



RD 921 - Déviation de Jargeau  
 et Saint –Denis-de-l’Hôtel  
 Sous-dossier VI : Autorisation  
 au titre de la Loi sur l’eau  
 Pièce 18 : Etude de dangers de la  
 digue de la Loire au droit de la  
 déviation de Jargeau

63073  
 Décembre 2015 / version 7

Groupement d’étude  
 et d’AMO





# Sommaire détaillé

<b>1</b>	<b>Résumé Non technique</b>	<b>8</b>
1.1.	Contexte et objectif de l'étude de dangers	8
1.2.	Structure de la digue	8
1.3.	Surveillance et cogestion de l'ouvrage	9
1.4.	Dangers potentiels et aléa naturel au droit du projet	10
1.5.	Gravité du risque en cas de défaillance	10
1.6.	Mesures de réduction du risque	12
<b>2</b>	<b>Renseignements administratifs</b>	<b>13</b>
2.1	Propriétaire et gestionnaire de l'ouvrage	13
2.2	Classement de la levée d'Orléans	13
2.3	Etude de dangers du val d'Orléans	13
2.4	Rédacteur de l'étude de dangers relative au projet de déviation	13
<b>3</b>	<b>objet de l'étude</b>	<b>14</b>
3.1	Zone aménagée	14
3.2	Périmètre de l'étude	15
3.3	Intégration du projet dans le contexte de la Loire moyenne	16
<b>4</b>	<b>analyse fonctionnelle de l'ouvrage et de son environnement</b>	<b>18</b>
4.1	Description des ouvrages	18
4.1.1	Préambule	18
4.1.2	Historique	18
4.1.3	Géométrie	18
4.1.4	Géotechnique	19
4.2	Incidence du projet	22
4.3	Description de la zone protégée	25
<b>5</b>	<b>présentation de la politique de prévention des événements majeurs et du système de gestion de sécurité</b>	<b>27</b>
5.1	Organisation du gestionnaire	27
5.2	Consignes d'exploitation et de surveillance	27
5.2.1	Types de visite	27
5.2.2	Surveillance continue	27
5.2.3	Surveillance périodique	28
5.2.4	Surveillance en crue	28
5.2.5	Surveillance post-crue	28
5.2.6	Surveillance exceptionnelle	28
5.3	Mise en sécurité des populations	29
5.4	Avis général et application au site d'étude	29
<b>6</b>	<b>Identification et caractérisation des potentiels de dangers</b>	<b>31</b>
6.1	Identification des potentiels de dangers	31
<b>7</b>	<b>Caractérisation des aléas naturels</b>	<b>32</b>
7.1	Crues de la Loire	32
7.2	Embâcle et débâcles de glaces	34
7.3	Géologie et morphologie de la Loire	34
7.4	Séismes	34
7.5	Risque effondrement karstique	34
7.6	Aléa lié au pont	38
7.6.1	Présentation de l'étude hydraulique du pont	38
7.6.2	Impact sur la ligne d'eau au pied de la digue	40

7.6.3	Impact sur la morphologie de la Loire.....	40
7.6.4	Risque d'embâcle.....	40
7.7	Synthèse.....	41
<b>8</b>	<b>étude accidentologique et retour d'expérience.....</b>	<b>42</b>
8.1	Les données historiques récentes.....	42
8.1.1	Conséquence de la crue de 2003 sur la levée d'Orléans.....	42
8.1.2	Conséquence de la crue de 2003 sur l'ensemble des digues de la Loire.....	42
8.1.3	Incident hors crues.....	42
8.2	Les brèches historiques du val d'Orléans.....	42
8.2.1	Les crues historiques de la Loire.....	42
8.2.2	Caractéristiques générales des brèches.....	43
8.2.3	Analyse détaillée de 3 brèches.....	44
8.2.4	Caractérisation des fosses d'érosion.....	45
8.3	Synthèse.....	45
<b>9</b>	<b>identification et caractérisation des risques.....</b>	<b>46</b>
9.1	Description et principe de la méthodologie utilisée.....	46
9.1.1	Méthodologie générale.....	46
9.1.2	Identification des modes de rupture.....	46
9.1.3	Evaluation des probabilités d'occurrence d'un événement.....	46
9.1.4	Caractérisation des scénarios d'inondation.....	51
9.1.5	Evaluation de la gravité des scénarios d'inondations.....	51
9.1.6	Evaluation de la classe de risque.....	52
9.2	Probabilité de défaillance en état actuel.....	53
9.2.1	Synthèses de l'étude de dangers du val d'Orléans.....	53
9.2.2	Prise en compte des données géotechniques complémentaires.....	54
9.2.3	Actualisation des risques d'érosion interne et de glissement.....	55
9.2.4	Actualisation du risque de soulèvement.....	57
9.2.5	Conclusion de l'actualisation des probabilités de risque en état actuel.....	58
9.3	Modification apportée par le projet.....	58
9.3.1	Description du projet.....	58
9.3.2	Impact sur les risques de rupture.....	59
9.3.3	Sectorisation des impacts potentiels.....	60
9.4	Risque d'érosion interne.....	61
9.4.1	Mode de calcul de situation 1 (PK 20.45), inclusions rigides, palplanche et rehausse de la ligne d'eau de 15 cm.....	61
9.4.2	Modélisation 3D du corps de digue en situation 1 (inclusions rigides palplanche et rehausse de la ligne d'eau de 15 cm).....	61
9.4.3	Impact sur le risque d'érosion interne estimé à partir de Cardigüe.....	66
9.4.4	Situation n°2 : rehausse de la ligne d'eau.....	68
9.4.5	Conclusion.....	69
9.5	Impact du projet sur les autres modes de rupture.....	70
9.5.1	Risque de surverse.....	70
9.5.2	Risque de glissement.....	73
9.5.3	Risque de soulèvement.....	77
9.6	Conclusions sur le risque de rupture.....	77
9.7	Estimation du risque inondation.....	78
9.7.1	Localisation des brèches.....	78
9.7.2	Scénarios de l'étude de dangers du val d'Orléans.....	79
9.7.3	Scénarios au droit du projet.....	79
9.8	Simulation de la propagation de l'hydrogramme de brèche dans le val....	90
9.8.1	Condition aux limites.....	90
9.8.2	Conditions aux limites.....	90
9.8.3	Simulation du scénario d'inondation.....	90
9.9	Gravité du scénario.....	92
9.9.1	Aléa inondation.....	92
9.9.2	Analyse des enjeux.....	93

9.9.3	Croissement aléa-enjeux.....	93
9.10	Criticité du scénario .....	94
<b>10</b>	<b>étude de réduction des risques.....</b>	<b>96</b>
10.1	Rappel sur le niveau de sécurité du linéaire de digue.....	96
10.2	Mesure de gestion de la digue.....	96
10.2.1	Mesures relevant du gestionnaire de la digue.....	96
10.2.2	Mesures relevant du gestionnaire de la voirie.....	96
10.2.3	Mesures à mettre en œuvre sur le territoire .....	97
10.3	Mesure sur le système d'endiguement.....	97
10.4	Mesure d'amélioration de la connaissance et des méthodes.....	97
<b>11</b>	<b>Annexes .....</b>	<b>99</b>
11.1	Annexe 1 : Arrêté de classement de la digue du val d'Orléans (source EDD du val d'Orléans) .....	99
11.2	Annexe 2 : Etudes géotechniques du franchissement de la digue.....	101
11.3	Annexe 3 : Exemple de convention de superposition d'usage.....	103

## LISTE DES FIGURES

Figure 1	: Localisation générale du projet de déviation.....	8
Figure 2	- Coupe type – Digue de la Loire au droit du franchissement .....	9
Figure 3	: Vue en plans de la voirie au droit du franchissement de la digue .....	9
Figure 4	: Brèches simulées dans l'étude de dangers du val d'Orléans (source EDD, val d'Orléans).....	11
Figure 5	: Hauteurs d'eau simulées en cas de brèche au droit du projet.....	12
Figure 6	: Localisation générale du projet de déviation.....	14
Figure 7	: Localisation générale de la zone d'étude.....	15
Figure 8	: Communes incluses dans le système de protection du val d'Orléans (source: EDD du val d'Orléans) .....	16
Figure 9	: Présentation des vals endigués de la Loire moyenne (source : EDD du val d'Orléans) .....	17
Figure 10	– Evolution des digues de la Loire (sources : R.DION Le val de Loire, 1934) .....	18
Figure 11	- Coupe type – Digue de la Loire au droit du projet de franchissement .....	19
Figure 12	: Contexte géologique dans l'environnement immédiat du projet (source : Infoterre-BRGM).....	20
Figure 13	– Profil géotechnique synthétiques du PK 20.50 à 20.45.....	21
Figure 14	– Profil géotechnique synthétiques du PK 20.40 à 20.45.....	21
Figure 15	: Vue de l'ouvrage de décharge à proximité du projet.....	23
Figure 16	: Intégration du projet dans le paysage.....	23
Figure 17	: Vue en plans de la voirie au droit du franchissement de la digue.....	24
Figure 18	: Coupe de principe de la structure de chaussée.....	24
Figure 19	: Zone protégée (source : EDD du val d'Orléans).....	25
Figure 20	: Trajet sur la digue (source : dossier loi sur l'eau de la déviation de Jargeau) .....	29
Figure 21	: Photomontage de la levée de Loire montrant le raccordement à la déviation .....	30
Figure 22	: Graphimontage de la levée de Loire montrant le raccordement à la déviation.....	30
Figure 23	– Forme théoriques des hydrogrammes de crue au Bec d'Allier (source EDD val d'Orléans).....	32
Figure 24	: Hydrogrammes de crue simulés à Jargeau (modèle LM10-EDD).....	33
Figure 25	: Impact du rideau de palplanche sur les gradients de pression.....	35
Figure 26	- Profil géophysique longitudinal du centre de la digue (source : étude géotechnique en annexe n°2).....	36
Figure 27	- Profil géophysique en travers digue (source : étude géotechnique en annexe n°2).....	37
Figure 28	- Emprise de la zone modélisée .....	38
Figure 29	: Profil en long et PHEC pour les crues de 2003 et 2008 .....	38
Figure 30	: Profil en long pour la crue de période de retour de 500 ans.....	39
Figure 31	: Profil en long de la crête de digue et de la ligne d'eau cinq centennale en pied.....	40
Figure 32	- Hydrogramme de la brèche de Jargeau de 1856 (source : EDD du val d'Orléans).....	45

Figure 33 : Extrait de la notice de Cardigues (source EDD, val d'Orléans).....	48
Figure 34 : Extrait de la notice de Cardigues (source : EDD, val d'Orléans).....	50
Figure 35 : Grille d'intensité de l'aléa inondation (source EED, val d'Orléans).....	51
Figure 36 : Charge hydraulique en crue cinq centennale pour la digue EDD du val d'Orléans.....	57
Figure 37 : Charge hydraulique en crue cinq centennale après prise en compte des investigations géotechniques complémentaires.....	57
Figure 38 : Schéma de réalisation des travaux (situation actuelle, intervention sur la digue et réalisation de la voie).....	59
Figure 39 : Ligne d'eau au pied de la digue .....	60
Figure 40 : Pression de l'eau en état actuel (Q500 ans).....	62
Figure 41 : Pression de l'eau en état avec remous de 15 cm (situation 2) pour Q500 ans.....	63
Figure 42 : Pression de l'eau en état avec inclusions rigides + palplanche + remous de 15 cm (situation 1) pour Q 500ans.....	63
Figure 43 : exemple de chemin se développant dans le corps de digue.....	64
Figure 44 : exemple de chemin se développant à l'aval du rideau .....	64
Figure 45 : exemple de chemin se développant au pied de la palplanche.....	65
Figure 46 : Vue 3D des pressions interstitielles dans le corps de digue.....	66
Figure 47 : Gradient hydraulique en état actuel (à gauche) et en situation projetée (à droite).....	66
Figure 48 : ligne d'eau en état actuel (modèle LM10-EDD) et remous lié au pont.....	70
Figure 49 : Zones de surverse (flèches) pour une crue de période de retour de 200 ans (source EDD, val d'Orléans) .....	72
Figure 50 : Profil en long de la crête de digue et de la ligne d'eau (EDD du val d'Orléans).....	72
Figure 51 : Schéma de principe d'un glissement de talus coté val en état actuel.....	74
Figure 52 : Schéma de principe d'un glissement de talus coté val avec rideau de palplanche.....	74
Figure 53 : Facteur de sécurité en état actuel.....	75
Figure 54 : Facteur de sécurité avec remous de 15 cm (situation 2).....	75
Figure 55 : Facteur de sécurité avec inclusion rigide + rideau de palplanche (situation 2).....	76
Figure 56 : Scénario de brèche de l'étude de dangers (source : EDD, val d'Orléans).....	78
Figure 57 : profil en travers en amont et aval du secteur de brèche .....	80
Figure 58 : Localisation de la brèche.....	81
Figure 59 : Débit de brèche.....	82
Figure 60 : Profil en long du lit mineur au val d'Orléans.....	82
Figure 61 : Vecteurs vitesses sur la zone d'étude.....	83
Figure 62 : Comparaison des hydrogrammes de brèche .....	84
Figure 63 : Relation entre la force tractrice et la vitesse d'érosion (source : rapport projet LEVEES).....	86
Figure 64 : Vitesse d'écoulement avant le début de la brèche.....	87
Figure 65 : Vitesse d'écoulement 30 minutes après le début de la brèche.....	87
Figure 66 : Vitesse d'écoulement 1h30 après le début de la brèche.....	87
Figure 67 : Fosse d'érosion prise en compte .....	89
Figure 68 : Comparaison des hydrogrammes de brèches.....	89
Figure 69 : Conditions aux limites aval du modèle .....	90
Figure 70 : Hauteur d'eau en cas de brèche – zoom sur la brèche .....	91
Figure 71 : Hauteur d'eau en cas de brèche – zoom sur le secteur d'Orléans .....	92
Figure 72 : Grille d'intensité de l'aléa inondation (source EED, val d'Orléans).....	92
Figure 73 : Vue 3D des bâtiments à Sandillon (la couleur indique l'aléa).....	93

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Principales caractéristiques de la digue de la Loire au droit du site.....	19
Tableau 2 : Perméabilité du corps de digue et des fondations.....	22
Tableau 3 : Synthèse des données géotechniques (source : étude géotechnique en annexe n°2).....	22
Tableau 4 : Nombre d'infrastructures et d'enjeux sensibles.....	26
Tableau 5 : Comparaison des débits de crues (source EDD du val d'Orléans): .....	33
Tableau 6 : Synthèse des aléas .....	41
Tableau 7 – Crues historiques à Orléans.....	43
Tableau 8 – Caractéristiques générales des brèches.....	43
Tableau 9 – Caractéristiques générales des brèches.....	44

Tableau 10 - Grille de probabilité d'occurrence (source : EDD, val d'Orléans).....	47
Tableau 11 : Traduction du coefficient de Bligh en probabilité de rupture.....	48
Tableau 12 : Traduction du facteur de sécurité en probabilité de rupture.....	49
Tableau 13 : Probabilité de soulèvement en fonction du facteur Fh.....	50
Tableau 14 : Indicateur de mise en danger des populations.....	51
Tableau 15 - Classes de gravité, adaptées du guide de lecture des études de dangers.....	52
Tableau 16 - Grille de criticité (source : EDD du val d'Orléans).....	52
Tableau 17 – Calcul de probabilité annuelle des évènements jusqu'à la Q200 extrait de l'EDD Val d'Orléans.....	53
Tableau 18 – Calcul de probabilité annuelle des évènements jusqu'à la Q1000 – extrait de l'EDD du Val d'Orléans.....	53
Tableau 19 – Impact des données géotechnique sur la probabilité de rupture en état actuel.....	54
Tableau 20 : Actualisation des coefficients de Bligh (PK 20.45).....	55
Tableau 21 : Actualisation des facteurs de sécurité (PK 20.45).....	55
Tableau 22 : Valeurs retenues pour le calcul de stabilité.....	56
Tableau 23 : Résultats du calcul de stabilité de la digue en état actuel pour une crue cinq centennale.....	57
Tableau 24 : Actualisation du facteur de soulèvement.....	58
Tableau 25 – Conclusion de l'impact des données géotechnique sur la probabilité de rupture en état actuel au PK 20.45.....	58
Tableau 26 : hypothèses de perméabilité pour la modélisation 3D.....	61
Tableau 27 : perméabilité équivalente d'un rideau de palplanche (source : ARBED groupe).....	62
Tableau 28 : Impact sur le gradient hydraulique.....	63
Tableau 29 : Calcul du coefficient de Bligh au PK 20.45.....	67
Tableau 30 : Calcul de probabilité de rupture au PK 20.45.....	67
Tableau 31 : Calcul de probabilité annuelle de rupture par érosion interne au Pk 20.45 (outil Cardigue).....	67
Tableau 32 : Calcul du coefficient de Bligh.....	68
Tableau 33 : Calcul de probabilité événementielle de rupture par érosion interne.....	68
Tableau 34 : Calcul de probabilité annuelle de rupture par érosion interne (outil Cardigue).....	68
Tableau 35 : Calcul de probabilité de rupture.....	71
Tableau 36 : Calcul de probabilité annuelle de rupture par surverse.....	71
Tableau 37 : Calcul de probabilité événementielle de rupture par glissement coté val.....	73
Tableau 38 : Caractéristiques des matériaux utilisés.....	74
Tableau 39 : Impact sur le facteur de sécurité.....	75
Tableau 40 : Calcul de du facteur F pour le glissement coté Loire.....	76
Tableau 41 – Calcul de probabilité annuelle des évènements jusqu'à la Q200 en état projeté.....	77
Tableau 42 – Calcul de probabilité annuelle des évènements jusqu'à la Q1000 en état projeté.....	78
Tableau 43 - Caractéristiques hydraulique des scénarios de l'étude de dangers.....	79
Tableau 44 - Caractéristiques des écoulements en crues.....	80
Tableau 45 : Analyse de sensibilité des brèches.....	84
Tableau 46 – Calcul de la vitesse d'érosion.....	88
Tableau 47 : Impact de la fosse d'érosion.....	88
Tableau 48 – Calcul de la population mise en danger (source EDD du val d'Orléans).....	93
Tableau 49 – Calcul de la population mise en danger.....	94
Tableau 50 - Classes de gravité, adaptées du guide de lecture des études de dangers.....	94
Tableau 51 - Grille de criticité (source : EDD du val d'Orléans).....	95

# 1 RESUME NON TECHNIQUE

## 1.1. Contexte et objectif de l'étude de dangers

La présente étude de dangers concerne 700 m linéaire de levée de la Loire sur les 43.5 km de digue protégeant le val d'Orléans. La zone protégée totale s'étend sur 18 communes et couvre une zone de 167 km<sup>2</sup>. 61 000 habitants et 15 500 salariés y résident, essentiellement dans l'agglomération d'Orléans située à l'aval du val.

Les digues de la Loire sont propriété de l'Etat. Elles existent depuis le VIII<sup>ème</sup> siècle et ont fait l'objet de nombreux élargissements et surélévations jusqu'en 1882. Une étude de dangers du système de protection du val d'Orléans a été réalisée en décembre 2012 par la DREAL Centre.

Le projet actuel vise à créer un nouvel axe routier à l'Ouest de Jargeau. Pour cela l'ouvrage doit franchir la Loire et sa digue protégeant le val d'Orléans. Au vu de l'impact du projet sur la digue, une nouvelle étude de dangers a été réalisée par ISL ingénierie sur les 700 m impactés par le projet.

