le gestionnaire adresse au Préfet une demande de révision de l'arrêté préfectoral de classement du système d'endiguement du val de Véron.

La population protégée est évaluée à 327 habitants et 254 personnes travaillant dans la zone protégée (cf. §3.2.4.6), soit 581 personnes environ au total. Dans ces conditions, ce système d'endiguement relève de la classe C selon le décret du 12 mai 2015.

En outre, le nouvel arrêté permettra de redéfinir les limites du système d'endiguement selon l'analyse réalisée et présentée dans le Tableau 3 en page 28.

### 9.1.1.2. Surveillance de l'ouvrage

Les consignes écrites et documents d'organisation du gestionnaire ont été approuvées par arrêté préfectoral le 26 octobre 2016.

Le CD 37, en tant que gestionnaire, prévoit actuellement d'assurer une surveillance en crue de la levée de Bertignolles jusqu'à une « crue forte » correspondant à 6,0 m à l'échelle de Langeais dans l'objectif notamment d'assurer la sécurité de ses agents (cf. Figure 42).

Au regard des conclusions de la présente étude de dangers ainsi que des préconisations émises par le groupe de travail de la DREAL Centre - Val de Loire concernant le plan de surveillance des levées, il est proposé de renforcer la surveillance de la levée :

- surveillance hors crue, durant laquelle des tournées d'inspection visuelle seront réalisées selon une fréquence trimestrielle,
- surveillance en crue de niveau N1, pour lequel une surveillance de jour sera assurée. La levée doit pouvoir être inspectée au moins 2 fois par jour. Une équipe de deux personnes au minimum sera affectée à cette surveillance,
- surveillance en crue de niveau N2, pour lequel une surveillance jour et nuit sera assurée. 4 passages par 24 heures devront être réalisés. Le binôme prévu pour la surveillance de jour devra être renforcé par une troisième personne pour les inspections de nuit. Le niveau N2 doit permettre une organisation renforcée préalablement à l'atteinte du niveau de protection.

<b>Niveau de protection</b>	T = 5 ans
<b>Niveau N2</b>	T = 2 ans
<b>Niveau N1</b>	T = 1 ans

**Tableau 52 : Niveaux de surveillance N1 et N2 proposés**

A noter que la mise en œuvre de la surveillance de l'ouvrage est rendue particulièrement difficile par le fait que les seuils de déclenchement des différents niveaux de surveillance sont relativement bas et rapprochés les uns des autres.

Les tableaux et figures suivantes présentent les conditions de sollicitation du système d'endiguement pour les crues suivantes :

	<b>Pont de Port Boulet</b>	<b>Pont de Langeais<sup>15</sup></b>	
<b>T = 2 ans</b>	2 830 m <sup>3</sup> /s	2 720 m <sup>3</sup> /s	40,16 m NGF
<b>T = 5 ans</b>	3 750 m <sup>3</sup> /s	3 565 m <sup>3</sup> /s	40,96 m NGF

**Tableau 53 : Débits de pointe de la Loire à Port Boulet et Langeais pour une période de retour de 2 ans et 5 ans**

<sup>15</sup> Avec une hypothèse de débit de pointe d'Indre de l'ordre de 140 m<sup>3</sup>/s pour T= 2 ans et 190 m<sup>3</sup>/s pour T = 5 ans et un débit de pointe de la Vienne de l'ordre de 780 m<sup>3</sup>/s pour T= 2 ans et 985 m<sup>3</sup>/s pour T = 5 ans

Conseil Départemental d'Indre-et-Loire (CD 37)  
 Étude de dangers de la digue de Bertignolles - Rapport A 85656 vA

Au regard de ces éléments, le gestionnaire pourra adapter la surveillance prévue sur la levée et mobiliser le personnel nécessaire en fonction du degré de sollicitation hydraulique.

Charge hydraulique moyenne	Charge hydraulique maximale	Linéaire de digue mis en charge
0,2 m	1,7 m	1 800 m / 4 250 m (42 %)

Tableau 54 : Conditions de sollicitation du système d'endiguement pour une crue T = 2 ans

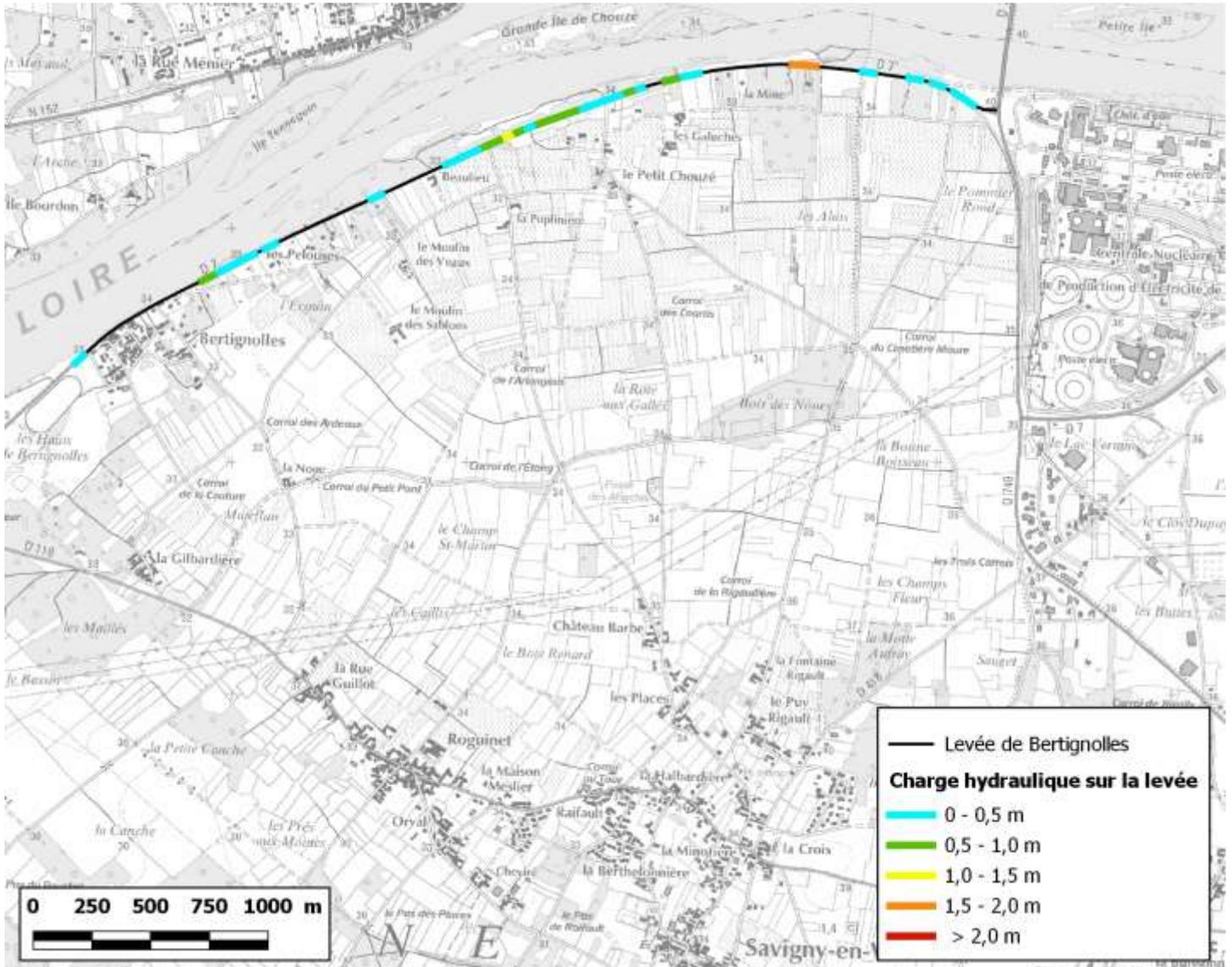


Figure 76\* : Sollicitation du système d'endiguement pour une crue T = 2 ans

Conseil Départemental d'Indre-et-Loire (CD 37)  
Étude de dangers de la digue de Bertignolles - Rapport A 85656 vA

Charge hydraulique moyenne	Charge hydraulique maximale	Linéaire de digue mis en charge
0,8 m	2,5 m	3 750 m / 4 250 m (88 %)

Tableau 55 : Conditions de sollicitation du système d'endiguement pour une crue T = 5 ans

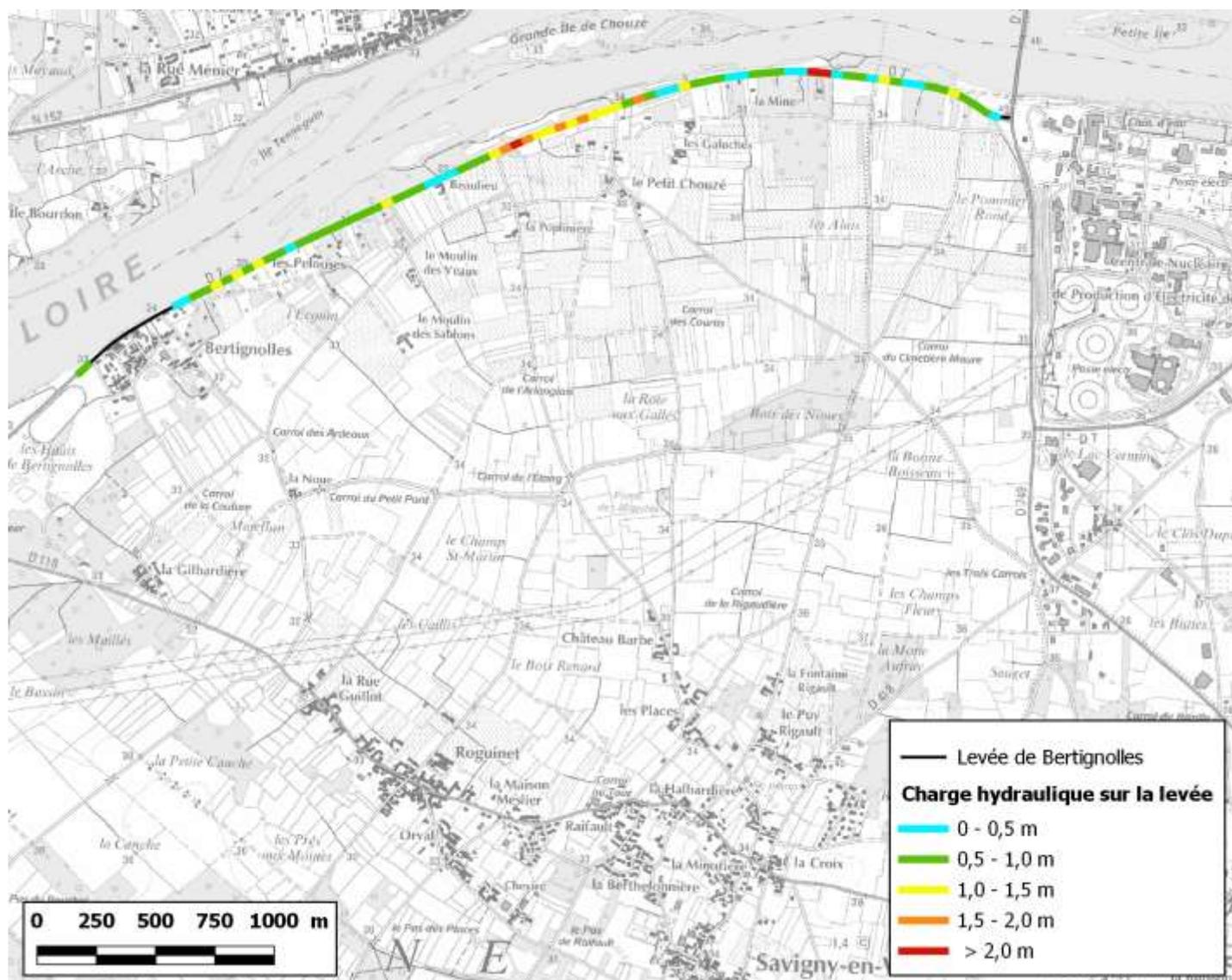


Figure 77\* : Sollicitation du système d'endiguement pour une crue T = 5 ans

La surveillance en crue devra notamment permettre de détecter d'éventuelles amorces de renards hydrauliques (fuites dans le corps de digue). Elle devra être particulièrement axée sur les points de sensibilité de la levée : zones de terriers de blaireaux, canalisations traversantes, anomalies recensées lors des VTA.

Ces éléments devront être intégrés dans les consignes écrites du gestionnaire. Elles devront aborder l'ensemble des points régissant l'organisation de la surveillance. On peut notamment soulever les questionnements suivants :

- Comment se fait la mobilisation de personnel, est-il prévu d'avoir recours à des renforts ?
- Comment se fait la formation des agents susceptibles d'être mobilisés en cas d'activation de la surveillance en crue ?
- Quelle est la procédure de remontée d'un désordre majeur ? Qui décide de la marche à suivre en cas d'urgence ?
- Quelles sont les conditions d'intervention en termes de sécurité des agents ?
- Quel est le mode de fonctionnement avec les autres gestionnaires qui gèrent les digues sur le secteur d'étude ?
- Quelle est l'articulation prévue avec les autres acteurs de la sécurité civile ?

Il conviendra de prévoir dans les consignes, des mesures d'astreinte afin d'assurer la disponibilité des agents ainsi que la réalisation d'exercices internes réguliers afin de rendre l'activation des niveaux N1 et N2 la plus efficace possible.