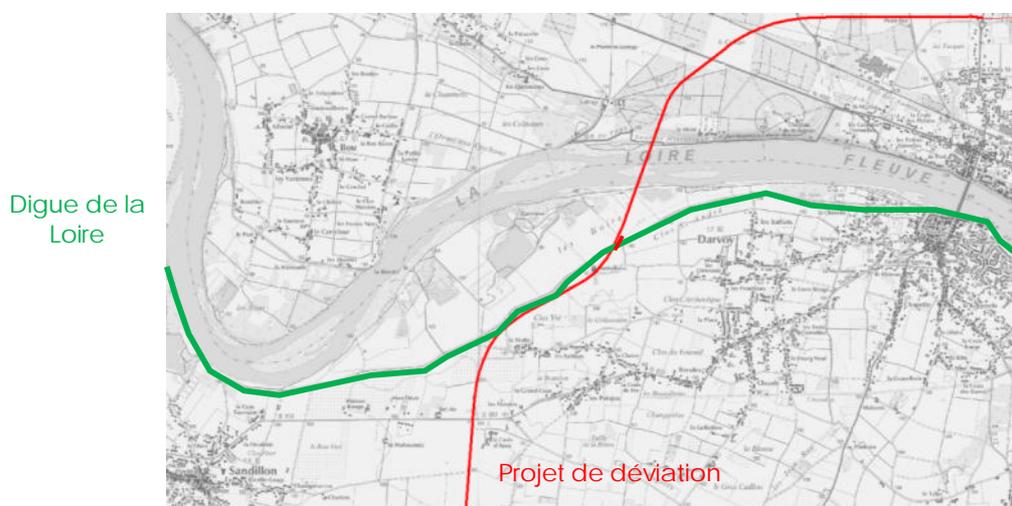


Figure 1 : Localisation générale du projet de déviation

## 1.2. Structure de la digue

Au droit du projet, la digue présente un profil type représenté sur la figure 2. Coté Loire, la Loire est en retrait de 100 m par rapport au pied de digue.

Pour assurer le franchissement de la digue par la chaussée sans modifier les fonctionnalités de celle-ci, il est prévu :

- § De renforcer la digue avec des inclusions rigides pour éviter le tassement sous le fait du trafic routier ;
- § D'inclure un écran étanche dans le corps de digue pour éviter toute infiltration d'eau dans la digue dont les matériaux peuvent être déstructurés par les inclusions rigides.

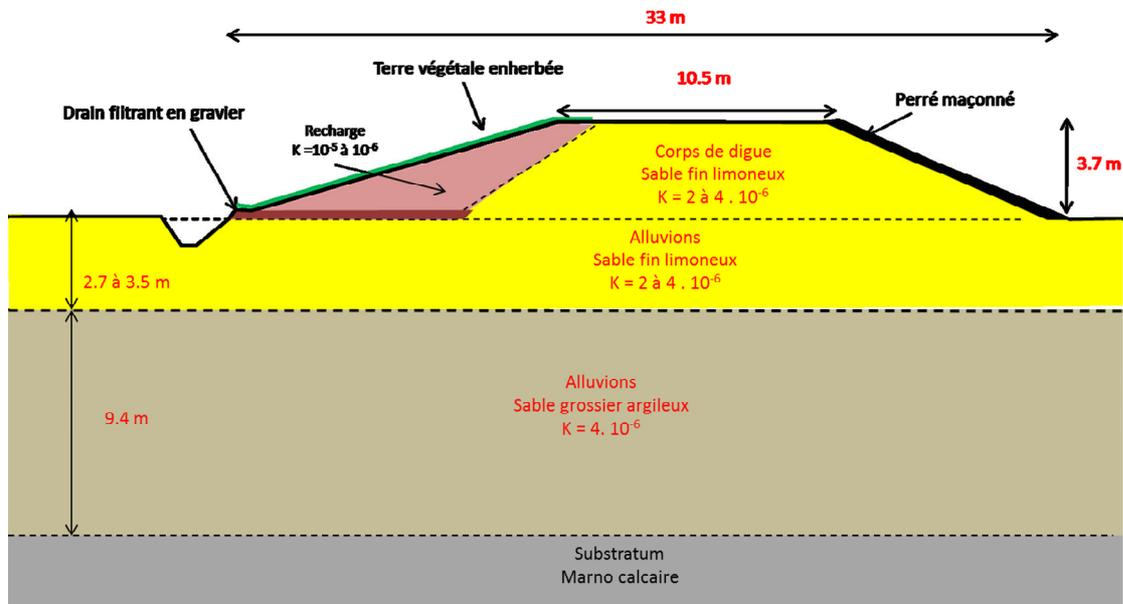


Figure 2 - Coupe type - Digue de la Loire au droit du franchissement

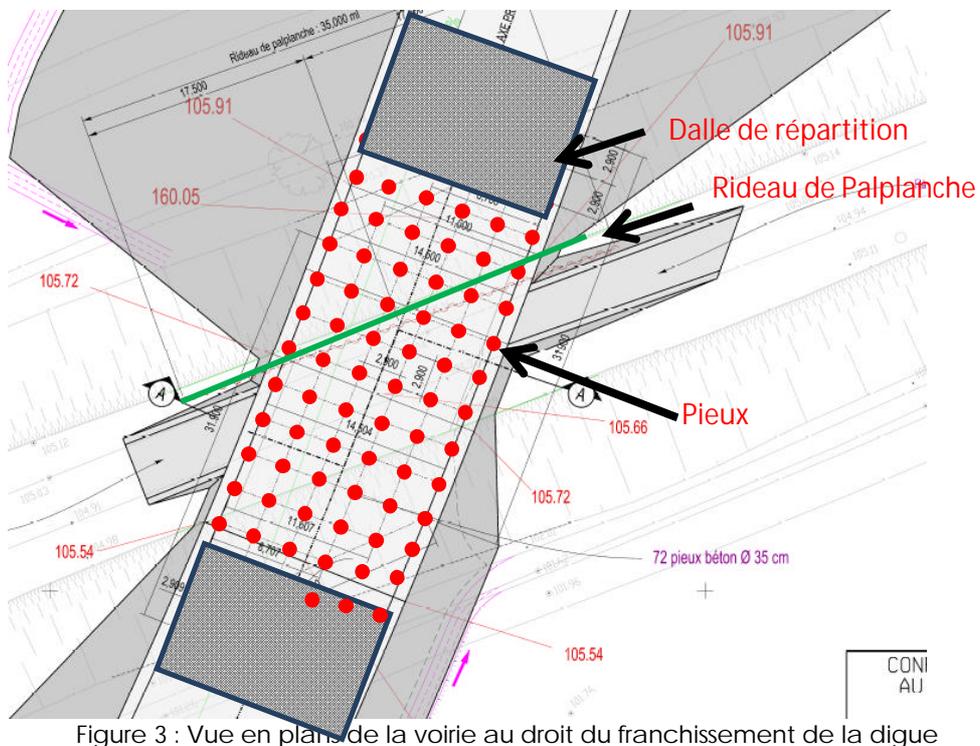


Figure 3 : Vue en plan de la voirie au droit du franchissement de la digue

### 1.3. Surveillance et cogestion de l'ouvrage

La surveillance de la digue est aujourd'hui assurée par la Direction Départementale du Territoire du Loiret, dans le cadre de sa mission de surveillance des digues du département.

La réalisation de la voirie induit l'évolution des règles de surveillance pour prendre en compte le nouvel ouvrage et la présence de deux gestionnaires : la DDT pour la digue, le Conseil Général pour la voirie.

Une convention entre la DDT et le conseil général sera signée pour la surveillance superposée de la digue au droit du franchissement par la future voie. Il sera notamment proposé :

- § Une formation des agents du CG aux problématiques de gestion d'une digue ;
- § Un échange d'information avec la DDT.

Au droit du projet, il sera notamment levé les désordres éventuels suivants :

- § Les tassements de la digue et répercussion sur la voirie (déformation/fissuration de la chaussée) ;
- § Les venues d'eau non claires en pied de remblai ;
- § Toute manifestation sur la chaussée des éventuels effets des contraintes locales associées aux inclusions rigides et rideau de palplanche.

En cas de crue, la surveillance de la digue doit pouvoir être menée sans devoir descendre de l'ouvrage. Il est donc prévu de pouvoir traverser la future voirie pour la continuité de l'itinéraire de surveillance. En temps normal, l'entretien sera maintenu en passant pas le bas de la digue coté Loire (itinéraire cyclable).

## 1.4. Dangers potentiels et aléa naturel au droit du projet

Au droit du projet, le risque d'inondation du val est lié à l'ouverture d'une brèche dans la digue. Cette brèche serait provoquée par un aléa naturel. Parmi tous les aléas évoqués dans l'étude de dangers du val d'Orléans, seul l'aléa hydrologique concerne la modification apportée par le projet.

Le risque associé à l'aléa hydrologique est localement augmenté par le pont qui induit une rehausse locale de la ligne d'eau de 15 cm.

La charge hydraulique en état actuel de 1.96 m pour une crue de période de retour de 200 ans passe ainsi à 2.11 m tandis que celle associée à une crue de 500 ans passe de 2.9 m à 3.05 m.

## 1.5. Gravité du risque en cas de défaillance

Au droit du projet, la digue est concernée par :

- § Une modification locale de sa structure sur 35 m environ ;
- § Une modification de l'aléa naturel (sur 700 m environ) du fait de la rehausse de la ligne d'eau en crue de la Loire.

L'étude de dangers de l'ensemble du val a montré que, sur le secteur impacté par le projet, la digue ne présente pas un risque de rupture significatif jusqu'à la crue de période de retour de 200 ans pour tous les modes de rupture envisagés. Le risque de rupture en état actuel est qualifié de « très improbable » soit une probabilité annuelle inférieure à 0.01%

Le projet ne vient pas augmenter de manière significative le risque de rupture car :

- § Il est localisé dans une partie de val pour laquelle la digue de protection est éloignée du lit mineur d'une part, présente une cote de crête élevée par rapport à d'autres secteurs d'autre part,
- § La probabilité de rupture par surverse, n'est augmentée que pour des périodes de retour de 500 ans et 1000 ans dans un secteur déjà soumis à surverse en état actuel. Cette surverse surviendra après d'autres secteurs dans le val d'Orléans (secteur de Guilly notamment). Cela explique pourquoi dans l'étude de dangers du val d'Orléans, ce secteur de surverse à proximité du projet n'est pas considéré comme critique ; la rehausse de la ligne d'eau consécutive au projet ne vient pas modifier la classe de risque estimée dans la situation actuelle;

- § L'introduction des inclusions rigides en déstructurant les matériaux de la digue augmente les infiltrations et conséquemment les risques d'érosion interne (érosion de la digue par les sous pressions associées à la charge d'eau en son amont). Cependant, le rideau étanche en coupant les écoulements dans le corps de digue vient compenser l'effet défavorable de ces inclusions. Le risque d'érosion interne n'est ainsi augmenté que dans les secteurs de digue dont la structure n'est pas modifiée et qui subissent une rehausse des niveaux d'eau liée à la présence du pont. Cette augmentation est cependant faible et l'estimation du risque ne conduit pas un changement de classe par rapport à la situation actuelle,
- § Le risque associé au glissement du talus qui peut déclencher un processus d'érosion interne reste négligeable car :
  - Ø Pour le risque de glissement coté val, les facteurs de sécurité sont supérieurs aux seuils minimaux recommandés;
  - Ø Pour le risque de glissement coté Loire les phénomènes initiateurs du glissement sont extrêmement peu probables ;
- § Le risque d'érosion externe (érosion du pied de digue par la Loire) n'est pas modifié par le projet ; ceci est vérifié par modélisation en comparant les vitesses d'écoulement dans l'état actuel et dans l'état aménagé.

Le risque de rupture en état projet n'évolue pas par rapport à la situation actuelle et reste ainsi « très improbable ».

La crue de sureté du secteur étudié est donc supérieure à une crue de période de retour de 200 ans, alors que sur l'ensemble du val la crue de sureté est de période de retour de 70 ans.

Il a été simulé un scénario d'inondation du val par une brèche située en amont immédiat du projet. Cette brèche vient en complément des 8 autres scénarios réalisés dans l'étude de dangers du val d'Orléans (scénarios qui concernent les secteurs à risque sur le val et qui donc n'intègrent pas le tronçon influencé par le projet de déviation).

Dans le scénario de brèche simulé, 33 000 personnes seront potentiellement inondées pour 61 000 personnes présentes dans le Val d'Orléans. Le scénario présente une gravité de niveau 4 (catastrophique) sur une échelle de 1 à 5.

La combinaison de la très faible probabilité du risque de rupture (très improbable) avec la forte gravité (catastrophique), induit un risque d'inondation qualifié de risque préoccupant ou tolérable sous conditions selon la grille d'analyse commune à l'ensemble des études de dangers.

Ce risque préoccupant est inférieur aux risques intolérables obtenus dans 5 des 8 scénarios de l'étude de dangers du val d'Orléans.

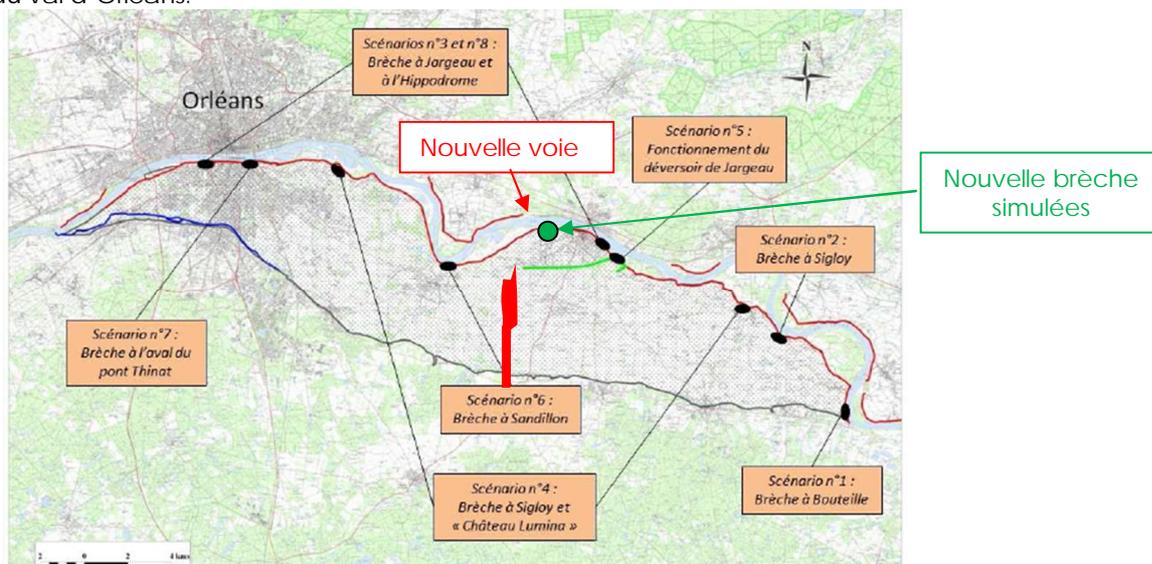


Figure 4 : Brèches simulées dans l'étude de dangers du val d'Orléans (source EDD, val d'Orléans)

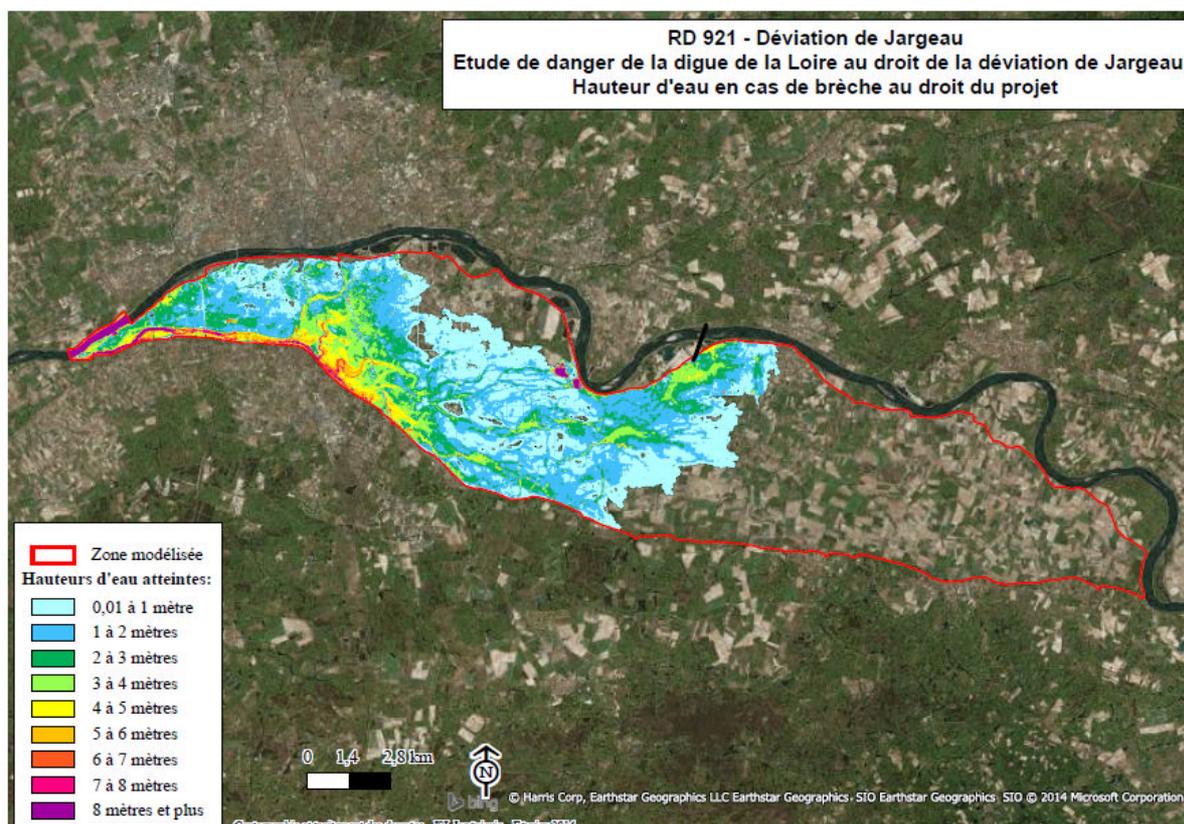


Figure 5 : Hauteurs d'eau simulées en cas de brèche au droit du projet

## 1.6. Mesures de réduction du risque

Les travaux prévus permettent au droit du projet de ne pas augmenter les risques de rupture. Le secteur étudié ne présentant pas de risque significatif de rupture par rapport à d'autres secteurs mis en avant dans l'étude de dangers du val d'Orléans, il n'est pas préconisé de travaux de protection autres que ceux liés à la réalisation de la voie.

La surveillance de la digue sera néanmoins adaptée pour prendre en compte le double usage du remblai au droit du croisement entre la voie routière et la digue. Le gestionnaire de la voirie réalisera (en plus de sa propre surveillance de la voirie et de son remblai dans le cadre de la gestion normale des voiries départementales) :

- § Une surveillance particulière du tassement et des écoulements en pied de remblai dans le cadre des opérations d'entretien courant ;
- § Une surveillance approfondie en cas de débit de la Loire supérieur à 4200 m<sup>3</sup>/s (mise en eau du pied de digue et de l'ouvrage de décharge du pont).

Les services du Conseil Général mobilisés pour cette surveillance auront reçu une formation spécifique leur permettant de comprendre le fonctionnement d'une digue, d'adapter leur travail d'entretien et de surveillance aux spécificités d'un tel ouvrage et d'harmoniser avec les services de la DDT les pratiques et relevés d'observations.

## 2 RENSEIGNEMENTS ADMINISTRATIFS

### 2.1 Propriétaire et gestionnaire de l'ouvrage

La levée d'Orléans ainsi que la Loire font partie du domaine public fluvial et sont donc propriétés de l'Etat. L'acte le plus ancien attestant de la propriété de l'état français date de 1571.

La Direction Départementale du Loiret est gestionnaire de la levée d'Orléans pour le compte de l'Etat.

Sur l'emprise de la future route départementale, une convention de superposition d'affectation sera signée entre le Conseil Général du Loiret et la DDT du Loiret (cf. exemple en annexe n°3).