Les consignes de surveillance devront également anticiper les actions à mettre en place en cas de détection d'anomalies sur la levée ou à ses abords, aussi bien en période normale qu'en cas de crue. Les besoins en matériels permettant d'intervenir en urgence pendant la crue devront notamment être abordés (batardeaux, sacs de sable, ciment, big-bags, etc.) afin de constituer les stocks nécessaires. L'itinéraire à emprunter pour accéder aux lieux de stockage devra également être réfléchi au regard de la connaissance de l'incidence d'une crue sur les axes de circulation.

#### 9.1.1.3. Points de surveillance spécifiques

##### ❖ **Surveillance particulière des canalisations**

Les canalisations font l'objet d'une mesure structurelle décrite dans le paragraphe 9.2.1.1 en page 154. Dans l'attente de la mise en œuvre de cette mesure et dans les cas où des canalisations subsisteraient à la suite de cette mesure, il est préconisé de mettre en œuvre une surveillance particulière de ces points singuliers en période de crue, afin de déceler tout indice de fuite pouvant traduire l'érosion du corps de digue.

##### ❖ **Bâtiments encastrés**

Des bâtiments encastrés ont été recensés dans le système d'endiguement. La présence de caves est suspectée dans un certain nombre d'entre eux.

Une reconnaissance complémentaire est prévue sur ce point (cf. paragraphe 9.2.1.3). Toutefois, une surveillance particulière devra être réalisée dans la mesure du possible au droit de ces ouvrages. Dans ce cadre, une prise de contact et une sensibilisation des riverains concernés serait utile pour faciliter l'accès et la surveillance de ces bâtiments.

##### ❖ **Présence d'animaux fouisseurs**

La digue de Bertignolles est relativement sujette à la problématique de présence d'animaux fouisseurs notamment sur sa partie centrale à l'amont du lieu-dit « Beaulieu »

(cf. Figure 35). Il est préconisé de mettre en œuvre une surveillance particulière au niveau des secteurs concernés en période de crue, afin de déceler tout indice de fuite pouvant traduire l'érosion du corps de digue.

#### 9.1.1.4. Entretien de l'ouvrage

Une attention particulière devra être apportée à l'entretien réalisé sur l'ouvrage.

Dans le cadre de sa mission, le CD 37 assure tout au long de l'année l'entretien de la digue de Bertignolles. Il effectue ainsi au minimum un fauchage annuel sur toute la hauteur de la digue.

Ce niveau d'entretien devra être maintenu sur la levée. Il pourra être prolongé par un dessouchage au cas par cas des arbres abattus ou des souches restantes avec reprise complète du corps de digue.

Pour rappel, certains secteurs présentant une végétation dense et/ou la présence de propriétés privées clôturées, le talus et/ou le pied de digue n'ont pas pu être inspectés de manière détaillée.

L'entretien prévu sur le système d'endiguement devra être mis en relation avec les conclusions des rapports de surveillance. Le cas échéant, il sera revu pour s'adapter à l'évolution de l'ouvrage.

#### 9.1.1.5. Entretien et restauration du lit de la Loire

La Loire au droit du val de Véron possède une dynamique fluviale spécifique. Celle-ci se traduit par une certaine respiration en plan du lit mineur actif et une dynamique sédimentaire relativement importante.

Cette étude morphologique réalisée entre les années 1850 et 2011 met en évidence qu'une partie du linéaire de digue étudiée est relativement soumise au risque d'érosion externe de la Loire compte tenu de son contact direct avec le cours d'eau notamment en partie aval.

Il est ainsi important de poursuivre un entretien régulier de la végétation présente dans le lit de la Loire, afin d'éviter la végétalisation massive et la pérennisation des îles et bancs, qui conduiraient à déséquilibrer la dynamique sédimentaire ainsi qu'à une réduction de la capacité hydraulique de la Loire (augmentant donc la charge subie par la levée).

#### 9.1.1.6. Gestion d'usage de la digue

La levée du val de Véron fait partie du Domaine Public Fluvial (DPF). A ce titre, elle peut être utilisée pour satisfaire différents usages :

- accès unique à des parcelles enclavées via des rampes d'accès,

- canalisations traversantes d'eaux pluviales, pour irrigation ou réseaux divers (gaz, électricité, etc.),
- aménagements faits par les riverains (clôtures, haies, remblai, etc.),
- voies de circulation supportées par les digues et chemins de service.

Tous ces usages doivent être encadrés par le propriétaire - gestionnaire en instruisant les dossiers de demande correspondants. Selon les cas, il leur revient d'attribuer des Autorisations d'Occupation Temporaire (AOT) ou de contractualiser des conventions de superposition d'affectation. Chaque propriétaire s'assure, lors de l'instruction, que les aménagements ou l'utilisation des lieux envisagés sont sans impact sur la pérennité des digues, leur niveau de protection et les conditions de surveillance. Les contraintes à respecter et les points de vigilance pour le pétitionnaire doivent être clairement spécifiés, soit dans l'arrêté préfectoral d'AOT, soit dans les conventions signées par les deux parties.

Dans le cadre des conventions, une attention particulière devra être apportée à la nature du trafic autorisé à circuler sur la voie portée (tonnage notamment).

Une surveillance est également exercée durant toute la vie des AOT (5 ans), 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.2124-18 relatif aux règles spécifiques à la Loire et à son système d'endiguement).

#### ❖ **Canalisations traversantes**

Les résultats de la présente étude de dangers montrent les effets préjudiciables des canalisations traversantes sur la tenue de la levée en cas de crue.

Une action conjointe préventive devra être menée afin de limiter au maximum toute implantation nouvelle de canalisations dans la digue. Toute nouvelle demande de canalisation devra être argumentée afin de démontrer qu'il n'existe pas d'alternative technique. Des techniques non préjudiciables ou adaptées à l'objectif de sécurité de la digue devront être retenues. Elles seront définies en lien avec les services spécialisés. Les travaux seront suivis par un bureau d'études agréé, à la charge du pétitionnaire. Dans le cas contraire, la demande se verra refusée.

De même, une vigilance particulière sera apportée à toute demande de résiliation d'AOT concernant une canalisation traversante. Elle ne pourra être prononcée qu'en cas de remise en état des lieux, c'est-à-dire après enlèvement de la canalisation et réparation de la digue.

#### ❖ **Recours à une maîtrise d'œuvre agréée**

Pour tous travaux envisagés sur la levée par un tiers et qui sont jugés inévitables par le gestionnaire, le recours à un maître d'œuvre agréé au sens du décret du 11 décembre 2007 relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques est exigé aussi bien pour les études que pour le suivi des travaux.

#### 9.1.1.7. Gestion du dossier d'ouvrage

La présente étude de dangers met en évidence l'importance de la connaissance de toutes les anomalies et singularités affectant la digue et qui peuvent interférer sur son fonctionnement en crue. Il est donc nécessaire de poursuivre la mise à jour du dossier d'ouvrage afin de le compléter par toute nouvelle information sur la digue et notamment les comptes-rendus de VTA, les rapports de fin de travaux, etc.

#### 9.1.2. *Mesures à mettre en œuvre sur le territoire*

##### 9.1.2.1. Mise en sécurité des populations

Le niveau de sûreté de la levée du val de Véron est sensiblement égal au niveau de protection apparent.

Au-delà du niveau de sûreté, la probabilité de rupture est non négligeable et des mesures doivent donc être prévues pour mettre à l'abri les populations potentiellement exposées.

Le niveau de sûreté déterminé dans la présente étude devra alimenter les réflexions sur la détermination du niveau de seuil déclenchant le plan de mise en sécurité des populations, qui sera réalisé par les pouvoirs publics compétents.

Il semble a minima nécessaire de prévoir l'évacuation des établissements sensibles concernés (aucun dans le présent cas de figure) ainsi que de l'ensemble des personnes situées dans une bande de 200 m à l'arrière du pied de digue, traduisant le danger induit par une charge hydraulique de 2 mètres s'appliquant à la digue (hauteur supérieure à la hauteur d'un homme). Cette bande concerne les habitations encastées ou très proches de la levée. Celles-ci sont soumises à un risque de destruction du bâti et devront être évacuées prioritairement en cohérence avec le niveau de sûreté estimé.

L'évacuation de l'ensemble de la population située dans la « zone protégée » est également à envisager. Seront évacués en priorité les personnes se situant dans une bande de 200 m à l'arrière du système d'endiguement puis les personnes occupant le val.

Pour cela, un plan d'évacuation des populations exposées devra être réalisé par les pouvoirs publics compétents.

##### 9.1.2.2. PCS et DICRIM

Les communes situées au sein de la zone devront intégrer dans leurs Plans Communaux de Sauvegarde (PCS) toutes les dispositions nécessaires pour assurer la sécurité des personnes face au risque de défaillance de la levée. Ces informations seront également rappelées dans le DICRIM (Document d'Information Communal sur les Risques Majeurs) de chaque commune.

Pour cela, les conclusions de la présente étude de dangers seront portées à la connaissance des Maires concernés. Il sera notamment présenté :

- l'étendue de la « zone protégée » par le système d'endiguement,
- le niveau de protection apparent de la digue,
- le niveau de sûreté de la digue,
- les ERP et établissements de gestion de crise pouvant être touchés en cas de défaillance du système d'endiguement (aucun dans le cas présent).

#### 9.1.2.3. Plan de Prévention des Risques d'Inondation

La présente étude de dangers a déterminé le niveau de sûreté du système d'endiguement, les conséquences de scénarios de défaillance en termes de dangers pour les populations exposées et a fait apparaître des zones dites de « destruction du bâti » au droit desquelles l'énergie dissipée pourrait être très forte.

Ces résultats seront portés à la connaissance du Préfet et des élus en vue de la révision du Plan de Prévention des Risques d'Inondation. L'objectif est que celui-ci puisse intégrer au mieux la connaissance des risques liés à la présence du système d'endiguement.

#### 9.1.2.4. Prévision des crues

La digue de Bertignolles se situant en aval de la station hydrométrique de Tours, l'alerte de crue est transmise au CD 37 par le Service de Prévision des Crues (SPC).

Les connaissances apportées par la présente étude de dangers et notamment le niveau de protection des digues seront portées à la connaissance du SPC.

#### 9.1.2.5. Information des gestionnaires de réseaux

Les résultats présentés dans la présente étude de dangers devront faire l'objet d'une information auprès des différents gestionnaires de réseaux.

## **9.2. Réduction des risques 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.

### *9.2.1. Mesures structurelles*

L'objectif des mesures listées ci-dessous est de rapprocher au maximum le niveau de sûreté du système d'endiguement de son niveau de protection apparent, de façon à ce qu'il ne présente pas de risque de rupture avant surverse.

Dans le présent cas de figure, le niveau de sûreté du système d'endiguement du val de Véron est égal au niveau de protection apparent. Les mesures listées ci-dessous visent donc à maintenir cette situation.

#### 9.2.1.1. Traitement des canalisations traversantes

Plusieurs canalisations traversantes sont à l'origine de fortes probabilités de rupture par érosion interne sur les levées du val de Véron.

En conséquence, il est nécessaire de définir un programme visant à diagnostiquer puis le cas échéant, à traiter ces points de faiblesses afin d'assurer au besoin l'étanchéité au contact digue / canalisation.

Le tableau ci-dessous présente les canalisations les plus préjudiciables pour la tenue de la digue, générant un risque de défaillance important.

Localisation	Désignation	Ouvrage concerné	Crue à partir de laquelle le risque de défaillance est non négligeable
Lieu-dit « le Petit Chouzé » / PT 40	OH 4	Ouvrage débouchant d'évacuation EP de la route en crête	Q5
En amont du lieu-dit de « Bertignolles » / PT 73	OH 6	Ouvrage traversant avec clapet	Q5

**Tableau 56: Canalisations traversantes à traiter pour réhausser le niveau de sûreté de la levée du val de Véron**

Le diagnostic consistera dans un premier temps à vérifier le caractère traversant ou non de ces ouvrages par le biais des investigations suivantes :

- analyse de plans récents des ouvrages s'ils sont disponibles,
- une inspection caméra pour identifier son parcours, ainsi que l'état de l'ouvrage,
- le cas échéant, un relevé topographique précis de l'ouvrage par un géomètre expert.

Dans le cas d'un ouvrage traversant, son étanchéité devra être vérifiée par des tests adaptés (test à l'eau, tests à la fumée, etc.). Par ailleurs, la nature des matériaux en place aux abords de la canalisation devra être identifiée et son incidence sur le risque d'érosion interne caractérisée (étanchéité, notamment sur le parement amont, plus ou moins satisfaisante, etc.).

Le cas échéant, en fonction des conclusions du diagnostic, les ouvrages traversants devront être traités de façon à ce qu'ils ne constituent plus de points de faiblesse sur la digue.

Dans un second temps, les autres canalisations identifiées dans la digue (cf. recensement au paragraphe 3.1.6.3) devront également faire l'objet de la même démarche. L'attention du propriétaire est attirée sur le fait que des ouvrages auraient pu échapper au recensement réalisé dans la présente étude de dangers. Il faudra continuer à procéder à la recherche de canalisation traversante.

#### 9.2.1.2. Suppression de la végétation ligneuse sur et au voisinage immédiat des ouvrages

La végétation ligneuse implantée sur la digue ou en pied de digue constitue un facteur aggravant vis-à-vis de l'érosion interne. Les racines créent des conduits dans le corps de digue décompactant les matériaux et favorisant les écoulements internes.