### 2.2 Classement de la levée d'Orléans

La levée d'Orléans a été classée au titre de l'article R 214-113 du code de l'environnement comme digue de classe A en date du 24 novembre 2011.

L'arrêté est joint à la présente étude en annexe n°1

### 2.3 Etude de dangers du val d'Orléans

Cette digue fait partie du système de protection du Val d'Orléans qui a fait l'objet d'une étude de dangers globale réalisée en décembre 2012 par la DREAL Centre pour le compte de la DDT du Loiret (gestionnaire de l'ouvrage).

Dans la suite du rapport cette étude sera appelée : EDD du val d'Orléans ou étude de dangers du val d'Orléans. En cas d'absence de la référence «Val d'Orléans», il est fait mention de l'étude de dangers locale liée au projet de déviation.

### 2.4 Rédacteur de l'étude de dangers relative au projet de déviation

L'étude de dangers liée au projet de la RD 921-déviations de Jargeau et Saint Denis de L'Hôtel a été réalisée par ISL Ingénierie. ISL ingénierie est agréée pour cette étude au titre du décret du 11 décembre 2007 sous le n°7 « digues et barrage – études, diagnostics et suivi des travaux ».

M.BERTHELOT et M.DE BONVILLER d'ISL ingénierie sont intervenus pour réaliser cette étude.

### 3 OBJET DE L'ETUDE

Dans le cadre du projet de franchissement de la Loire par la future déviation de Jargeau, il est prévu un franchissement de la digue de la Loire en rive gauche (cf. illustration ci-après).

Cette digue fait partie du système de protection du Val d'Orléans qui a fait l'objet d'une étude de dangers global réalisée en décembre 2012 par la DREAL Centre pour le compte de la DDT du Loiret (gestionnaire de l'ouvrage).

Or, le franchissement de la digue par la nouvelle chaussée induit une modification locale de la digue et des conditions d'écoulements en crue autour de la digue.

L'objet de l'étude est donc de réaliser l'étude de dangers de cette portion de digue de la Loire en prenant en compte la nouvelle configuration de la digue et de son environnement.

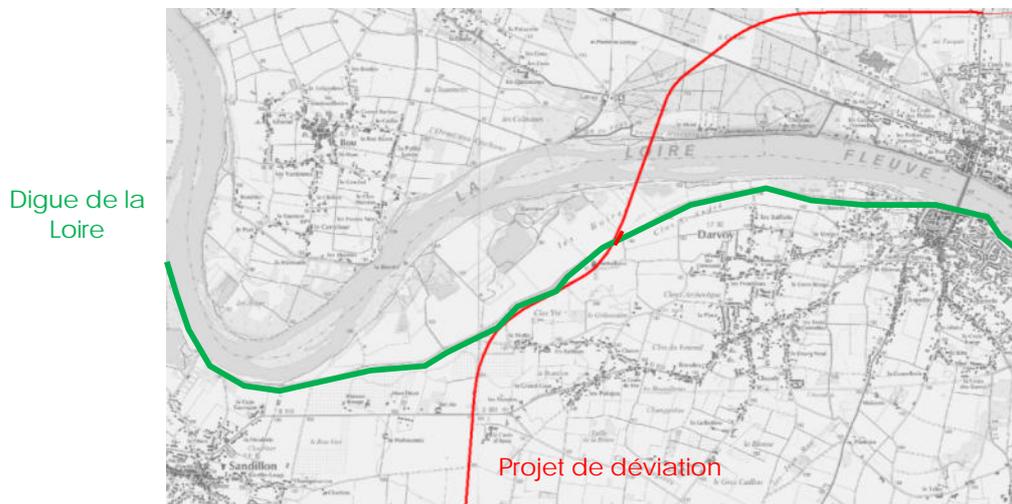


Figure 6 : Localisation générale du projet de déviation

#### 3.1 Zone aménagée

La digue faisant l'objet de l'étude est appelé « levée de Darvois à Saint Denis en val » et est située dans le Département du Loiret, sur la commune de Darvois à l'Est d'Orléans.

Le linéaire de digue étudié couvre 700 m entre les PK 19.85 et 20.55 (zone impactée par le projet). La voirie d'une largeur de 30 m est située au PK 20.45.

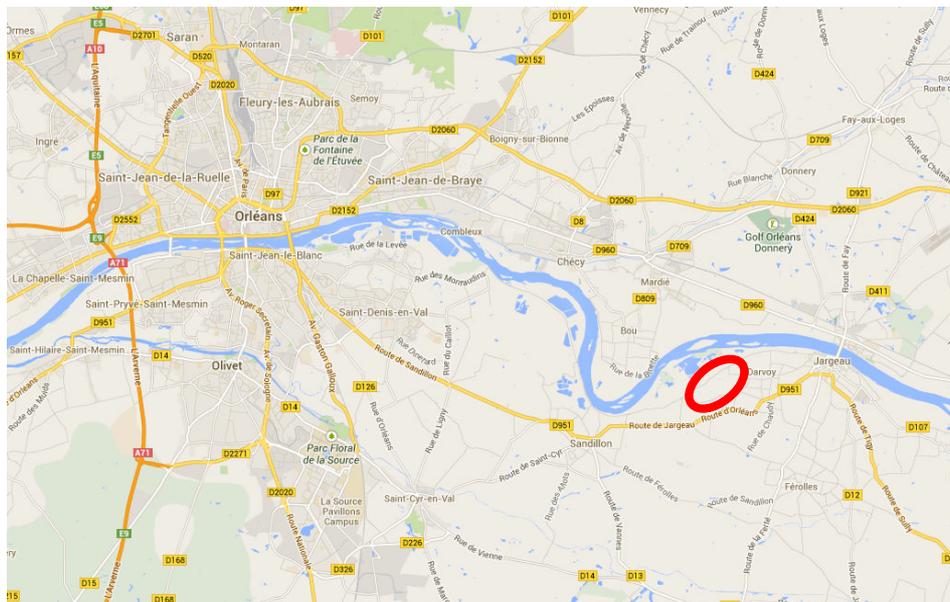


Figure 7 : Localisation générale de la zone d'étude

### 3.2 Périmètre de l'étude

Le tronçon de digue concerné par l'aménagement fait partie du système de protection du val d'Orléans. Le val d'Orléans est défini comme l'ensemble des terrains protégés de la Loire en rive gauche entre les communes de Guilly et Saint-Hilaire-Saint-Mesmin (en aval d'Orléans) soit une distance de 33 km environ. La limite aval du val est constituée par la confluence Loire/Loiret. 17 communes sont situées intégralement ou partiellement dans le val pour une surface totale de 165 km<sup>2</sup> et environ 61 000 habitants.

## La levée d'Orléans et les communes du val

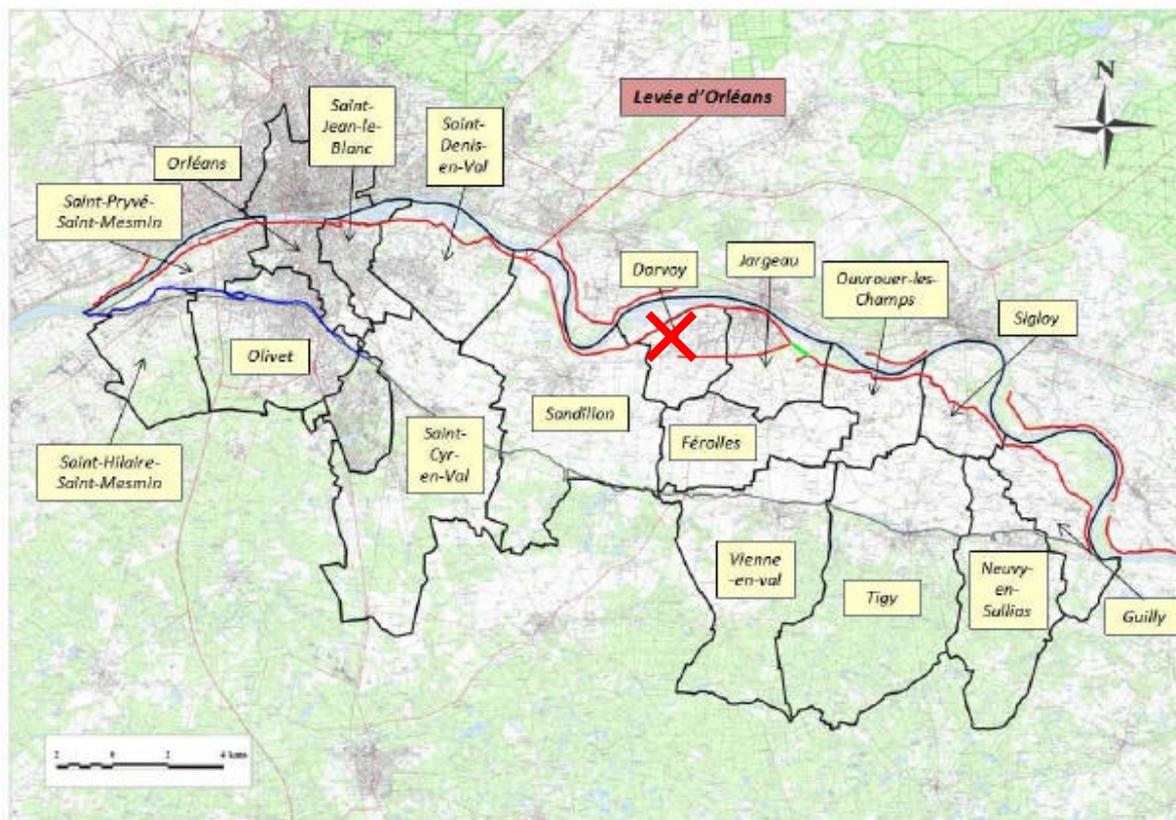


Figure 8 : Communes incluses dans le système de protection du val d'Orléans (source : EDD du val d'Orléans)

### 3.3 Intégration du projet dans le contexte de la Loire moyenne

Le val d'Orléans est situé le long de la Loire moyenne, c'est-à-dire entre les confluences de l'Allier et de la Maine. Plusieurs vals endigués existent en amont du val d'Orléans, mais ils restent de taille réduite et ont donc un impact limité sur les écoulements de la Loire au droit du val d'Orléans. A l'aval, deux autres vals de classe A existent : le val de Tours et le Val d'Authion.

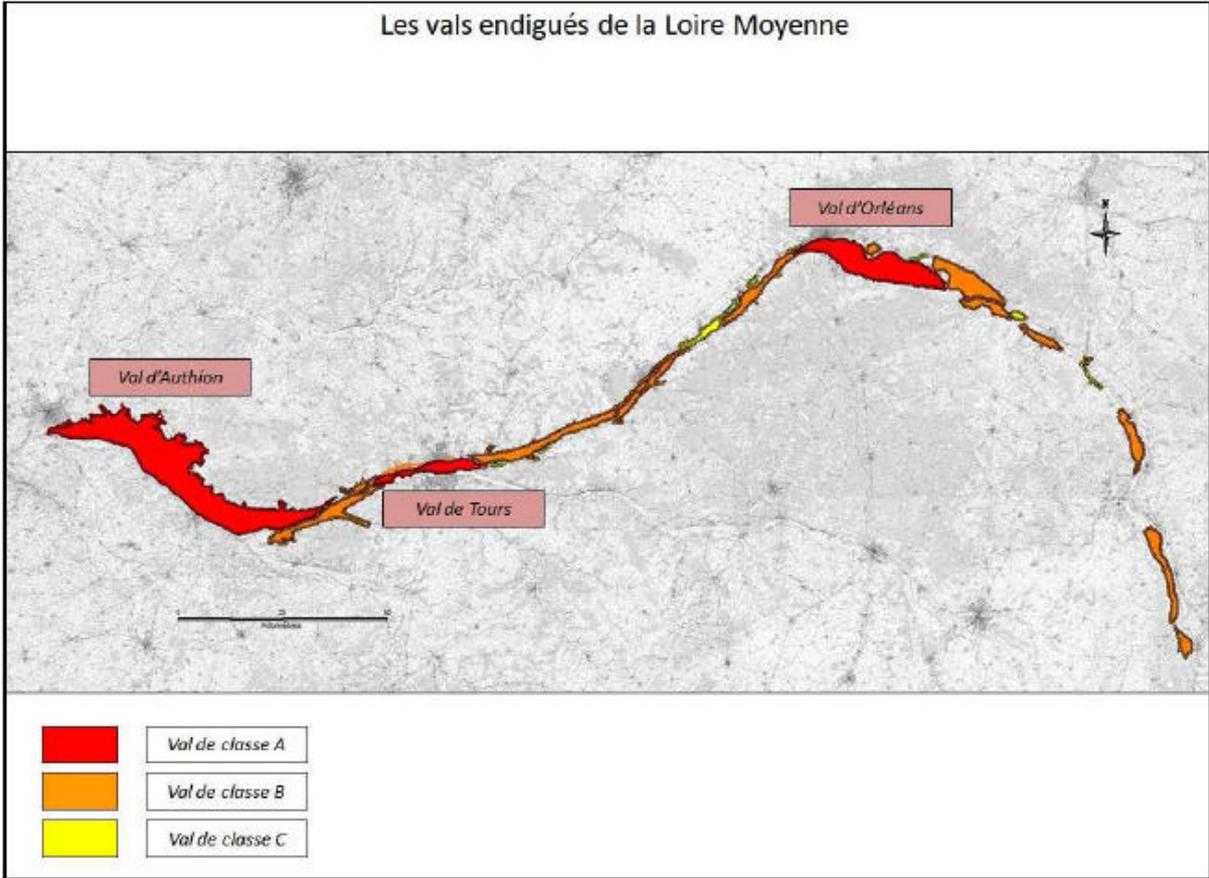


Figure 9 : Présentation des vals endigués de la Loire moyenne (source : EDD du val d'Orléans)

## 4 ANALYSE FONCTIONNELLE DE L'OUVRAGE ET DE SON ENVIRONNEMENT

### 4.1 Description des ouvrages

#### 4.1.1 Préambule

Les informations générales sont largement empruntées du rapport relatif à l'étude de dangers réalisée par la DREAL Centre (EDD du val d'Orléans).

#### 4.1.2 Historique

A l'image de l'ensemble de digues de la Loire, les premières références aux levées du val d'Orléans datent du VIII<sup>ème</sup> siècle ; depuis cette date, les digues ont été successivement relevées pour se protéger contre les crues.

Les derniers aménagements importants datent de la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle. Ils font suite aux grandes crues de 1846, 1856 et 1866 qui se sont traduites par des inondations importantes du val suite à plusieurs brèches.

Les digues sont équipées en 1882 d'un déversoir fusible situé sur la commune de Jargeau. Ce déversoir a pour objectif de réduire les débits en aval et ainsi éviter des brèches par surverse à proximité d'Orléans.

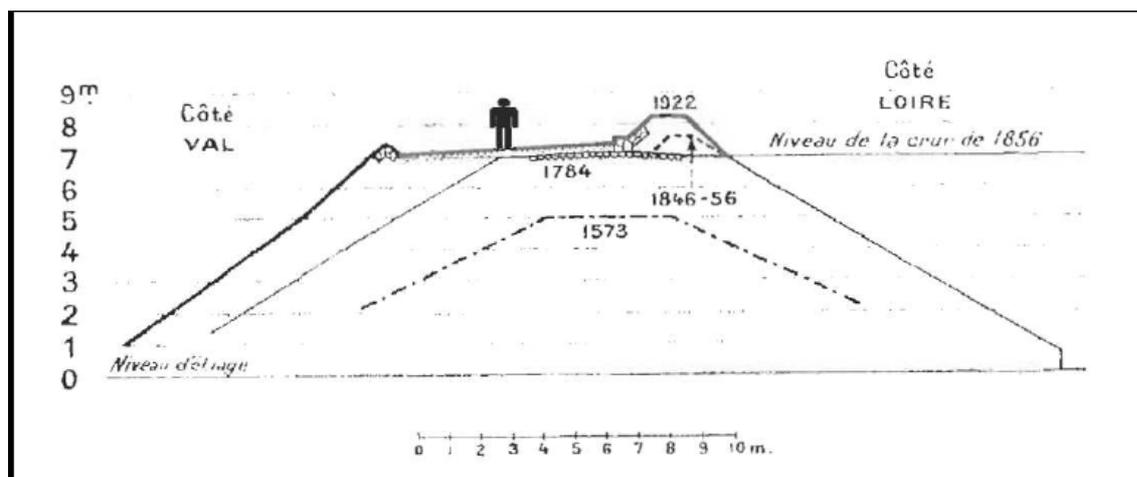


Figure 10 – Evolution des digues de la Loire (sources : R.DION Le val de Loire, 1934)

#### 4.1.3 Géométrie

La digue de la Loire, sur la zone d'étude, comprend les éléments suivants :

- § une crête de digue composée d'une voirie centrale de 5 m de large,
- § deux banquettes en tête de talus coté Loire et coté val,
- § un talus coté Loire présentant une pente de 1V/3H environ ; il est muni d'un perré maçonné recouvert de terre végétale. Ce perré n'est plus apparent en état actuel. Le lit vif de la Loire est situé à plus de 500 m du pied de la digue (contrairement à ce qui est indiqué sur le schéma ci-après),
- § un talus coté val de pente égale à 1V/3.4H environ. Le talus est végétalisé. Un fossé assure le drainage des eaux en pied.

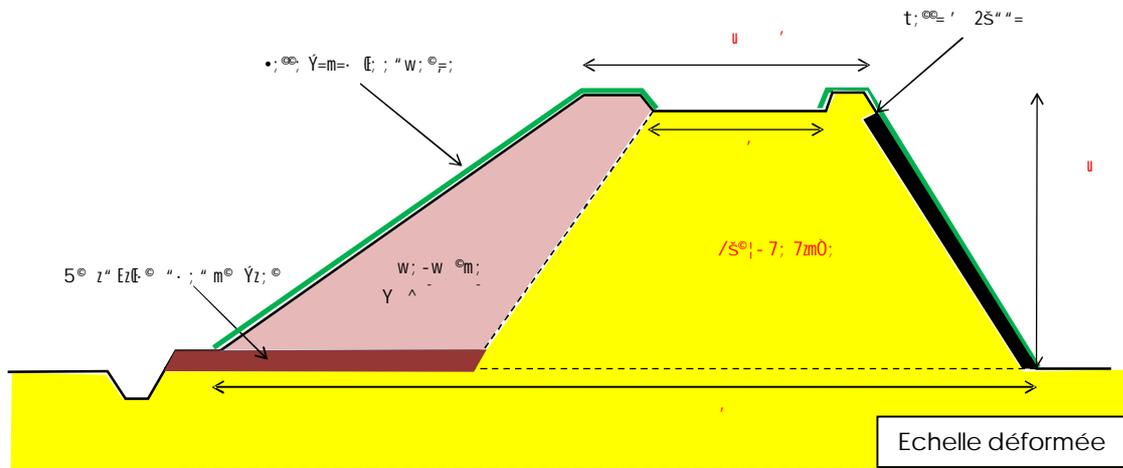


Figure 11 - Coupe type – Digue de la Loire au droit du projet de franchissement

Les principales caractéristiques des tronçons sont définies dans le tableau suivant (PK 20.45).

	Crête de digue (en mNGF)	Largeur en crête	Talus côté val	Talus côté Loire
Partie nord	105.13 m nGF + 0.20 m avec la banquette	~ 10,5 m	TN pied = 101.73 Fruit 3.4 H / 1 V	TN pied = 101.29 Fruit 2.9 H / 1 V

Tableau 1 : Principales caractéristiques de la digue de la Loire au droit du site

Contrairement à ce qu'indique la figure 11, la digue est en retrait de 130 m minimum du lit mineur de la Loire. La digue est implantée en champs majeur gauche et dans l'intrados d'un méandre.