La végétation ancienne (souches) constitue un risque similaire dans la mesure où les racines n'ont pas été retirées.

Par ailleurs, la présence de végétation limite l'inspection visuelle de la digue et donc la qualité de sa surveillance.

Le programme d'entretien de la végétation actuellement mis en œuvre sur le système d'endiguement devra être poursuivi.

Les profils n° 17 et 18 présentent des probabilités de rupture non négligeables du fait de la présence de végétation abondante sur la levée et devront ainsi être traités.

Les arbres concernés devront être abattus et dessouchés. Le corps de digue sera ensuite proprement repris de façon à retrouver l'étanchéité de l'ouvrage (mise en œuvre d'un écran étanche ou reconstruction de l'ouvrage en portant une attention particulière « au clavage » entre l'ouvrage existant et le tronçon repris).

#### 9.2.1.3. Bâtiments et ouvrages encastrés

Au total, 6 bâtiments encastrés, dont 3 linéaires, sont encastrés dans le corps de la levée du val de Véron. Cependant, aucun bâtiment n'entraîne de probabilité de rupture significative.

Néanmoins, ils constituent un facteur aggravant de la stabilité de l'ouvrage. Un suivi de ces bâtiments devra être réalisé afin de vérifier l'évolution de la digue en ces points. Le gestionnaire devra pouvoir accéder à l'intérieur des bâtiments lors de ces inspections. En fonction des constats faits, des mesures particulières pourront s'avérer nécessaires.

Enfin, tout nouveau bâtiment encastré dans les levées du val de Véron est à prohiber, y compris en pied de digue.

#### 9.2.1.4. Animaux fouisseurs

L'étude de dangers a montré que la levée de Bertignolles semble sujette à la problématique de présence d'animaux fouisseurs sur un tronçon relativement restreint (cf. Figure 35). Pour autant, on rappelle qu'au regard de la végétation présente aujourd'hui, ce recensement n'est pas forcément exhaustif. Cependant, aucun terrier n'entraîne de probabilité de rupture significative.

Néanmoins, ils constituent un facteur aggravant de la stabilité de l'ouvrage. Un suivi de ces terriers devra être réalisé afin de vérifier l'évolution de la digue en ces points. Ils devront faire l'objet d'une attention particulière lors des inspections. En fonction des constats faits, des mesures particulières pourront s'avérer nécessaires.

#### 9.2.1.5. Mise en place de chemins de service

L'étude de dangers a montré la présence de végétation parfois dense en pied de digue (en particulier côté cours d'eau), entravant actuellement la bonne inspection du talus et du pied de digue.

Dans cette optique, la création de chemins de service en pied de talus, aussi bien côté Loire que côté val, pourra être envisagée afin de faciliter l'inspection des pieds de la levée.

Il sera toutefois nécessaire de concevoir un aménagement limitant l'attrait « touristique » de ces chemins afin qu'ils conservent leur vocation première d'outil de surveillance.

#### 9.2.1.6. Réduction du risque d'érosion interne

L'étude de dangers a montré que les profils n°17 et 18 du système d'endiguement du val de Véron présentent une sensibilité intrinsèque au phénomène d'érosion interne ainsi qu'au phénomène de glissement pour le n°18.

Il est préconisé la réalisation d'une étude complémentaire de stabilité vis-à-vis du glissement et d'analyse de l'érosion interne, spécifique à ces profils. Cette étude aura pour objectif d'aboutir aux mesures adéquates permettant de supprimer la sensibilité au glissement et à l'érosion interne de chaque tronçon de digue.

### 9.2.2. *Mesures fonctionnelles*

Les mesures fonctionnelles visent à assurer un niveau de sûreté de la digue supérieur au niveau de protection apparent, c'est-à-dire à permettre la surverse sans création de brèche.

La présente étude a mis en évidence que le niveau de protection apparent du système d'endiguement (c'est-à-dire le niveau de la crête de digue) correspond à une crue de période de retour 5 ans pour le val de Véron.

L'étude a mis en évidence la présence de certains points bas sur la digue de Bertignolles (cf. Figure 10). Ces points bas pourront faire l'objet d'une rehausse dans l'objectif de niveler globalement la crête de digue en cohérence avec les lignes d'eau attendues.

### **9.3. Réduction des risques en améliorant les connaissances et les méthodes**

La démarche mise en œuvre dans la présente étude reste limitée au cadre de l'étude de dangers. Des réflexions complémentaires plus larges pourront être menées pour améliorer la connaissance des phénomènes et de l'ouvrage étudié.

#### *9.3.1. Amélioration de la connaissance des phénomènes*

##### 9.3.1.1. Connaissance de l'hydrologie de la Loire

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, 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 aménagées après chaque événement (cf. paragraphe 3.1.5.2), ces repères ne sont sans doute pas tous représentatifs des plus forts événements hydrologiques connus.

Pour pouvoir répondre à cette interrogation, une étude sur l'hydrologie ancienne de la Loire et de ses principaux affluents pourra être lancée.

##### 9.3.1.2. Connaissance des phénomènes induits par le changement climatique

Le chapitre 6 a montré qu'il était difficile d'identifier une variation dans le comportement de la Loire du fait du changement climatique. Néanmoins, une tendance à l'accroissement de l'intensité des crues dans les années à venir pourrait avoir des conséquences néfastes.

Une surveillance précise de toute évolution de l'hydrologie de la Loire est donc à assurer dans les prochaines années.

##### 9.3.1.3. Connaissance de l'évolution du lit de la Loire sur le secteur d'étude

L'étude de dangers a montré que la digue de Bertignolles pouvait être sensible à l'évolution du lit de la Loire qui pourrait réduire la largeur du franc-bord (cf. paragraphes 3.2.1.1 et 6.4).

Une étude générale sur le comportement morphodynamique de la Loire pourrait apporter un éclairage plus conséquent sur les phénomènes pouvant affecter les levées du val de Véron. Elle est d'autant plus justifiée que la digue de Bertignolles présente un franc-bord restreint sur sa partie aval.

##### 9.3.1.4. Connaissance de la formation des brèches

Les phénomènes de création, d'ouverture, de développement et l'effet destructeur sont mal connus.

Il semble donc nécessaire de lancer un programme de recherche sur la formation et le développement des brèches dans les levées de la Loire en tenant compte des constats du XIX<sup>e</sup> siècle.

#### 9.3.1.5. Connaissance du phénomène d'érosion interne dans les digues

Le phénomène d'érosion interne est à l'origine d'une partie des risques de défaillance de la digue de Bertignolles.

L'érosion interne fait actuellement l'objet de recherches fondamentales. Cette démarche doit être poursuivie et prolongée par des études d'application.