#### 4.1.4 Géotechnique

La carte géologique du BRGM au 1/ 50 000 (La Ferté Saint Aubin) indique que la zone d'étude est composée des formations suivantes :

- § Alluvions modernes et récentes à dominantes sableuse (FZ et Fy) ;
- § Formation des marnes et calcaires de Beauce.

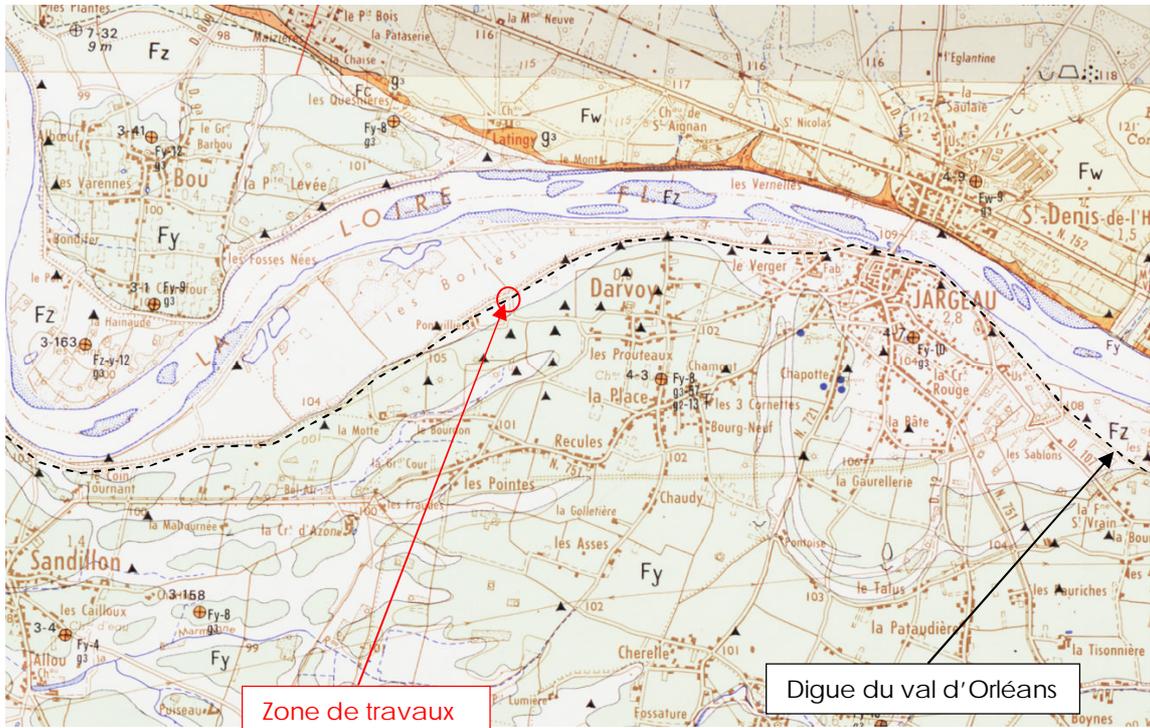


Figure 12 : Contexte géologique dans l'environnement immédiat du projet (source : Infoterre-BRGM)

L'étude géotechnique réalisée pour l'étude de dangers du val d'Orléans indique que les digues reposent sur trois couches successives au droit du projet :

- § Les alluvions argilo-limoneux, qui sont issus des dépôts récents des crues de la Loire. Ils présentent une épaisseur de 0.7 à 1.3 m et une perméabilité de  $10^7$  m/s ;
- § Des alluvions sablo-graveleux, plus perméables ( $10^5$  m/s) d'une épaisseur de 7 à 8 m au droit du projet ;
- § Un substratum calcaire généralement altéré sur les premiers mètres.

Pour compléter l'analyse géotechnique de l'étude de dangers du val d'Orléans des investigations locales ont été réalisées au droit du franchissement de la digue (entre les Pk 20.40 et 20.50). Les études géotechniques sont en annexe n°2.

Ces investigations ont permis de préciser la composition locale des sols. On note 3 évolutions significatives :

- § La couche de fondation qui est composée du même matériau que le corps de digue. Il n'y a donc pas d'assise argilo limoneuse. Néanmoins, la couche d'alluvions sablo-limoneux d'épaisseur de 3 m repose sur une couche plus perméable d'alluvions grossiers argileux
- § Le substratum est situé entre 13 m à 17 m sous la crête de digue contre 10 m dans le profil général du tronçon. On notera que la profondeur du substratum présente des variations importantes
- § Au Nord Est du profil (à partir du PK 20.40), une couche de substratum calcaire fortement altéré comblé par les matériaux sableux se développe sur une épaisseur de 2 à 2.5 m.

Il faut noter que la recharge coté val n'a pas fait l'objet d'investigations complémentaires. Les deux graphiques ci-après indiquent les profils géotechniques à l'issue des investigations complémentaires.

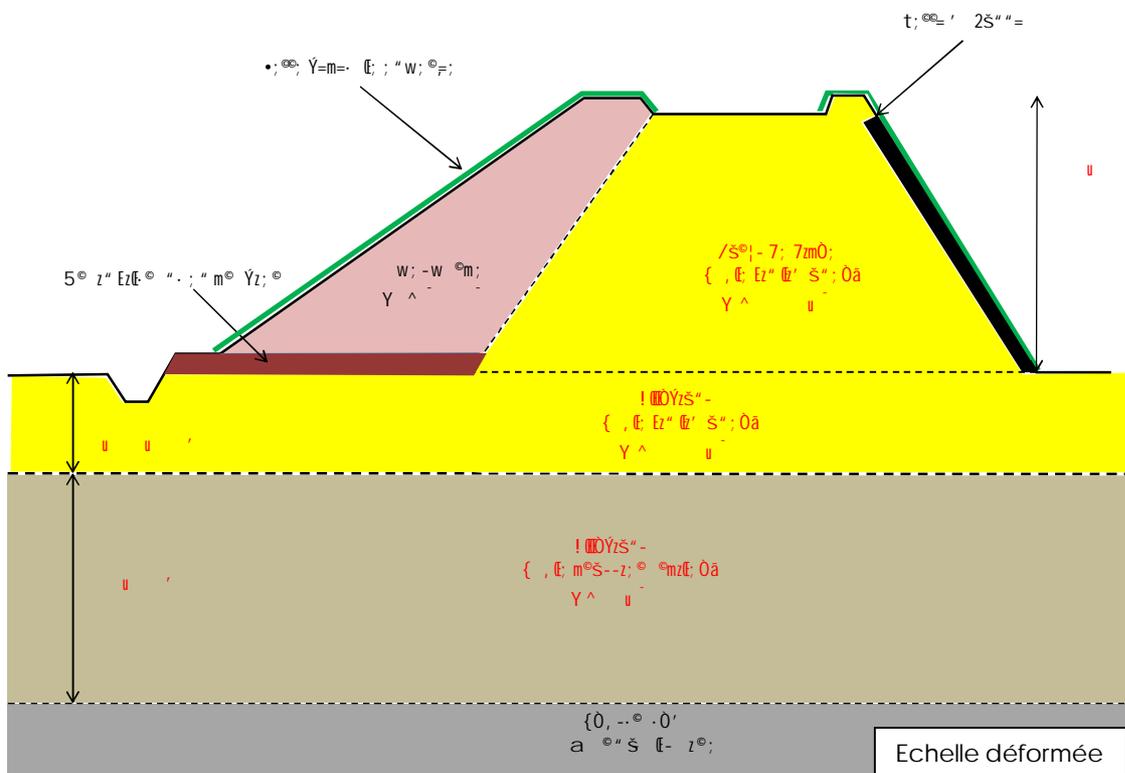


Figure 13 – Profil géotechnique synthétiques du PK 20.50 à 20.45

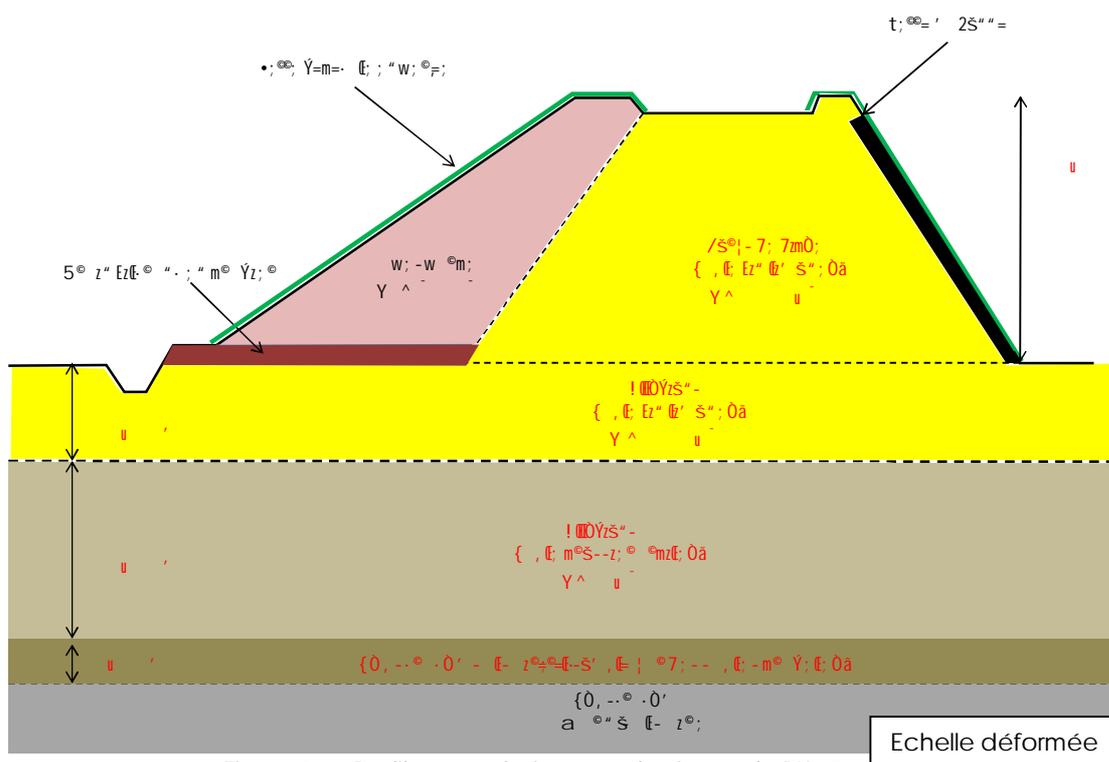


Figure 14 – Profil géotechnique synthétiques du PK 20.40 à 20.45

Le tableau ci-après indique les perméabilités obtenues par les investigations complémentaires. Les résultats pour le corps de digue et l'assise sous la digue sont supérieurs à la gamme retenue pour l'étude de dangers du val d'Orléans (d'un facteur 2 à 4). Pour les alluvions, la perméabilité est plus faible d'un facteur 2 à 3. Il en résulte une plus grande homogénéité des perméabilités entre les différentes couches de sols.

Matériau	Perméabilité retenue dans l'étude de dangers du val d'Orléans	Perméabilité investigation complémentaire
Corps de digue, initial	Entre $10^{-6}$ et $10^{-7}$ m/s	2 à 4 . $10^{-6}$ m/s
Recharge aval	Entre $10^{-4}$ et $10^{-5}$ m/s	-
Assise sous digue	Entre $10^{-6}$ et $10^{-7}$ m/s	2 à 4 . $10^{-6}$ m/s
Alluvions	$10^{-5}$ m/s	4 . $10^{-6}$ m/s

Tableau 2 : Perméabilité du corps de digue et des fondations

Le tableau ci-après indique les caractéristiques géotechniques des matériaux qui ont été retenus dans la suite de l'étude.

Matériau	Classification GTR	Compacité	PI* (MPa)	Perméabilité (m/s)	Cohésion (kPa)	Angle de frottement (°)
sable limoneux	A1/A2	Modeste à moyenne	0.19 à 0.84	$1.8 \cdot 10^{-6}$ à $3.7 \cdot 10^{-6}$	4.5	25
sable grossier	B5 / B2 / C1B5 / C1B2	Faible à élevée	0.13 à 4.29	$4.3 \cdot 10^{-6}$	9	38.1
calcaire altéré comblé	C1B5	Elevée	2.31		42	39
substratum marno calcaire		Elevée	2.06 à 5.00			

Tableau 3 : Synthèse des données géotechniques (source : étude géotechnique en annexe n°2)

## 4.2 Incidence du projet

Le projet consiste à réaliser un contournement du centre urbain de Jargeau par l'ouest (cf. figure n°1). Pour cela il est prévu de traverser selon un axe Sud-Nord l'intégralité de la vallée de la Loire. Le linéaire de voirie est décomposable en 4 sections :

- § La section sud, traversant l'ensemble du val d'Orléans en léger remblai ;
- § Le franchissement de la digue du val d'Orléans au PK 20.45. Pour cela, la route est en remblai afin de franchir la digue au niveau de la crête de celle-ci ;
- § Un pont pour franchir le lit endigué de la Loire. Sur la largeur de 1 050 m du lit endigué, un viaduc d'une longueur de 570 m assure le franchissement du lit mineur et un ouvrage de décharge d'une longueur de 75 m permet d'assurer une continuité des écoulements en lit majeur gauche. Le reste du linéaire (405 m) est traversé en remblai.
- § Une voirie de raccordement au réseau actuel sur les coteaux au Nord de la Loire.

Les deux figures ci-après issues du dossier loi sur l'eau de l'aménagement représentent le projet à proximité de la digue.

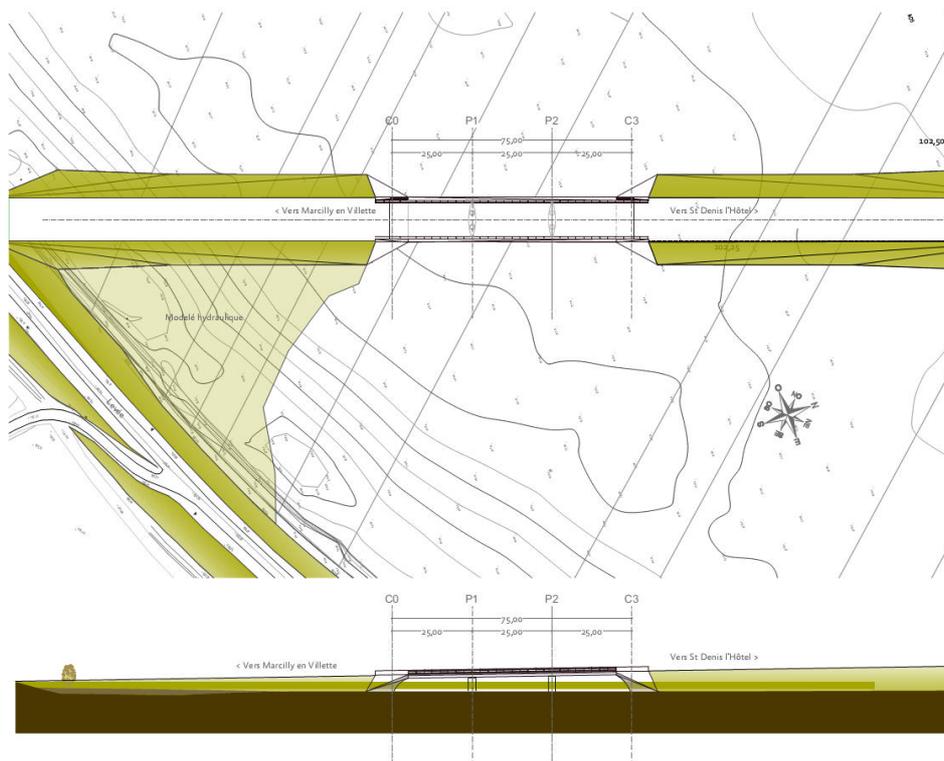


Figure 15 : Vue de l'ouvrage de décharge à proximité du projet



Figure 16 : Intégration du projet dans le paysage.

Le graphique ci-après indique les dispositions constructives pour le franchissement de la levée. L'objectif est de franchir la digue tout en conservant le niveau de sécurité actuel de la protection. Les caractéristiques des remblais de la digue ne sont pas adaptées aux contraintes issues du trafic routier. Il y a notamment un risque de tassement.

Pour éviter le tassement, différentes solutions techniques ont été comparées. Le choix s'est porté sur l'implantation dans le corps de digue de corps d'inclusions rigides (béton) pour soutenir la plateforme routière jusqu'au niveau du substratum rocheux. La pose d'inclusions rigides va induire une déstructuration locale du remblai de la levée ce qui pourrait augmenter les écoulements internes. Aussi, un rideau de palplanches continu est-il ajouté. Il permet de réduire les écoulements à l'intérieur du corps de digue et prévenir contre les processus d'érosion interne.

Le dimensionnement des inclusions a été réalisé en respectant les préconisations du projet national Amélioration des Sols par Inclusion Rigide (ASIRI).

Le projet comprend donc :

- § 78 pieux de 15 m de profondeur moyenne et de diamètre de 35 cm. Ces pieux sont espacés de 2.9 m conformément aux prescriptions du projet ASIRI qui recommande un entraxe inférieur à 3 m pour ce type de pieux ;
- § 2 à 3 couche de géotextile sur 550 m<sup>2</sup> chacune (y compris recouvrement et enclavage). Ces géogrilles superposées permettent de reporter les efforts sur les têtes de pieux et ainsi réduire l'épaisseur du matelas. Une étude spécifique de dimensionnement permettra de calculer le nombre de couche de géogrille et leurs espacement dans le matelas de répartition;
- § Une couche de matelas de répartition sur 0.8 m de hauteur minimum ;
- § Un rideau de palplanche de 35 m de longueur, fiché à 4.25 m sous le pied de digue (soit 8.2 m sous la crête de digue).
- § Des dalles de répartition pour assurer une transition entre le remblai routier et la digue renforcée ;

La réalisation du projet, permet de réduire le tassement à environ 4 cm après réalisation du projet. La charge liée à la voirie et le matelas de répartition (y compris la géogrille) estimé à 38 KPa est reporté à 86% en tête des pieux. Le reste de la charge (5 KPa ou 500 kg/m<sup>2</sup>) est portée par la digue.

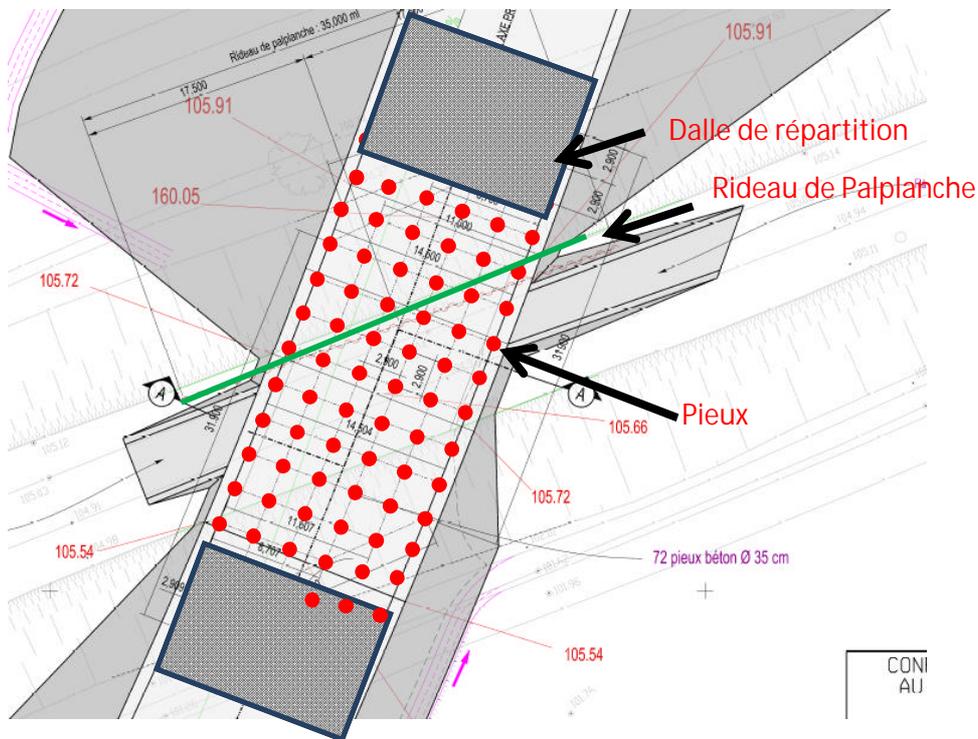


Figure 17 : Vue en plans de la voirie au droit du franchissement de la digue

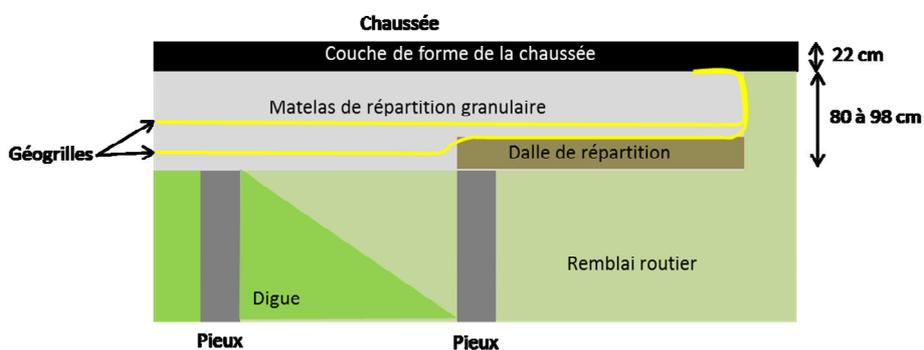


Figure 18 : Coupe de principe de la structure de chaussée

Le projet ne prévoit pas d'ouvrage traversant.

## 4.3 Description de la zone protégée

### 4.3.1.1 Emprise de la zone protégée

L'emprise de la zone protégée a été définie dans l'étude de dangers du val d'Orléans comme la zone située sous le niveau de la crête des digues.

La zone protégée est longue de 33 km pour une largeur variant entre 3 et 7 km. La surface totale protégée est de 167 km<sup>2</sup>.

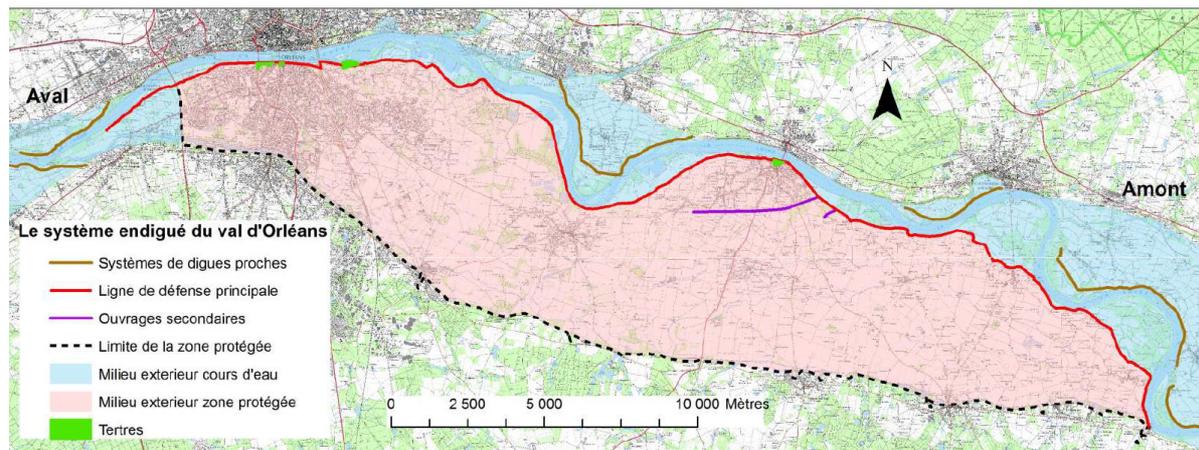


Figure 19 : Zone protégée (source : EDD du val d'Orléans)

### 4.3.1.2 Estimation de la population résidente

La population du val d'Orléans est estimée à environ 61 000 personnes dont la moitié dans la zone urbaine d'Orléans.

Environ 2/3 de la population vit en habitat individuel avec, dans la majorité des cas, un étage refuge.

### 4.3.1.3 Estimation des activités et enjeux particuliers

Il est compté 13 Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE) et 1200 exploitations agricoles sont situées dans le val.

La population salariée dans le val est estimée à 15 500 emplois dont 10 000 dans la zone urbaine d'Orléans.

### 4.3.1.4 Infrastructures dans la zone protégée

14 axes routiers majeurs, 2 voies ferrées (tramway d'Orléans et voie SNCF) ainsi que 138 enjeux sensibles ont été identifiés dans la zone protégée. La majorité est située dans la zone urbaine d'Orléans.

Enjeux	nombre
Axes routiers	14
Axes ferrés	2
Crèches, maternelles	30
Ecoles primaires	29
Enseignement secondaire	15
Hôpitaux	5
ERP médicalisés	12
Autre ERP de santé	16
Mairie	21
Police, gendarmerie, pompier	10
Total	154

Tableau 4 : Nombre d'infrastructures et d'enjeux sensibles

# 5 PRESENTATION DE LA POLITIQUE DE PREVENTION DES EVENEMENTS MAJEURS ET DU SYSTEME DE GESTION DE SECURITE

## 5.1 Organisation du gestionnaire

Le gestionnaire des digues du val d'Orléans est la DDT du Loiret. Plus précisément c'est le pôle «Loire » du service Loire Risque Transport (SLRT) qui est en charge de la gestion de l'ensemble des digues (de l'Etat) du département et donc de la levée d'Orléans.

Ce Pole Loire est réparti sur trois implantations :

- § Au siège de la DDT à Orléans ;
- § Au centre d'exploitation d'Orléans, qui assure la surveillance et l'entretien de la digue du val d'Orléans en aval de Sigloy. C'est donc ce centre qui assurera la gestion de la digue concernée par cette étude ;
- § Au centre d'exploitation de Gien.

La voirie qui franchit la digue, sera gérée par le conseil général via ses services d'entretien des voies départementales.

## 5.2 Consignes d'exploitation et de surveillance

Les consignes écrites de gestion de la digue par la DDT du Loiret ont été rédigées en septembre 2012.

### 5.2.1 Types de visite

Les visites de surveillance sont de 5 types :

- § les visites de surveillance continue ;
- § les surveillances périodiques y compris les visites techniques approfondies ;
- § la surveillance en crue ;
- § la surveillance post-crue ;
- § la surveillance exceptionnelle ;

### 5.2.2 Surveillance continue

Elle consiste en une surveillance visuelle des éventuels désordres sur la digue et ses abords.

- § Si un éventuel désordre est signalé (en interne ou en externe) un agent du pôle « Loire » réalise une visite de terrain ;
- § Si le désordre est confirmé, il est consigné dans le cahier de relevés de désordre ;
- § Des travaux sont ensuite programmés le cas échéant.

Cette surveillance est réalisée :

- § Par le gestionnaire des levées dans le cadre de son activité normale ou lors des opérations d'entretien ;

- § Et par le conseil général pour la portion de digue située dans l'emprise définie dans la convention d'occupation. Le conseil général informera le gestionnaire des éventuels désordres repérés lors des opérations d'entretien sur la voie.

### 5.2.3 Surveillance périodique

Cette surveillance consiste en :

- § Deux visites de surveillance par an permettant de faire un bilan de l'entretien régulier de la digue (cf. surveillance continue) ;
- § Une visite technique approfondie (VTA) réalisée chaque année par une équipe mixte : gestionnaire / prestataire extérieur à la DDT.

Tous les relevés de ces visites sont compilés dans le rapport de surveillance annuel remis au préfet à chaque fin d'année.

### 5.2.4 Surveillance en crue

En décembre 2012, un Plan départemental de Surveillance des levées (PSL) a été mis en place pour organiser la surveillance en crue.

L'objectif de cette surveillance est de détecter tout désordre sur les digues lors d'une crue de la Loire et d'en suivre l'évolution.

Cette surveillance est activée à partir comme suit :

- § Cote de 3.4 m sur l'échelle de Gien sans annonce de la cote de 5.00m à 48h: surveillance par les équipes du pôle Loire ;
- § Cote de 3.4 m sur l'échelle de Gien avec annonce de la cote de 5.00m à 48h : mise en alerte et déclenchement du niveau 1- surveillance est réalisée de jour par les équipes de la DDT du Loiret.
- § Cote de 5.00 m à Gien : surveillance de niveau 2, avec une prévision à la hausse, les visites sont intensifiées et réalisées 24h sur 24.

### 5.2.5 Surveillance post-crue

La surveillance post-crue vise à repérer les traces d'érosion ou d'affouillement le long des digues. Cette surveillance est réalisée dès que le niveau à Gien repasse sous les 3.4 m.

A l'issue de ces visites un rapport sur l'évènement est produit et intégré au dossier d'ouvrage.

Le conseil général assurera après chaque évènement de crue, une visite du remblai routier et de l'ouvrage de décharge afin de :

- § Enlever les éventuels embâcles dans l'ouvrage de décharge et le coin formé par le remblai routier et la digue ;
- § S'assurer de la bonne tenue du remblai routier au droit de la digue (zone d'érosion par exemple).

### 5.2.6 Surveillance exceptionnelle

Cette surveillance a lieu à la suite d'un évènement exceptionnel (hors crue) tel que :

- § Un séisme ;
- § Un embâcle de glace ;
- § Un mouvement de terrain, notamment par effondrement karstique.

## 5.3 Mise en sécurité des populations

Le plan Orsec du département inclut un plan d'évacuation de la population située dans la zone protégée par la levée d'Orléans.

Cette évacuation est enclenchée quand la Loire dépasse le niveau de sureté de la digue de protection (débit de 4 200 m<sup>3</sup>/s à Orléans soit 4.6 m à l'échelle d'Orléans).

## 5.4 Avis général et application au site d'étude

Sur la portion de digue étudiée deux gestionnaires vont intervenir :

- § La DDT pour la levée de la Loire;
- § Le Conseil Général pour la route départementale.

La réalisation de la voirie induit l'évolution des règles de surveillance pour prendre en compte le nouvel ouvrage et la présence de deux gestionnaires : la DDT pour la digue, le Conseil Général pour la voirie.

Une convention entre la DDT et le conseil général sera signée (cf. modèle de convention en annexe n°3) pour la superposition de gestion de la digue au droit du franchissement par la future voie. Il sera notamment proposé :

- § Une formation des agents du CG aux problématiques de gestion d'une digue;
- § Un échange d'information avec la DDT.

Au droit du projet, il sera notamment levé les désordres éventuels suivants :

- § Les tassements de la digue et répercussion sur la voirie (déformation/fissuration de la chaussée) ;
- § Les venues d'eau non claires en pied de remblai ;
- § Toute manifestation sur la chaussée des éventuels effets des contraintes locales associées aux inclusions rigides et rideau de palplanche.

Dès que les surveillances en crue sont activées (c'est-à-dire pour une cote de la Loire à Gien supérieure à 3.4 m), la surveillance de la digue doit pouvoir être menée sans devoir descendre de l'ouvrage. Il est donc prévu un raccordement de la levée à la future voirie (réglementée par des barrières anti-infraction) qui permettra la continuité de l'itinéraire de surveillance.

En temps normal, la surveillance et l'entretien seront maintenus en passant pas le bas de la digue coté Loire (itinéraire cyclable de la Loire à vélo).

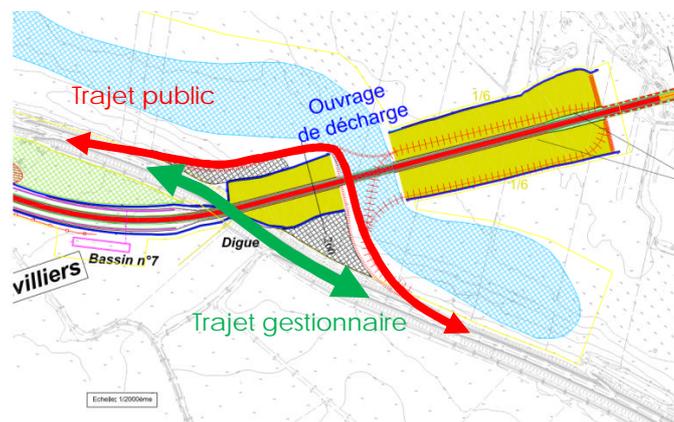


Figure 20 : Trajet sur la digue (source : dossier loi sur l'eau de la déviation de Jargeau)



Figure 21 : Photomontage de la levée de Loire montrant le raccordement à la déviation



Figure 22 : Graphimontage de la levée de Loire montrant le raccordement à la déviation

De plus, lors de crues, les gestionnaires se coordonnent pour assurer une surveillance spécifique et renforcée.

## 6 IDENTIFICATION ET CARACTERISATION DES POTENTIELS DE DANGERS

### 6.1 Identification des potentiels de dangers

Pour l'ensemble de la levée d'Orléans, l'étude de dangers identifiait 6 potentiels de dangers :

- § Ouverture d'une brèche sur un tronçon de la levée ;
- § Un fonctionnement du déversoir de Jargeau ou surverse sans brèche ;
- § Un dysfonctionnement des clapets anti-retour des canalisations traversant la levée ;
- § Une remontée de nappe dans le val en arrière des levées et résurgence du Loiret ;
- § Remous par le Loiret dans la partie aval non protégée par des digues ;
- § Inondation par ruissellement.

La portion de digue impactée par le projet est uniquement concernée par le premier potentiel de dangers : ouverture d'une brèche. En effet :

- § Le déversoir de Jargeau est hors zone d'étude ;
- § Il n'y a pas de canalisation traversant la levée sur le linéaire étudié ;
- § Le potentiel de dangers lié à une remontée de la nappe de la Loire n'est pas impacté car le rideau de palplanche mis en place coupe les alluvions sur une largeur réduite (60m) et donc n'affecte pas la dynamique générale de la nappe ;
- § La zone d'étude est en amont d'Orléans et du Loiret, elle n'est donc pas concernée par les deux derniers potentiels de dangers.

## 7 CARACTERISATION DES ALEAS NATURELS

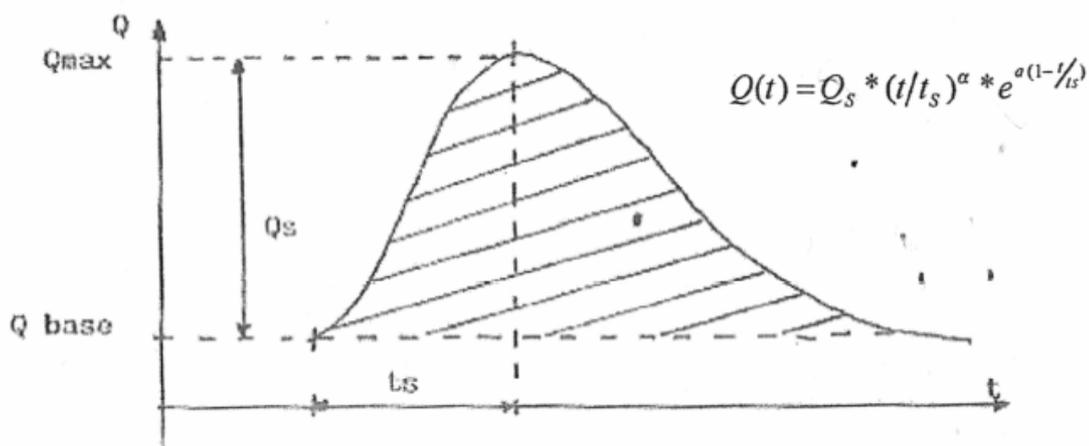
Il est présenté dans un premier temps les aléas naturels identifiés dans l'étude de dangers et rapportées à la portion de digue étudiée (Pk 19.85 à 20.55).

Dans un second temps, il sera identifié les aléas naturels liés à la réalisation du pont sur la Loire (risque d'embâcle)

### 7.1 Crues de la Loire

Les conditions d'écoulement en crue au droit du projet ont été tirées de plusieurs études existantes telles que « Etude Loire Moyenne- Synthèses des connaissances hydrologiques » (Equipe pluridisciplinaire PLGN, 2001) et l'expertise hydrologique de la Loire moyenne réalisée par le bureau Hydro expertise. Ces études couvrent le secteur de Loire compris entre la confluence avec l'Allier (Bec d'Allier) et la confluence avec la Maine (à Angers).

A partir des analyses des crues historiques, il a été considéré une forme théorique des hydrogrammes de crue au droit du Bec d'Allier. Ces hydrogrammes théoriques sont de type PERSON III (cf. illustration ci-après).



Les hydrogrammes de crues écrêtés par le barrage de Villerest (cf. tableau ciaprès) ont été ensuite propagés sur l'aval à l'aide d'un modèle 1D-casier appelé dans sa dernière version LM10-EDD. Ce dernier permet d'obtenir au droit du projet les débits de crue en tenant compte des effets de la propagation et des apports des affluents. Ainsi le débit cinq-centennal au droit de la zone d'étude est de 7 500 m<sup>3</sup>/s contre 8 500 m<sup>3</sup>/s au Bec d'Allier. Il est considéré dans le modèle LM10 EDD qu'il n'y a pas de rupture de digue sur les vals en amont d'Orléans (uniquement des surverses le cas échéant) ce qui est plutôt maximisant pour les débits de la Loire.

Période de retour	Débit naturel au Bec d'Allier écrêté par Villerest (m <sup>3</sup> /s)	Débit écrêté par Villerest au Bec d'Allier (m <sup>3</sup> /s)	Débit en amont de la zone d'étude (m <sup>3</sup> /s)
50 ans	5 200	4 200	4 040
70 ans	6 000	5 000	4 660
100 ans	7 000	6 000	5 520
170 ans	7 500	6 500	5 900
200 ans	8 000	7 000	6 100
500 ans	9 500	8 500	7 500

Tableau 5 : Comparaison des débits de crues (source EDD du val d'Orléans):

La graphique ci-après présente les hydrogrammes de crue au droit de Jargeau pour les périodes de retour comprises entre 50 ans et 500 ans. Pour la crue de 500 ans, il est considéré que le déversoir de Jargeau n'est pas mis en fonctionnement.

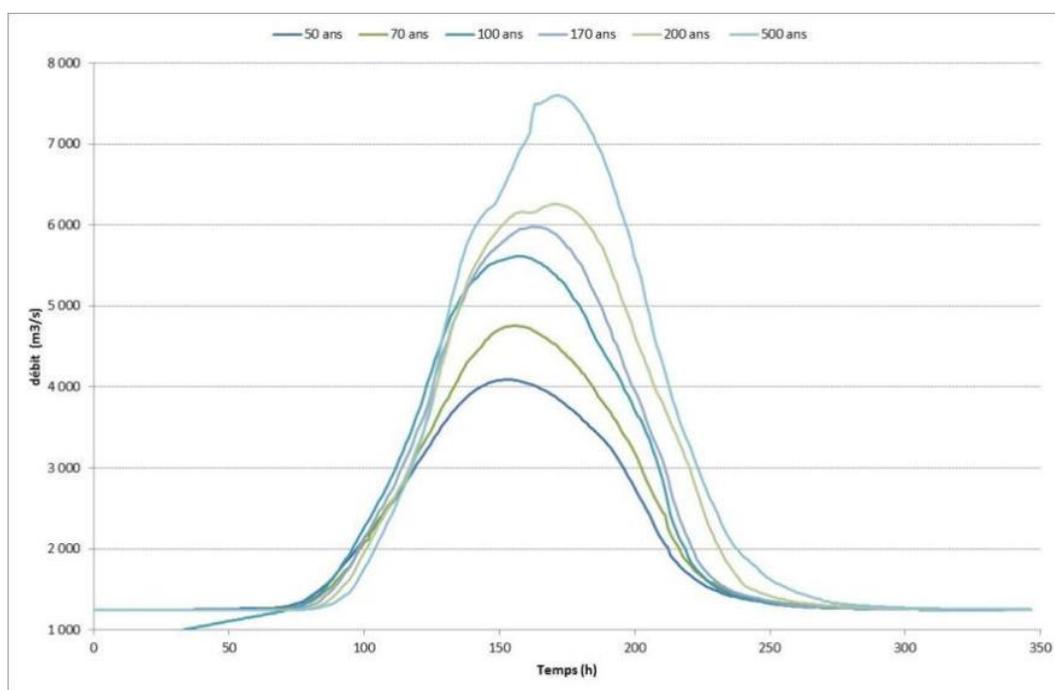


Figure 24 : Hydrogrammes de crue simulés à Jargeau (modèle LM10-EDD)

## 7.2 Embâcle et débâcles de glaces

Ce phénomène survient quand la température sur l'amont de la Loire devient négative pendant plusieurs jours.