#### 9.3.1.6. Connaissance et méthodes d'analyse de risques

La méthode d'analyse des risques telle qu'elle a été mise en œuvre dans la présente étude de dangers doit être évaluée et éventuellement améliorée.

La prise en compte des barrières de sécurité et des défauts dans les études de dangers et notamment le modèle de calcul de l'aléa de rupture se base sur des hypothèses et des évaluations à dire d'expert qu'il est nécessaire d'améliorer.

L'application de cette méthode pour l'ensemble des digues domaniales de la Loire et de ses affluents de classe A, B et C permettra de fournir un retour d'expérience conséquent qui pourra conduire à affiner la méthodologie.

#### 9.3.1.7. Connaissance de la vidange de la zone protégée

Afin de préciser la cinétique de la vidange de la zone protégée, notamment conditionnée par les ouvrages hydrauliques traversants, il est préconisé la réalisation d'une étude spécifique ayant pour objet de caractériser la durée de submersion des enjeux présents au sein de la zone protégée.

### 9.3.2. *Amélioration de la connaissance de l'ouvrage*

#### 9.3.2.1. Connaissance du système d'endiguement

Les reconnaissances préconisées ci-avant vis-à-vis des canalisations traversantes et des bâtiments encastrés conduiront à améliorer la connaissance de l'ouvrage.

#### 9.3.2.2. Connaissance géotechnique de la digue

Des investigations géophysiques et géotechniques ont été mises en œuvre dans le cadre de la présente étude de dangers. Elles ont permis de disposer d'une connaissance correcte de la structure de l'ouvrage et de ses sols supports.

Toutefois, des reconnaissances et études complémentaires seront à prévoir préalablement à la réalisation de tous travaux sur la digue de Bertignolles pour asseoir la conception de ces derniers qui seront réalisées par un bureau d'études agréé.

#### 9.3.2.3. Connaissance des ouvrages traversants

L'étude de dangers a été conduite avec les connaissances du gestionnaire de l'ouvrage et sur la base de visites de site. Il reste possible que des canalisations et ouvrages inclus aient échappés au recensement réalisé (ouvrages immergés notamment).

Une recherche systématique des ouvrages inclus devra être menée dans le cadre des inspections et visites de surveillance de la levée.

Par ailleurs, concernant les ouvrages traversants pouvant être à l'origine de fortes probabilités de défaillance, des diagnostics seront réalisés, dans un premier temps sur ceux qui sont les plus préjudiciables, afin de mieux connaître leur position dans la digue, leur géométrie, leur état (étanchéité notamment). Ces mesures sont décrites dans le paragraphe 9.2.1.1.

### 9.4. Synthèse des mesures à engager par type de mesure

Les mesures énoncées ci-dessous sont présentées suivant un niveau de priorité, défini comme suit :

- Priorité 1 : à réaliser à court terme (d'ici 3 ans),
- Priorité 2 : à réaliser à moyen terme, a minima d'ici la prochaine révision de l'étude de dangers,
- Priorité 3 : à réaliser à long terme.

Ces niveaux de priorité devront être ré-analysés par le Maître d'Ouvrage si un évènement significatif survenait (crue ou autre évènement pouvant remettre en cause le niveau de protection des ouvrages).

#### 9.4.1. *Gestion du risque*

Mesure	Action à engager	Priorité
Classement de l'ouvrage	Demande de révision de l'arrêté préfectoral de classement	Priorité 1
Consignes écrites / Plan de surveillance	Révision du document en prenant en compte les conclusions de l'étude de dangers	Priorité 1
Entretien de l'ouvrage	Maintien du programme d'entretien	Priorité 1
AOT et convention de superposition d'affectation	Vigilance accrue sur l'utilisation de la levée par les usagers	Immédiat

Mesure	Action à engager	Priorité
Canalisations traversantes	Adoption d'une position ferme sur les nouvelles demandes	Immédiat
Mise en sécurité des populations	Plan d'évacuation des populations exposées à mettre en œuvre	Priorité 1
PCS	Porter à connaissance du Maire les conclusions de l'étude de dangers	Priorité 1
PPRI	Porter à connaissance du Préfet et des élus les conclusions de l'étude de dangers	Priorité 1
Prévision des crues	Porter à connaissance du SPC les conclusions de l'étude de dangers	Priorité 1
Gestionnaires de réseaux	Transmission des résultats de l'étude auprès des gestionnaires de réseaux	Priorité 1

**Tableau 57 : Mesures de gestion du risque à mettre en œuvre**

#### 9.4.2. Amélioration structurelle et fonctionnelle du système de protection

Mesure	Action à engager	Priorité
Traitement des canalisations traversantes	Diagnostic puis traitement le cas échéant	Priorité 1 Priorité 2
Végétation ligneuse	Établir un plan d'actions - Diagnostic des sujets ligneux les plus préjudiciables - Abattage et dessouchage des sujets identifiés comme préjudiciables	Priorité 1 Priorité 2
Bâtiments et ouvrages encastrés	Interdire la création de tout nouvel ouvrage	Immédiat
Connaissance des phénomènes d'érosion interne et de glissement	Étude de stabilité face au glissement et d'analyse de l'érosion interne sur les tronçons concernés (PT n°17 et 18)	Priorité 1
Mise en place de chemins de service	Mise en place de chemins en pieds de digue	Priorité 3
Nivellement des points bas de la crête de digue	Le cas échéant, mise à niveau des points bas en fonction du niveau de protection retenu par le gestionnaire	Priorité 3

**Tableau 58 : Mesures visant à l'amélioration structurelle du système de protection**

#### 9.4.3. Amélioration des méthodes et connaissances

Mesure	Action à engager	Priorité
Connaissance de l'hydrologie de la Loire	Étude sur l'hydrologie de la Loire ancienne	Priorité 2
Connaissance sur le changement climatique	Surveillance de l'hydrologie de la Loire	Priorité 2
Connaissance sur l'évolution du lit de la Loire	Étude générale sur le comportement morphodynamique de la Loire	Priorité 2

Mesure	Action à engager	Priorité
Connaissance sur la formation des brèches	Lancement d'une recherche sur la formation et le développement des brèches dans une levée de Loire	Priorité 2
Méthode d'analyse des risques	Évaluer et améliorer la méthodologie de l'AMDE <sup>16</sup> des études de dangers	En cours
	Évaluer et améliorer la prise en compte des barrières de sécurité et des incertitudes dans les études de dangers	
	Évaluer et améliorer le modèle de calcul de l'aléa de rupture de digue	
Connaissance du système d'endiguement	Réalisation des reconnaissances vis-à-vis des ouvrages traversants	Priorité 2

Tableau 59 : Mesures visant à l'amélioration des méthodes et connaissances

## 9.5. Efficacité des mesures et niveau de sûreté résiduel

La mise en œuvre des mesures préconisées dans le chapitre 9 de la présente étude de dangers permettra d'augmenter la fiabilité de la digue de Bertignolles sans pour autant augmenter son niveau de sûreté (ce dernier étant déjà égal au niveau de protection apparent).