Ce phénomène se caractérise par une formation d'une couche de glace qui ralentit les écoulements et peut provoquer une accumulation d'eau, puis à la faveur d'une remontée des températures, les bouchons de glace se libèrent rapidement en générant une crue et en charriant des blocs de glace.

Cet aléa peut avoir pour conséquence :

- § Une mise en charge des ouvrages par montée du niveau d'eau et obstruction par les blocs de glace ;
- § Une sollicitation mécanique des digues par collision avec les blocs de glaces.

## 7.3 Géologie et morphologie de la Loire

Dans le cadre de l'étude de dangers du val d'Orléans, une analyse morphologique de la Loire a été réalisée sur le secteur par le CETE Normandie Centre (annexe n°15 de l'étude de dangers du val d'Orléans).

Il est indiqué en première partie de cette étude que la Loire présente un déficit global de matériaux lié :

- § à la présence de barrages qui réduisent le débit solide ;
- § à l'absence de crues morphogènes depuis le milieu du 19<sup>ème</sup> siècle ;
- § aux extractions de matériaux.

En conséquence, la Loire a tendance à se chenaliser suite à un abaissement du lit jusqu'au niveau du substratum rocheux. Cet abaissement du lit pourrait à terme déstabiliser les berges et mettre à nu les fondations des digues situées à proximité. De plus, les bras secondaires de la Loire sont sollicités moins souvent ce qui conduit à leur végétalisation. Cette végétalisation augmente les hauteurs d'eau en crue et le risque d'embâcle.

Néanmoins, cet aléa ne présente pas un risque élevé pour la portion de digue étudiée car :

- § La digue est positionnée en retrait du lit mineur (de 200 m à 600 m). Les évolutions du lit mineur ont ainsi peu d'effet,
- § un seuil rocheux naturel au droit du pont limite les risques d'abaissement supplémentaire du lit mineur.
- § la digue est située dans l'intrados d'un méandre, zone privilégiée de dépôt ;
- § Les débits dans le lit majeur sont faibles (120 m<sup>3</sup>/s en crue cinq centennale) ce qui limite les risques d'érosion et d'embâcle en pied de digue.

La construction du pont sur la Loire n'induit pas une modification significative de la dynamique de la Loire (lit vif et lit majeur). Les impacts du pont sont uniquement locaux (affouillement au droit des piles et des culées du pont) donc sans incidence sur les terrains en pied de digues. On se reportera à l'étude hydraulique qui détaille les effets sur les vitesses d'écoulement pour différents débits.

## 7.4 Séismes

La section de digue étudiée est située en zone de sismicité très faible.

## 7.5 Risque effondrement karstique

Le risque d'effondrement karstique est un risque important sur le linéaire étudié. Ce risque est lié aux formations calcaires du substratum rocheux situées sous les digues de la Loire. Ces formations calcaires sont parcourues de cavités souterraines qui peuvent s'effondrer en entraînant le sol, ce qui provoque des fontis.

Ces fontis peuvent fragiliser les digues et augmenter le risque d'érosion interne, de glissement de terrain ou de surverse.

L'état actuel des connaissances sur le risque d'effondrement karstique ne permet pas de probabiliser cet aléa.

Afin de préciser le risque karstique au droit du projet des investigations géophysiques locales ont été réalisées avec un profil en long de la digue (cf. figure 23) et un profil en travers (cf. figure 24).

Ces investigations montrent que le substratum calcaire est fortement altéré au droit du projet. En surface, les zones altérées sont comblées par des matériaux fins. Le risque en état actuel est qualifié de fort. Néanmoins, il faut noter que sous la base de la digue, le substratum calcaire paraît non altéré (centre des profils 1 et 2). De plus, il n'y a pas de vide karstique relevé sur l'ensemble de forage réalisé sur l'emprise du projet.

La réalisation du projet peut faire craindre les évolutions suivantes :

- § Ouverture de cavités lors de la réalisation des inclusions dont la butée correspond au substratum calcaire. L'étude géotechnique a préconisé le suivi des paramètres de forage des pieux et la réalisation de sondages destructifs sous la base de pieux pour détecter toute anomalie ;
- § La concentration des écoulements dans les karsts sous la digue du fait de la mise en place du rideau de palplanches qui bloque une partie des écoulements. Cette concentration des écoulements favoriserait la dissolution du substratum calcaire et donc l'apparition de cavités karstiques. Le dimensionnement de la profondeur des palplanches a intégré ce risque. En effet, la base des palplanches est située dans les alluvions à 8.5 m au dessus du toit du substratum calcaire. Cet éloignement des palplanches du substratum permet d'éviter une forte augmentation des infiltrations dans le substratum (estimée à travers le gradient de pression). Le gradient hydraulique au niveau du toit des calcaires passe de 0.06 à 0.09 en état projeté sur une largeur de 10 m uniquement (cf. illustration ci-après extraites du modèle présenté dans le paragraphe 9.4).

Durant la phase de travaux et lors des contrôles d'inspection de la digue (notamment durant le battage des palplanches) il sera suivi l'évolution des sols à proximité de la digue (apparition de fissures, affaissement, fontis) mettant en évidence de potentiel développement d'une cavité karstique.

Sur la zone concernée uniquement par un remous hydraulique (situation 2), l'impact du remous est non significatif sur le risque d'effondrement karstique du fait que les gradients hydrauliques dans et à proximité de la couche calcaire ne sont pas modifiés

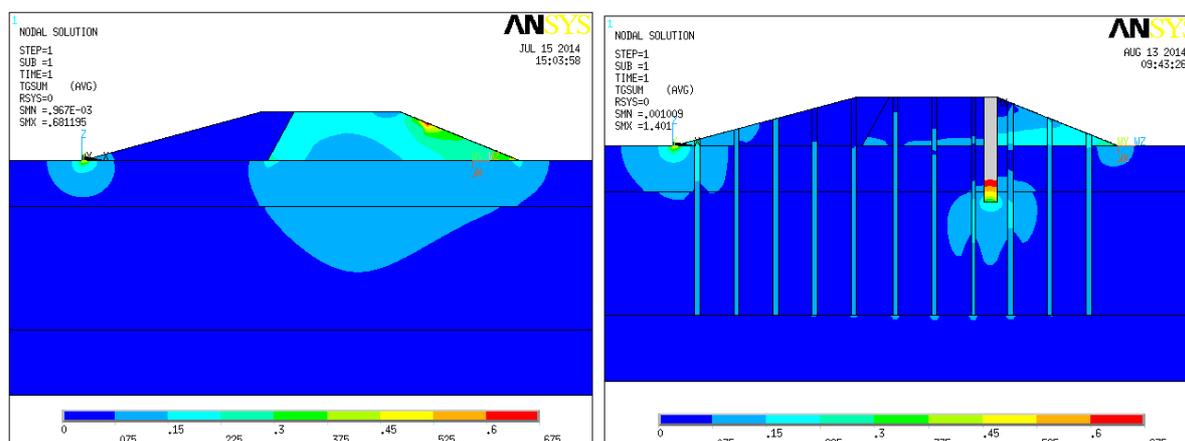


Figure 25 : Impact du rideau de palplanche sur les gradients de pression

La solution retenue pour le confortement de la digue au passage de la route ne modifie pas de façon sensible l'aléa d'effondrement karstique.

Les mesures de suivi en phase travaux notamment permettront une gestion de cet aléa.

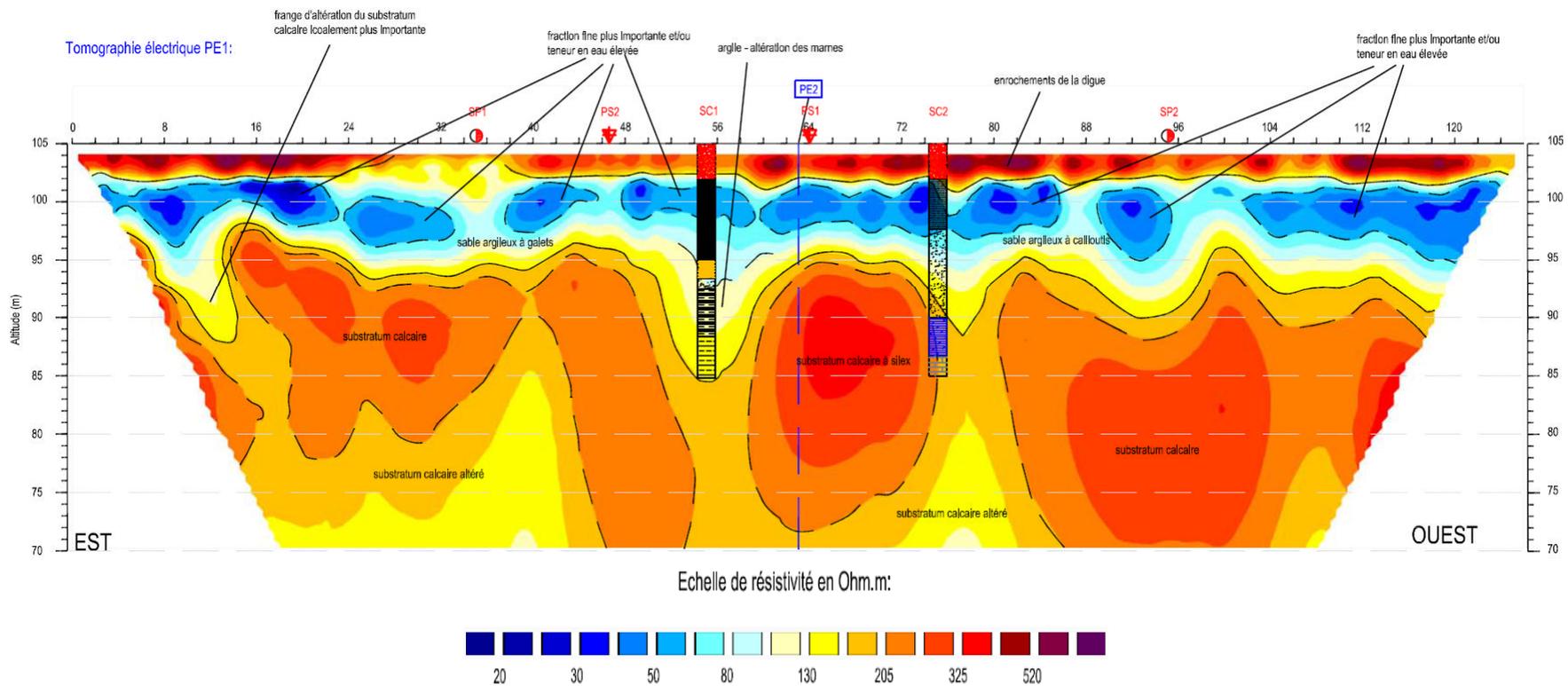
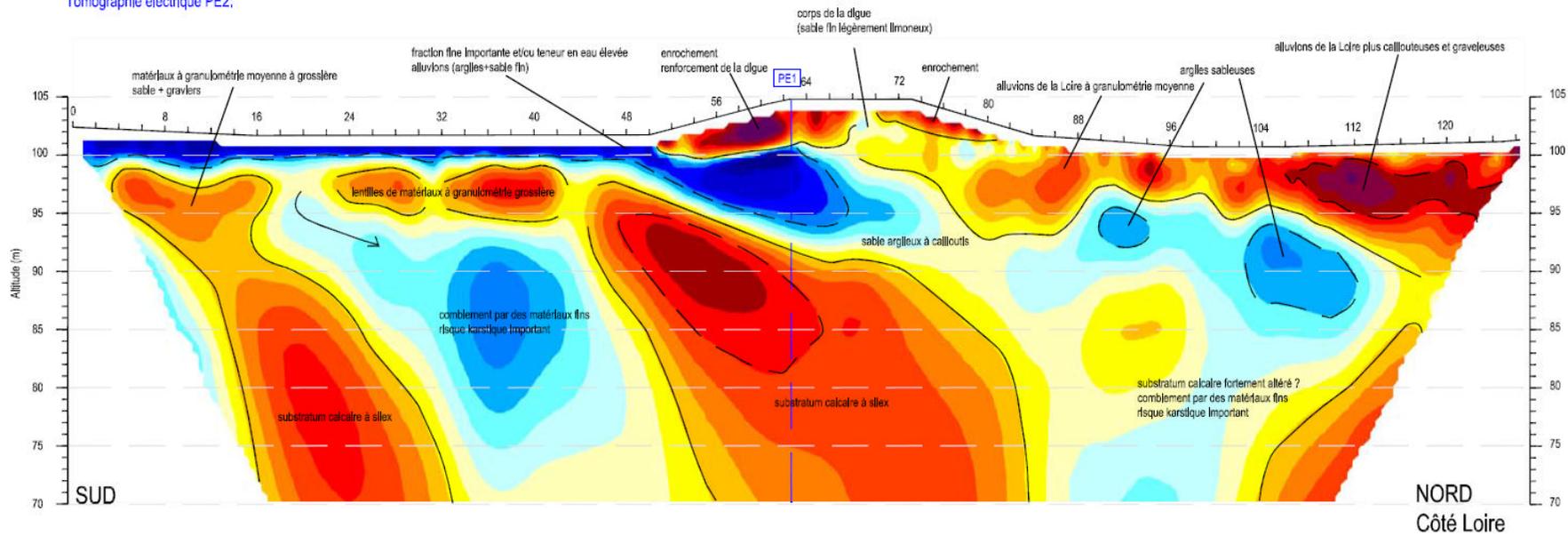


Figure 26 - Profil géophysique longitudinal du centre de la digue (source : étude géotechnique en annexe n°2)

Tomographie électrique PE2:



Echelle de résistivité en Ohm.m:



Figure 27 - Profil géophysique en travers digue (source : étude géotechnique en annexe n°2)

## 7.6 Aléa lié au pont

### 7.6.1 Présentation de l'étude hydraulique du pont

Pour étudier l'impact du projet de pont sur les écoulements dans le lit endigué de la Loire, il a été réalisé une étude hydraulique spécifique.

Pour cette étude, il a été monté un modèle hydraulique 2D entre le déversoir de Jargeau et le méandre de Sandillon. Pour ce modèle, il a été utilisé :

- § les données topographiques LIDAR fournies par la DREAL ;
- § le modèle 1D casier de la Loire (LM10-EDD) de l'étude de dangers du val d'Orléans pour les conditions aux limites.

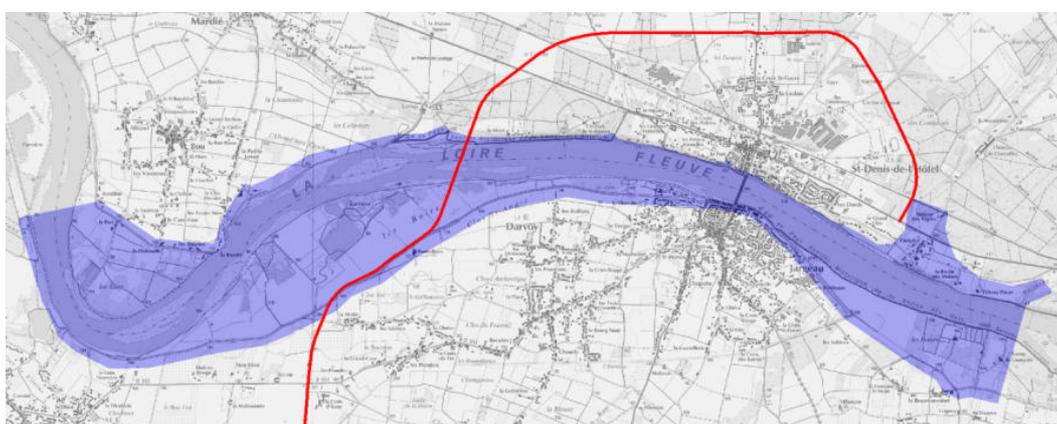


Figure 28 - Emprise de la zone modélisée

Ce modèle a été calé sur les crues de décembre 2003 (période de retour de 20 à 30 ans) et de novembre 2008 (période de retour de 2 à 5 ans). A l'issue du calage, l'écart moyen par rapport aux 8 cotes de crues mesurées est de 3 cm avec un écart maximum de 17 cm (cf. graphique ci-après).

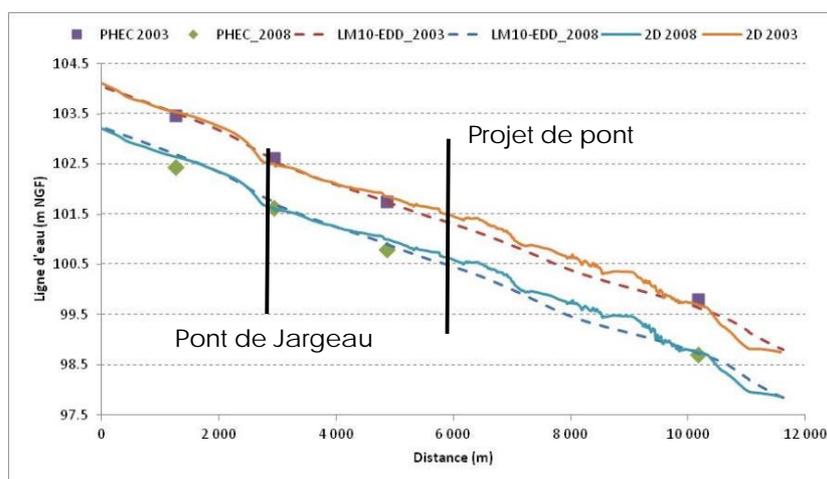


Figure 29 : Profil en long et PHEC pour les crues de 2003 et 2008

Etat actuel

L'analyse comparative des profils en long des lignes d'eau maximum entre le modèle LM10-EDD (utilisé dans l'étude de dangers du val d'Orléans) et le modèle 2D de l'étude hydraulique de la Loire, met en évidence des écarts variables entre les deux modèles (cf. figure 22):

- § Ecart très faible <10 cm sur l'amont du modèle (amont du pont de Jargeau) et l'aval du modèle (méandre de Sandillon) ;
- § Un écart important (40 cm) entre le pont de Jargeau et le méandre de Sandillon.

L'écart le plus important entre les 2 modèles est donc constaté au droit du futur pont dans un secteur où :

- § Le lit présente de nombreux méandres et a subi des évolutions depuis 1995 (dates des levés topographiques utilisés dans le modèle LM10-EDD) ;
- § La topographie utilisée dans le modèle 2D est plus fine (lidar sur les îles+ semis de point en lit mineur).

On peut conclure que le modèle 2D est plus précis dans ce secteur et représente mieux les conditions actuelles d'écoulement.

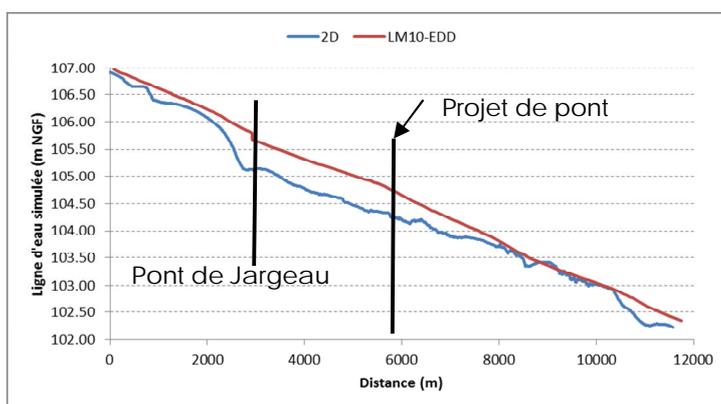


Figure 30 : Profil en long pour la crue de période de retour de 500 ans

#### Etat projeté

Le projet de franchissement de la Loire, traverse le lit endigué sur une distance de 1050 m linéaire avec un angle de 75° par rapport à l'axe d'écoulement.

L'ouvrage est composé de trois éléments :

- § Un viaduc au-dessus du lit vif d'une longueur de 570 m soit 54% du linéaire du franchissement et 95% du débit circulant en état actuel ;
- § Un ouvrage de décharge de 75 m de largeur totale dans le lit majeur gauche (à 100 m du pied de digue) ;
- § Un remblai sur le linéaire restant.

Le viaduc sur le lit vif est composé de :

- § 5 piles d'une longueur de 8 m et d'une largeur de 3 m. 4 piles sont dans le lit vif et 1 pile est en champ majeur gauche ;
- § 6 travées de longueurs variables (entre 75 m et 115m) ;
- § 2 culées implantées dans le champ majeur. La culée en champ majeur gauche est située à 85 m en retrait de la berge.

La simulation de l'état projeté a montré que le pont induisait un remous hydraulique de 8 cm maximum dans le lit mineur de la Loire. Ce remous s'attenu sur l'amont et devient inférieur à 1 cm au droit du déversoir fusible de Jargeau.

## 7.6.2 Impact sur la ligne d'eau au pied de la digue

Le graphique ci-dessous indique, le remous hydraulique provoqué par l'ouvrage au pied de la digue. Le remous maximum est de 15 cm au droit de l'ouvrage et 7 cm au droit du point bas de la digue de la Loire situé au lieu dit « Clos saint André ». Ce remous est légèrement supérieur au remous dans le lit mineur.

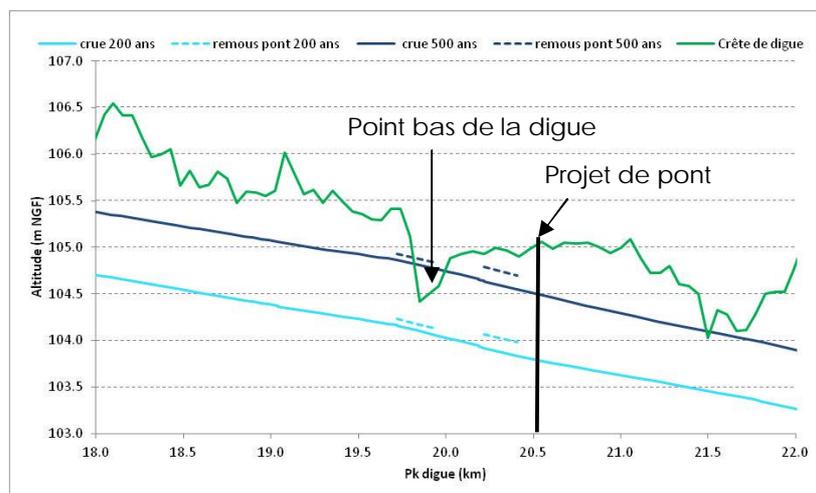


Figure 31 : Profil en long de la crête de digue et de la ligne d'eau cinq centennale en pied

Note : les lignes d'eau présentées sur la figure 31 sont issues d'un calcul à l'aide du modèle LM10-EDD (modèle 1D). Ce modèle donne des résultats différents du modèle TELEMAC 2D présenté dans les deux paragraphes précédents. Par souci de cohérence avec l'étude de dangers global du val d'Orléans, le modèle LM10-EDD sera utilisé pour l'analyse des risques de rupture.

## 7.6.3 Impact sur la morphologie de la Loire

Dans le cadre de l'étude hydraulique du pont sur la Loire, il a été analysé l'impact du pont sur le transport solide. Les conclusions sont les suivantes :

- § les seules évolutions attendues dans le lit vif, sont la reprise partielle de l'îlot central en aval du seuil et des affouillements localisés autour des piles. Cette faible évolution s'explique par la présence d'un seuil naturel rocheux au droit du pont qui contrôle le niveau du lit à l'amont. La remobilisation des engravements en aval des seuils naturels sera un processus relativement lent et la puissance spécifique ne sera significative qu'à partir d'une crue de période de retour supérieure à 30 ans.
- § pour l'ouvrage de décharge, les capacités de réajustement sont faibles et les conditions d'écoulement sont peu modifiées par rapport à l'état actuel. Ceci ne devrait pas conduire à une modification importante des lieux. Il faut noter, de plus, que l'ouvrage de décharge n'est mobilisé que pour des crues de période de retour supérieure à 50 ans. Les seules modifications du sol surviendront au droit des piles avec un affouillement localisé et limité à 1 ou 2 m (profondeur affouillable des piles).

En conclusion, le pied de digue ne devrait pas faire l'objet d'un affouillement lié à la présence du pont

## 7.6.4 Risque d'embâcle

La présence du pont augmente localement le risque d'embâcle qui provoquerait une augmentation locale de la ligne d'eau par rapport à la situation sans ouvrages.

Ce risque d'embâcle est néanmoins faible car les travées dans le lit mineur sont d'une longueur supérieure à 75 m et le tirant d'eau est supérieur à 1m (distance entre la sous face du tablier et la ligne d'eau maximum pour la crue cinq centennale).

Dans le lit majeur, l'ouvrage de décharge présente des travées plus courtes (25 m), le risque d'embâcle est donc plus élevé, même s'il reste très faible.

La situation avec embâcle a été étudiée en simulant l'obstruction totale de l'ouvrage de décharge (cas extrême). Dans cette configuration, le remous hydraulique au pied de la digue est de 31 cm (contre 15 cm avec l'ouvrage de décharge).

## 7.7 Synthèse

Le tableau ci-après synthétise l'analyse en listant les processus considérés dans l'estimation de l'aléa, le niveau de dangers associé et les développements possibles.

Aléa	Niveau de danger	Quantification plus détaillée dans la présente étude de dangers	Commentaire
Crues	Fort	oui	
Embâcle/débâcle de glace	Fort	Non	Quantification difficile. Mise en place de règles de surveillance
Effondrements karstique	Fort	Non	Quantification difficile. Mise en place de règles de surveillance
Evolution morphologique	Faible	Non	Surveillance
séismes	Très faible	Non	Règles de gestion en cas de séisme
Embâcle	Très faible	Non	Surveillance en cas de crue

Tableau 6 : Synthèse des aléas

## 8 ETUDE ACCIDENTOLOGIQUE ET RETOUR D'EXPERIENCE

### 8.1 Les données historiques récentes

La Loire présente la particularité de ne pas avoir connu de crue importante depuis 1907 (crue cinquantennale avec un débit de pointe estimé à 4050 m<sup>3</sup>/s à Orléans.) Cela signifie que le système d'endiguement a été peu sollicité sur les 100 dernières années et donc que le retour d'expérience récent sur le système de protection est faible.

La seule crue importante de ces dernières années est celle de 2003 avec une période de retour de 20 ans et un débit de pointe de 3240 m<sup>3</sup>/s à Orléans.

#### 8.1.1 Conséquence de la crue de 2003 sur la levée d'Orléans

La crue de 2003 a duré du 6 au 9 décembre. Le niveau d'eau a atteint dans certains secteurs le pied des digues. Il n'y a pas eu de « dégât notable sur les systèmes d'endiguement » selon l'étude de dangers du val d'Orléans.

#### 8.1.2 Conséquence de la crue de 2003 sur l'ensemble des digues de la Loire

Quelques incidents sur d'autres secteurs que le val d'Orléans sont signalés dans l'étude de dangers :

- § La découverte de terriers dans le corps de digue sur les communes de Beffes et Herry au moment de la crue ;
- § Un renard hydraulique sans brèches en amont de Tours ;
- § Une brèche sur une digue à Montrond les Bains dans le département de la Loire (20 m de large) ;
- § Une brèche d'une largeur de 40 m sur la digue de Maboux à Livry (sur l'Allier).

#### 8.1.3 Incident hors crues

Du fait de la nature Karstique des sols autour de la levée d'Orléans, il a été observé sur les dernières années des effondrements (ou fontis) sur les digues. Ainsi depuis 2002, 6 incidents de ce type sont signalés à Jargeau (pour trois d'entre eux) ou à proximité.

Il est indiqué dans l'étude de dangers, que si aucune brèche historique (détail dans le paragraphe suivant) n'a été attribuée à un effondrement karstique, ce phénomène a très probablement été à l'origine de certaines des brèches en facilitant la surverse par affaissement de la crête de digue.

## 8.2 Les brèches historiques du val d'Orléans

### 8.2.1 Les crues historiques de la Loire

Le tableau ci-après indique les crues importantes de la Loire à Orléans depuis 1789. Les trois crues majeures (débit supérieur à la crue centennale) ont eu lieu en 1846, 1856 et 1886. Il faut noter aussi que de nombreuses crues ont été aussi identifiées au 18<sup>ème</sup> siècle, mais peu d'informations sont disponibles.

Date de la Crue	Type de crue	Débit estimé (m³/s)	Période de retour
1789	Débâcle		
Novembre 1790	Océanique		
Décembre 1825	Océanique	5 100	80 ans
Juin 1835	Océanique	4 000	50 ans
Février 1841		3 700	40 ans
Octobre 1846	Mixte	7 100	170 ans
Juin 1856	Mixte	7 200	170 ans
Septembre 1886	Mixte	7 200	170 ans
Octobre 1872	Océanique	4 200	50 ans
Octobre 1893	Océanique	2 900	10 ans
Mars 1895	Océanique	3 200	20 ans
Octobre 1907	Cévenole	4 050	50 ans
Mars 1983	Océanique	3 070	10 ans
Décembre 2003	Cévenole	3 240	20 ans

Tableau 7 – Crues historiques à Orléans

### 8.2.2 Caractéristiques générales des brèches

Les caractéristiques des principales brèches dans le val d'Orléans sont présentées dans les deux tableaux suivants. Ces données sont issues de l'annexe n°18 de l'étude de dangers du val d'Orléans.

Date	Commune	noms	Largeur (m)	Hauteur digue (m)
1755	Jargeau	Les moulins	70	4.00
1755	Darvoy	La motte	110	4.00
1755	Sandillon	Sandillon	320	6.00
1755	Sandillon	Boix de bagneaux	200	2.80
1755	Saint Denis en Val	Melleray	300	
1789	Sandillon	Sandillon		
1790	Sandillon	La haute isle	225	4.80
1846	Sigloy	1 <sup>ère</sup>	100-140	
1846	Sigloy	2 <sup>ème</sup>	110-150	
1846	Ouvrouer	Loresse	100-230	
1846	Ouvrouer	Caillardière	90-120	4.65
1846	Jargeau	Fontaine	170-190	8.95
1846	Sandillon	Sandillon	260-420	6.70
1846	St Pryvé de Mesmin	Aval champs mars	100-300	2.00
1846	St Pryvé de Mesmin	Cabredée	60-100	6.48
1846	St Pryvé de Mesmin	Croix de Micy	85-120	7.58
1856	Sigloy	1 <sup>ère</sup>	120-125	4.90
1856	Sigloy	2 <sup>ème</sup>	425-540	4.10
1856	Jargeau	Jargeau	610-780	5.40
1856	Orléans	Chemin de fer	125-150	6.90
1856	Orléans	manceuvre	100	

Tableau 8 – Caractéristiques générales des brèches

Date	Commune	noms	Largeur (m)	Hauteur digue (m)
1856	St Pryvé de Mesmin	St Pryvé	50-60	6.20
1866	Sigloy	Levée amont	360	2.60
1866	Sigloy	Levée aval	55	1.13
1866	Ouvrouer	Caillardière	100	2.55
1866	Jargeau	Jargeau	300	5.52 à 6.29
1866	Saint denis en val	L'isle	250	2.82 à 5.45
1866	St Pryvé	Calabrée	35	3.5

Tableau 9 – Caractéristiques générales des brèches

Il est indiqué de plus l'origine des brèches pour les crues de 1846, 1856 et 1866 :

- § 5 des 7 brèches de 1846, ont pour origine une surverse ;
- § 2 des 3 brèches de 1856 ont pour origine une surverse avec une lame d'eau de l'ordre de 15 à 28 cm. La dernière brèche a été provoquée par un glissement de terrain ;
- § Toutes les brèches de 1866 sont provoquées par surverse avec des lames d'eau de 10 à 15 cm.

La rupture par surverse semble être donc le phénomène prépondérant ; néanmoins, les lames d'eau surversées restent faibles. Deux causes aggravantes pouvant expliquer la rupture par surverse sont identifiées :

- § La rupture de banquettes pour des faibles charges qui induit un effet d'entraînement qui augmente la force érosive sur la crête de digues ;
- § Des affaissements de la crête de digue durant la surverse par glissement ou érosion interne.

La largeur des brèches varie entre 35 et 780 m selon les estimations ce qui traduit une forte variabilité des processus de formation de brèches. La largeur moyenne des brèches est de 250 m.

### 8.2.3 Analyse détaillée de 3 brèches

La brèche de Sandillon en 1846 : rupture sans surverse

La largeur de cette brèche varie entre 260 m et 420 m. D'après l'analyse des données bibliographiques, il est indiqué les caractéristiques suivantes pour cette brèche :

- § Rupture par érosion interne ou par glissement avec un niveau maximum coté Loire entre 0 et 20 cm sous la crête de digue ;
- § Longueur de brèche de 400 m avec un arasement de la digue jusqu'à 1.5 m au-dessus du terrain naturel dans le val ;
- § Durée de formation de 1 h environ soit une progression de 7 m par minute.

La brèche de Jargeau en 1856 : rupture par surverse

Les caractéristiques de la brèche retenue dans l'étude de dangers sont :

- § Une rupture par surverse avec une lame déversante inférieure à 20 cm ;
- § Une longueur de brèche de 650 m et la création d'une fosse d'érosion de 0.50 m au pied de la digue coté val ;
- § Une durée de formation de 2 h soit une progression moyenne de 5 m par minute.

L'hydrogramme de rupture de la digue a pu être reconstitué à l'aide des données mesurées notamment sur les échelles limnimétriques en amont et aval du projet. Le débit déversé augmente très rapidement en début d'évènement, ce qui traduit l'extension de la brèche. Le niveau se stabilise ensuite (ralentissement de la vitesse d'élargissement de la brèche).

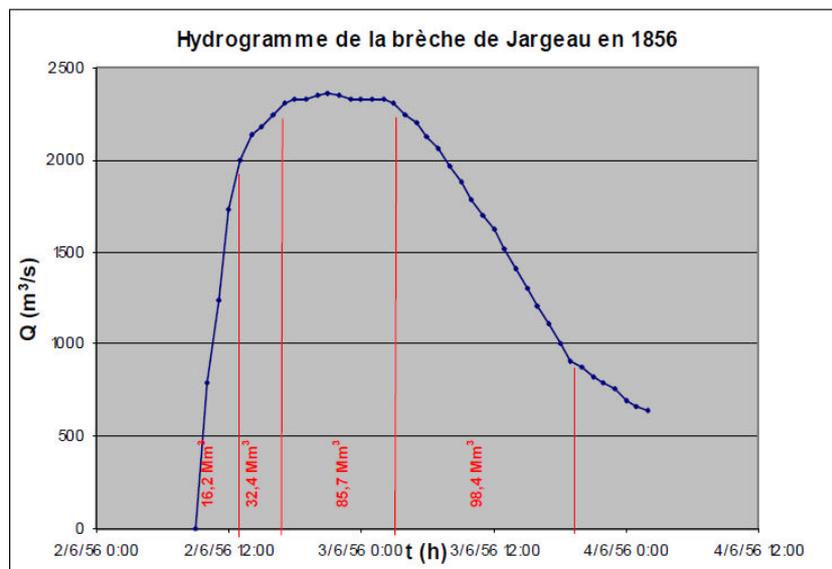


Figure 32 - Hydrogramme de la brèche de Jargeau de 1856 (source : EDD du val d'Orléans)

Cet hydrogramme a été utilisé pour caractériser les débits entrants dans les scénarios de brèches de l'étude de dangers du val d'Orléans.

La brèche de Jargeau et du château de l'Isle en 1866

Les deux brèches présentent les caractéristiques suivantes :

- § La brèche est causée par infiltration dans la banquette cotée Loire, puis rupture de la banquette et enfin surverse avec une lame d'eau de 0.2 à 0.25 sur la crête digue (sans prendre en compte la banquette)
- § Une longueur de brèches de 250 m à 300 m avec une fosse d'érosion de 0 à 1.5 m sous le terrain naturel coté val ;
- § Une durée de formation rapide (quelques heures) soit 1 m à 2 m par minute de progression latérale.

#### 8.2.4 Caractérisation des fosses d'érosion

Dans le cadre de l'EDD du val d'Orléans, 26 brèches historiques du val d'Orléans ont fait l'objet d'une analyse. Cette analyse comprend une estimation des fosses d'érosion. Ainsi sur 26 brèches, 19 fosses d'érosion ont pu être caractérisées. Pour la majorité d'entre elles, la largeur de la fosse d'érosion est proche de la largeur de la brèche. La longueur de la fosse d'érosion varie entre 50 et 300 m. Elle reste néanmoins réduite à moins de 100 m pour 13 des 19 fosses d'érosion analysées. Ces fosses se développent essentiellement coté val. Un développement coté Loire, par érosion régressive, peut survenir sur une distance limitée. Si le lit mineur de la Loire est à proximité, cette érosion régressive atteindra la berge et mettra en connexion le lit mineur et la fosse d'érosion.

### 8.3 Synthèse

Il est recommandé dans « l'étude des brèches dans le val d'Orléans » menée par le CETE de retenir :

- § Pour brèche sans surverse, une largeur de brèche de 400 m avec un temps de formation d'une heure ;
- § Pour une brèche par surverse, un enclenchement pour une hauteur surversée de 20 cm. La brèche présente une largeur de 650 m pour un temps de formation de 2 heures ;
- § une fosse d'érosion de 1 m de profondeur moyenne et de longueur égale à 300 m.

# 9 IDENTIFICATION ET CARACTERISATION DES RISQUES

## 9.1 Description et principe de la méthodologie utilisée

### 9.1.1 Méthodologie générale

L'analyse est réalisée en plusieurs étapes :

- § Une première étape d'identification des modes de rupture envisageables (surverse, érosion interne...);
- § Une seconde étape de probabilisation de ces modes de rupture pour chaque condition hydraulique au droit de la digue ;
- § Une troisième étape de caractérisation du scénario d'inondation sur la base des probabilités de rupture ;
- § Une quatrième étape de quantification de la gravité des scénarios d'inondation par modélisation hydraulique ;
- § Une dernière étape de classification du risque par croisement de la gravité du scénario d'inondation avec la probabilité d'une rupture.

Cette méthodologie est identique à celle utilisée dans le cadre de l'EDD du val d'Orléans. L'outil Cardigue qui a servi à la caractérisation de l'aléa de rupture dans cette même étude sera également utilisé.

### 9.1.2 Identification des modes de rupture

Il est envisagé les modes de rupture suivants :

- § Rupture par surverse qui entraîne une érosion de la digue coté val ;
- § Rupture par érosion interne ;
- § Rupture par glissement de talus coté val ou coté Loire puis surverse ;
- § Rupture par affouillement des fondations coté Loire puis érosion interne ;
- § Rupture par soulèvement hydraulique.