Le niveau de sûreté résiduel, c'est-à-dire le niveau de sûreté du système d'endiguement suite à la mise en œuvre de l'ensemble des mesures de réduction du risque structurelles et de gestion sera donc inchangé.

A titre indicatif, les probabilités annuelles tous modes de rupture confondus de chaque tronçon sans et avec mise en œuvre des mesures de réduction des risques indiquées ci-après sont présentées sur les figures suivantes :

- traitement des canalisations au droit des profils n°40 et 73,
- suppression de la végétation au droit des profils n°17 et 18.

<sup>16</sup> Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets

Conseil Départemental d'Indre-et-Loire (CD 37)  
 Étude de dangers de la digue de Bertignolles - Rapport A 85656 vA

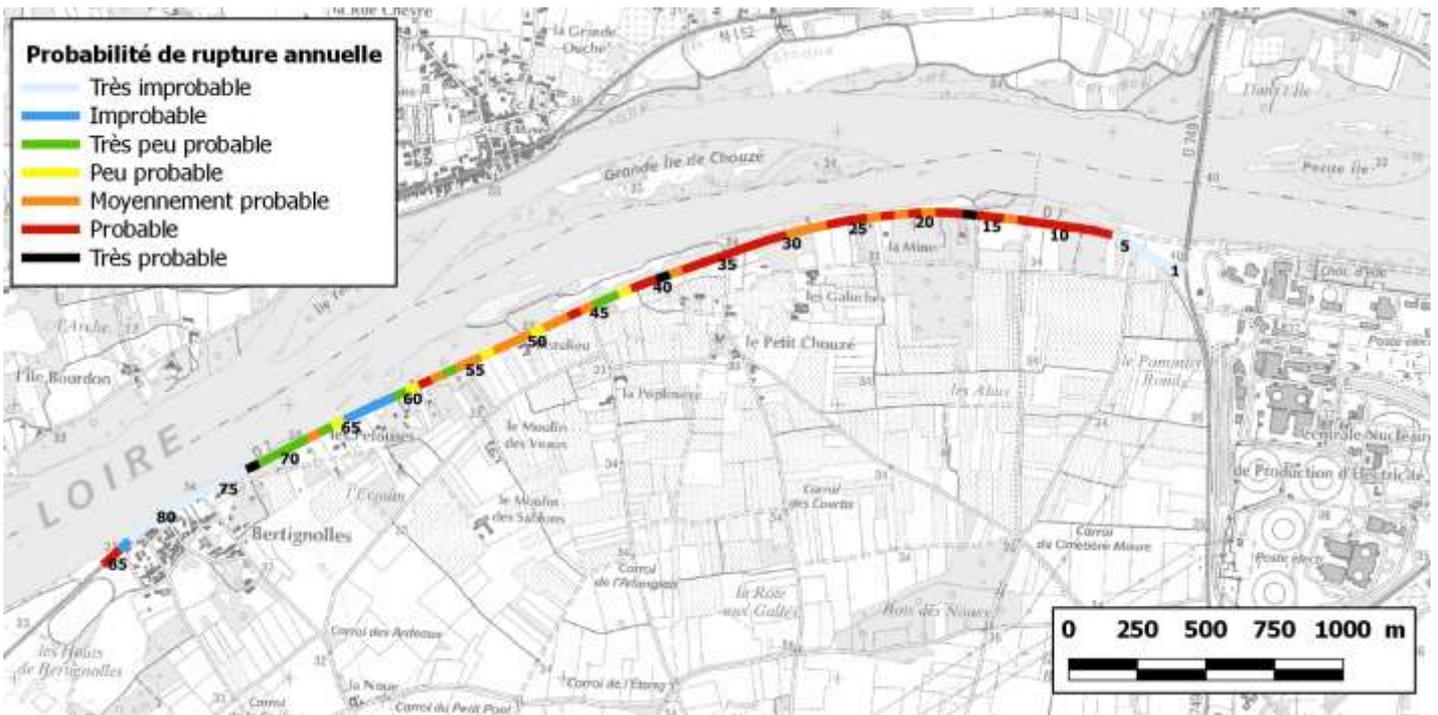


Figure 78 : Probabilités annuelles tous modes de rupture confondus sans mesures de réduction de risques

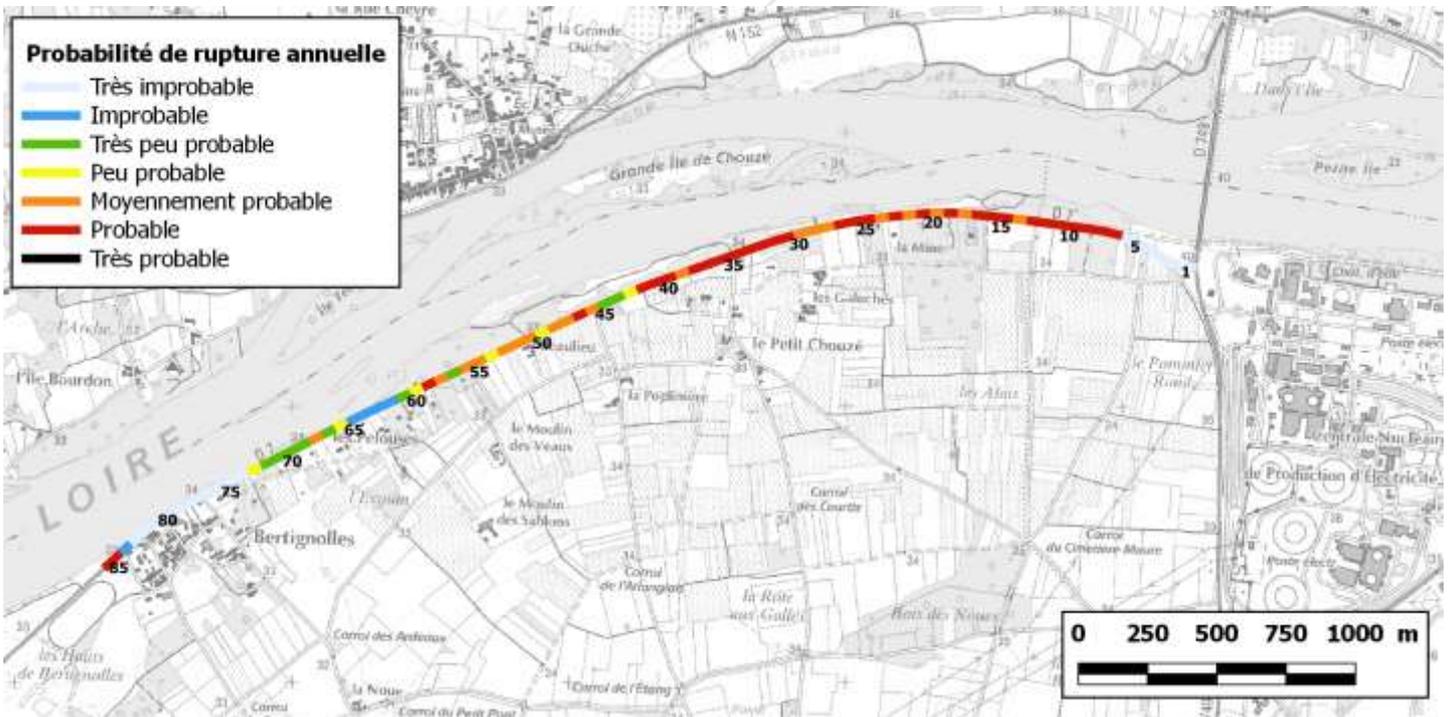


Figure 79 : Probabilités annuelles tous modes de rupture confondus avec mesures de réduction de risques

## 9.6. Conclusion sur l'étude réduction des risques

L'étude de dangers a mis en évidence l'importance du maintien voire du renforcement du dispositif d'entretien, de surveillance et de gestion du système d'endiguement.

Les principales mesures à mettre en place pour fiabiliser au maximum le niveau de sûreté de la digue (égal à son niveau de protection apparent) sont les suivantes :

- adapter les consignes de surveillance du système d'endiguement au regard des conclusions de l'étude de dangers (priorité de niveau 1),
- surveiller de façon spécifique lors des épisodes de crue les points de vigilance suivant : les canalisations traversantes (priorité 1),
- diagnostiquer (priorité 1) puis traiter les canalisations traversantes les plus préjudiciables (priorité 2),
- établir un plan d'action de traitement de la végétation, puis un diagnostic des sujets les plus préjudiciables (priorité 1) pouvant conduire à l'abattage des principaux sujets ligneux (priorité 2),
- évaluer et traiter la sensibilité à l'érosion interne et au glissement des tronçons concernés (priorité 2).

**La mise en œuvre de l'ensemble des mesures de réduction du risque structurelles et de gestion sur le système d'endiguement du val de Véron permet de maintenir le niveau de sûreté de la digue à une crue de période de retour de 5 ans.**

Au regard du niveau de protection faible et du peu d'enjeux concernés, des études complémentaires pourraient être réalisées afin de statuer sur le devenir de cet ouvrage :

- étude d'un scénario d'effacement de la digue permettant de préciser le rôle joué par cette dernière,
- précision de la zone de dissipation d'énergie (ZDE) sur l'ensemble du linéaire de l'ouvrage afin d'affiner la connaissance des enjeux concernés et améliorer la gestion de crise (évacuation préalable),
- étude d'un scénario de résistance à la surverse (mise en place de déversoirs) et/ou de mise en transparence (mise en place de dalots) afin de réduire le risque de rupture.

## **10. Cartographie**

Cf. atlas cartographique disponible en annexe hors texte.



### **Observations sur l'utilisation du rapport**

Ce rapport, ainsi que les cartes ou documents, et toutes autres pièces annexées constituent un ensemble indissociable ; en conséquence, l'utilisation qui pourrait être faite d'une communication ou reproduction partielle de ce rapport et annexes ainsi que toute interprétation au-delà des énonciations d'Antea Group ne sauraient engager la responsabilité de celle-ci. Il en est de même pour une éventuelle utilisation à d'autres fins que celles définies pour la présente prestation.

La prestation a été réalisée à partir d'informations extérieures non garanties par Antea Group ; sa responsabilité ne saurait être engagée en la matière.

## **Annexe 1 : Glossaire**

(6 pages)

## **Annexe 2 : Arrêté préfectoral de classement de la digue**

(3 pages)

## **Annexe 3 : Étude accidentologique**

(1 rapport)

## **Annexe 4 : Étude topographique**

(1 rapport)

## **Annexe 5 : Étude hydraulique**

(1 rapport)

## **Annexe 6 : Rapport d'étude géotechnique**

(1 rapport)

## **Annexe 7 : Ouvrages inclus**

(1 rapport)

## **Annexe 8 : Autres sollicitations et facteurs aggravants**

(1 rapport)

## **Annexe 9 : Morphodynamique**

(1 rapport)

## **Annexe 10 : Enjeux**

(1 rapport)

## **Annexe 11 : Analyse fonctionnelle**

(1 rapport)

## **Annexe 12 : Rapport de VTA – année 2016**

(1 rapport)

**Annexe 13 : Présentation des scénarios d'inondation  
par brèche retenus en vue de réaliser les  
modélisations hydrauliques associées**

(1 rapport)

## **Annexe 14 : Note intensité et cinétique des inondations**

(1 rapport)

**Annexe 15 : Résultats du modèle de rupture  
CARDigue profil par profil**

(85 pages)

## Fiche signalétique

### **Rapport**

---

**Titre : Étude de dangers de la digue de Bertignolles (37)**

Numéro et indice de version : A85656 vA

Date d'envoi : avril 2018

Nombre de pages : 165 (hors annexes)

Diffusion (nombre et destinataires) :

1 ex. Direction Régionale

Nombre d'annexes dans le texte : 15

Nombre d'annexes en volume séparé : 0

10 ex. client

1 ex. Auteur

### **Client**

---

Coordonnées complètes : Conseil Départemental d'Indre-et-Loire  
Direction générale adjointe « Territoires »  
Direction des déplacements  
Service Politiques des Infrastructures  
Place de la préfecture  
37 000 TOURS CEDEX

Téléphone : 02.47.31.47.31

Télécopie : 02.47.31.42.71

Nom et fonction des interlocuteurs : Frédéric MARLIER, Chef de service Politique des Infrastructures

### **Antea Group**

---

Unité réalisatrice : Direction Régionale Île-de-France Centre Normandie / Pôle Eau

Nom des intervenants et fonction remplie dans le projet :

Interlocuteur commercial : Sylvain PALIX

Responsable du projet : Romain DE BORTOLI

Auteur(s) : Kristelle RIANO, Ketleen LOUIS et Romain DE BORTOLI

Secrétariat : Virginie PEIGNE

### **Qualité**

---

Contrôlé par : Sylvain PALIX

Date : version A – avril 2018

version 0.4 – novembre 2017

version 0.3 – août 2017

version 0.2 – mai 2017

version 0.1 – octobre 2016

N° du projet : CENP160313

Références et date de la commande : /

**Mots clés : étude dangers, digues, modélisation**

**Communes : Avoine, Savigny-en-Véron (37)**