### 9.1.3 Evaluation des probabilités d'occurrence d'un événement

#### 9.1.3.1 Mode de calcul général

Pour estimer la probabilité de rupture de la digue, la DREAL Centre a développé, pour chaque mode de rupture présenté ci-avant, une paramétrisation suivant les caractéristiques techniques de la digue (largeur, hauteur, matériaux...), de son environnement (distance par rapport au lit mineur, présence d'obstacle...) et des conditions hydrauliques sur l'ouvrage (hauteur de charge).

Ces caractéristiques étant variables sur le linéaire de digue étudié, cette dernière a été décomposée en tronçons homogènes d'une largeur de 50 m. Ainsi tous les 50 m, un profil de la digue a été extrait avec l'ensemble de ses caractéristiques. 872 profils ont été constitués sur le linéaire de la digue d'Orléans.

Sur chaque profil et pour chaque période de retour de crue (50 ans, 70 ans, 100 ans, 170 ans, 200 ans, 500 ans et 1000 ans) les hauteurs de charge en crue ont été calculées à l'aide du modèle LM10-EDD.

L'extraction de l'ensemble des données permet pour chaque profil (tous les 50 m), chaque période de retour de la crue et chaque mode de rupture de calculer une probabilité de rupture.

Par la suite il est calculé pour chaque profil, la probabilité annuelle de rupture (pour chaque mode de rupture) par sommation du produit entre la probabilité de chaque crue avec la probabilité de rupture. Le tableau ci-après indique l'appréciation de l'événement en fonction de la probabilité annuelle de rupture.

Appréciation de l'évènement	Probabilité annuelle associée	Temps de retour
Très improbable	< 0.01%	> 10 000 ans
Improbable	0.01% < P < 0.1%	1000 - 10 000 ans
très peu probable	0.1% < P < 0.2%	500 - 1 000 ans
Peu probable	0.2% < P < 0.5%	200 - 500 ans
Moyennement probable	0.5% < P < 1%	100 - 200 ans
Probable	1% < P < 10%	10 - 100 ans
Très probable	>10%	

Tableau 10 - Grille de probabilité d'occurrence (source : EDD, val d'Orléans)

### 9.1.3.2 Paramétrisation des modes de rupture

La paramétrisation fait intervenir dans bien des cas l'expertise (« à dire d'expert »).

Pour chaque mode de rupture deux probabilités sont calculées :

- § La probabilité d'apparition du mode de rupture;
- § La probabilité de rupture après apparition du mode de rupture.

Ceci permet en particulier de prendre en compte le fait que toutes les surverses ou érosions internes n'entraînent pas nécessairement de rupture de la digue mais que la rupture peut néanmoins survenir par enchaînement de processus.

#### Surverse

Pour le calcul de la probabilité d'apparition de la surverse, 5 cas sont distingués :

- § Soit la ligne d'eau est située à plus de 50 cm sous la crête de digue (hors banquette) la probabilité d'apparition est alors nulle ;
- § Soit la ligne d'eau est située à moins de 50 cm sous la crête de digue mais reste inférieure à la crête de digue (hors banquette), la probabilité d'apparition est alors de 10% ;
- § Soit la ligne d'eau dépasse la crête de digue de moins de 20 cm, la probabilité d'apparition est alors de :
  - o 80% si la digue dispose d'une banquette
  - o 100% sans banquette
- § Soit la ligne d'eau dépasse la crête de digue de plus de 20 cm, la probabilité d'apparition est alors de 100%.

La probabilité de rupture est alors calculée en multipliant la probabilité d'apparition avec des coefficients modulateurs tels que la largeur de la digue, la pente de la digue coté val... (Le détail de la méthode est reporté en annexe n°22 de l'étude de dangers du val d'Orléans réalisée par la DREAL centre).

#### Erosion interne

L'érosion interne retenu est l'érosion régressive (renard hydraulique), l'érosion interne par suffusion ou de contact étant supposée ne pas pouvoir mettre en péril la digue (tassements possibles mais signes avant coureurs permettant d'agir).

Le risque d'apparition d'érosion interne est calculé par le coefficient de Bligh

$$C = \frac{L}{\Delta H}$$

Avec L la largeur de la digue à sa base et  $\Delta H$  la différence de charge entre l'amont et le pied de digue.

Le tableau ci-après relie la valeur du coefficient de Bligh à une probabilité de rupture.

Valeur minimale de c	Valeur maximale de c	Probabilité d'apparition
0	6	100 %
6	7	70 %
7	8	30 %
8	9	10 %
9		1%

Tableau 11 : Traduction du coefficient de Bligh en probabilité de rupture

La probabilité de rupture est alors calculée en multipliant la probabilité d'apparition avec des coefficients modulateurs indiqués en annexe n°22 de l'EDD du val d'Orléans. Notamment, la présence d'un filtre drain divise par 10 la probabilité.

#### Glissement

Le risque de glissement est évalué à l'aide de l'estimation du facteur de sécurité sur un ensemble de configurations types des digues de la Loire.

Il a été étudié plusieurs cas :

- § Pente des talus (1V/2H, 1V/5H, 2V/3H) ;
- § La hauteur H1 de la digue (3 m, 5 m ou 7 m) ;
- § La nature de la couche d'assise : sable limon ou substratum ;
- § La hauteur d'eau en amont Hw (H1, 2/3 H1, 1/3 H1 ou 0).

Le graphique ci après indique un exemple d'estimation du facteur de sécurité pour une fondation de type limon et des pentes de digue à 1V/2.5H. Il est simulé différentes hauteurs de digue et hauteurs d'eau. Le coefficient F ainsi obtenu par ces abaques est rattaché à une probabilité d'apparition du glissement (cf. tableau ci-après).

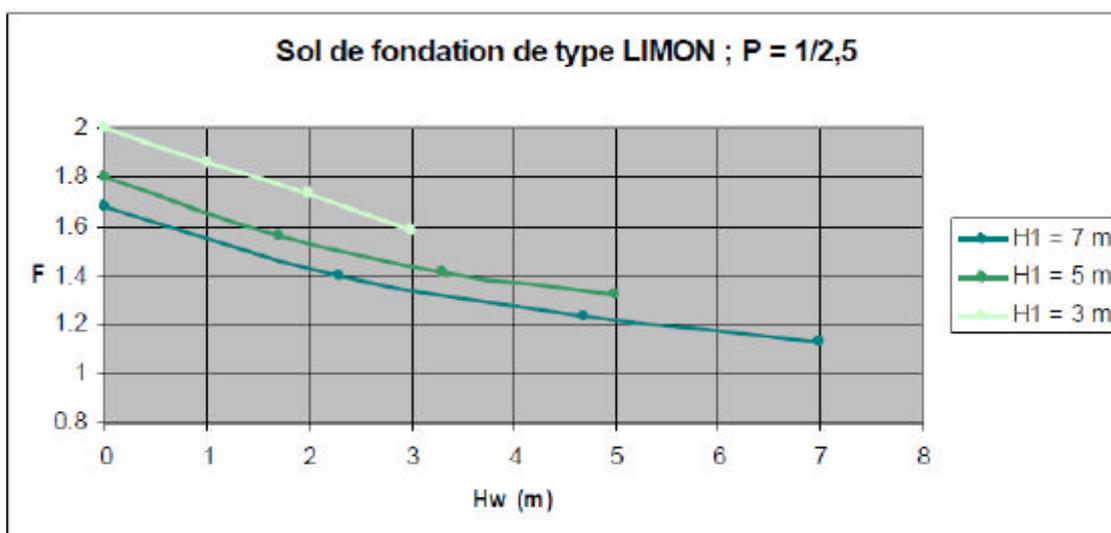


Figure 33 : Extrait de la notice de Cardigues (source EDD, val d'Orléans)

Valeur minimale de F	Valeur maximale de F	Probabilité d'apparition
0	1	100 %
1	1.1	70 %
1.1	1.3	30 %
1.3	1.5	10 %
1.5		1%

Tableau 12 : Traduction du facteur de sécurité en probabilité de rupture

La probabilité d'apparition d'un glissement est ensuite multipliée par la probabilité de rupture par érosion interne (majorée par multiplication de la probabilité par 1.1) pour obtenir la probabilité de rupture par glissement.

#### Erosion externe

L'érosion externe est caractérisée par un affouillement du pied de la digue qui entraîne un glissement de terrain coté val, puis un risque d'érosion interne ou de surverse.

L'affouillement du pied de la digue est lié à la capacité érosive du cours d'eau en crue. Dans le cadre de l'étude de dangers du val d'Orléans, il a été considéré que seuls les écoulements dans le lit mineur avaient la capacité d'éroder les sols. Le risque de brèche par érosion externe est donc lié à la distance entre le pied de digue coté Loire et le lit mineur.

Les probabilités d'apparitions de l'érosion externe retenues sont de :

- § 0 % si le lit mineur est à plus de 10 m du pied de la digue ;
- § 0.1% si le lit mineur est entre 5 à 10 m du pied de la digue ;
- § 1% si le lit mineur est à moins de 5 m du pied de digue.

La probabilité de rupture est alors calculée en multipliant la probabilité d'apparition avec des coefficients modulateurs tels que la présence d'enrochements ou de fascines en pied de digue.

#### Soulèvement hydraulique

Le soulèvement hydraulique est lié à la présence sous la digue d'une couche plus imperméable située sur la couche de sol constituant la nappe alluviale de la Loire. Cette couche imperméable est soumise en cas de charge hydraulique à une pression pouvant entraîner sa fracturation.

La probabilité d'apparition du soulèvement hydraulique est appréciée par le calcul d'un facteur de sécurité  $F_h$  selon la méthodologie employé par USACE pour le contrôle de leur barrage.

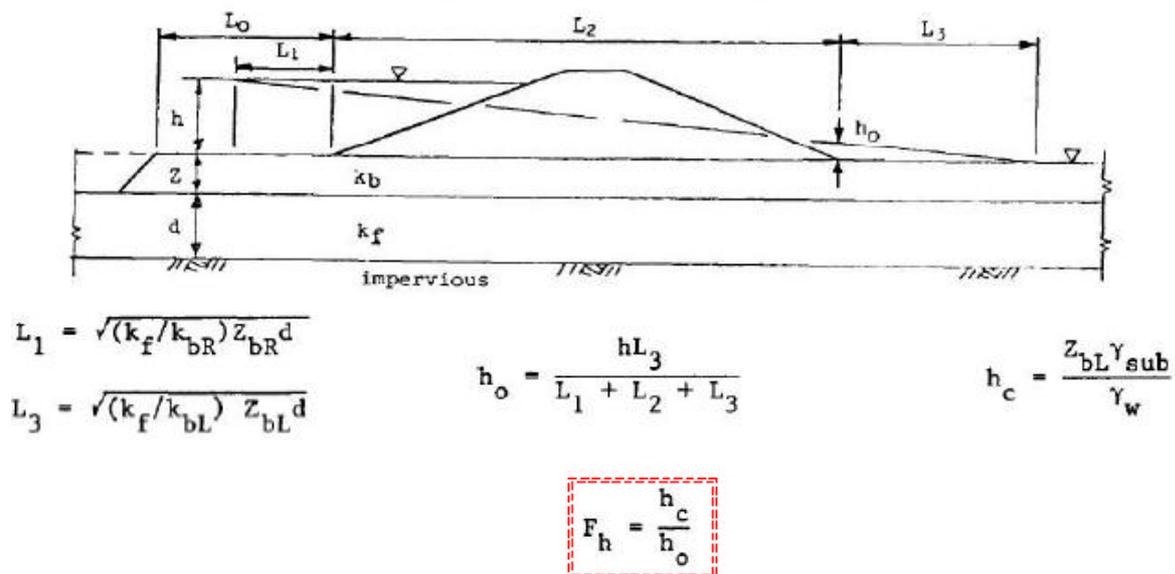


Figure 34 : Extrait de la notice de Cardigues (source : EDD, val d'Orléans)

- § Z : épaisseur de la couche imperméable
- §  $\gamma_{sub}$  : poids volumique déjaugé du sol imperméable
- §  $\gamma_w$  : poids volumique de l'eau
- §  $k_b$  : perméabilité de la couche imperméable
- § d : épaisseur de la couche perméable (aquifère)
- §  $k_f$  : perméabilité de l'aquifère
- § h : charge amont,
- §  $L_0$  est la longueur du franc-bord

Valeur minimale de Fh	Valeur maximale de Fh	Probabilité d'apparition
0	1.1	80 %
1.1	1.3	30 %
1.3	1.5	10 %
1.5	2	1 %
2		0.1%

Tableau 13 : Probabilité de soulèvement en fonction du facteur Fh

Il faut noter qu'en l'absence de couche imperméable dans les fondations de la digue le risque de soulèvement est nul. Il y a par contre un risque de rupture par érosion interne de fondation (mode de rupture pris en compte dans le calcul de l'érosion interne)

Une fois le soulèvement hydraulique amorcé, la rupture de la digue est liée à l'activation d'une érosion interne dans les fondations de la digue. La probabilité d'apparition du soulèvement hydraulique est donc multipliée à la probabilité d'érosion interne calculée précédemment pour estimer le risque de rupture par soulèvement hydraulique.

### 9.1.4 Caractérisation des scénarios d'inondation

Le linéaire de digue étudié (700 m) ne constitue qu'une partie de l'ensemble des digues du val d'Orléans. Il ne sera donc considéré qu'un seul scénario d'inondation lié à une brèche sur le secteur étudié.

### 9.1.5 Evaluation de la gravité des scénarios d'inondations

A l'image de la méthodologie de l'étude de dangers du val d'Orléans, la gravité des scénarios d'inondation est appréciée par la caractérisation de la quantité de population mise en dangers. La quantité de population mise en danger est évaluée par la caractérisation de l'aléa au droit de chaque enjeu. La grille d'analyse présentée ci-après permet à partir de la connaissance de la hauteur maximum d'eau et de la vitesse maximum des écoulements de classer l'aléa inondation en 5 intensités.

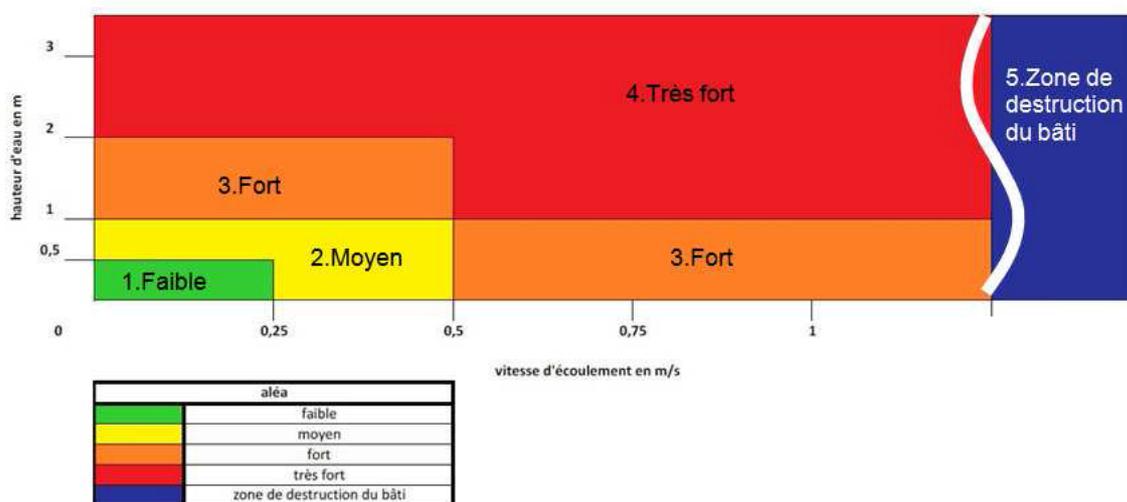


Figure 35 : Grille d'intensité de l'aléa inondation (source EED, val d'Orléans)

A partir de ces 5 classes d'intensités, la méthodologie utilisée dans le cadre de l'étude de dangers propose les tableaux ci-dessous permettant en fonction du type d'habitat de déterminer la fraction de population résidente mise en danger.

Intensité de l'aléa inondation	Part de la population mise en danger		
	Habitat R0	Habitat R+1	Habitat R+2 et plus
1 - faible	0 %	0 %	0 %
2 - moyen	5 %	1 %	0,5 %
3 - fort	30 %	5 %	1 %
4 - très fort	70 %	30 %	10 %
5 - zone de destruction du bâti	95 %	95 %	95 %

Tableau 14 : Indicateur de mise en danger des populations

Le croisement de la quantité de population par bâtiment avec le taux de population mise en danger permet d'estimer la population totale mise en danger dans la vallée et la classe de gravité du scénario.

Classe de gravité		Nombre de personnes exposées en zone à cinétique lente
Négligeable	0	
Modéré	1	Entre 1 et 10
Sérieux	2	Entre 10 et 100
Important	3	Entre 100 et 1000
Catastrophique	4	Supérieur à 1000
Désastreux	5	Supérieur à 10 000

Tableau 15 - Classes de gravité, adaptées du guide de lecture des études de dangers

### 9.1.6 Evaluation de la classe de risque

Le tableau ci-après permet de définir le risque lié à une rupture à partir de la caractérisation de la probabilité annuelle de rupture et de la gravité de la rupture

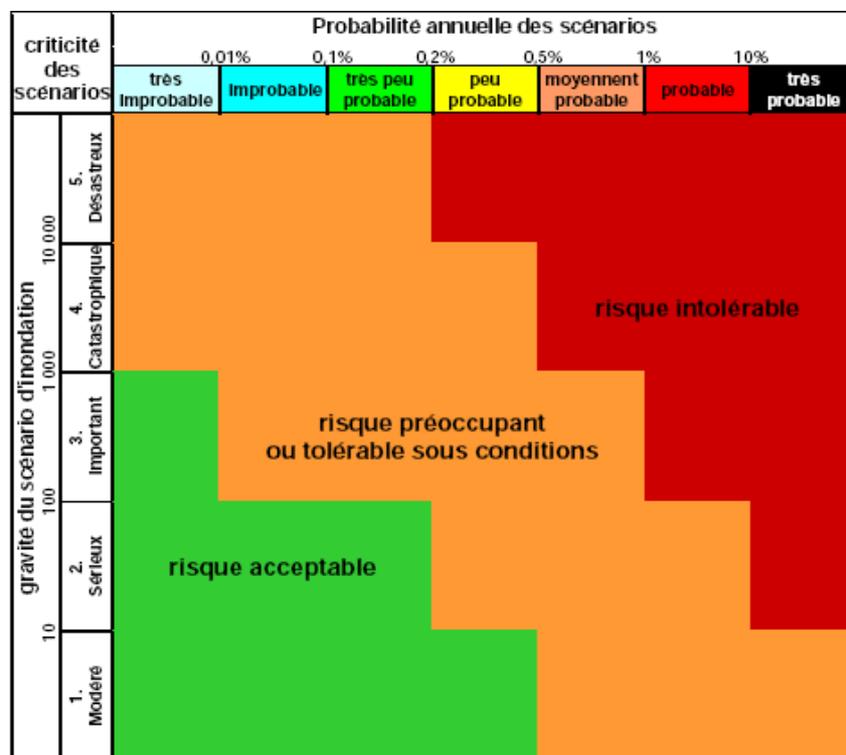


Tableau 16 - Grille de criticité (source : EDD du val d'Orléans)

Trois zones sont distinguées en fonction de la valeur de criticité :

- Zone verte: risque acceptable, pas de mesures de réductions des risques proposées
- Zone orange: risque tolérable mais non entièrement satisfaisant du point de vue de la sécurité. Des mesures de réduction du risque sont proposées,
- Zone rouge: risque intolérable. Des mesures de réductions de risques sont proposées dans le chapitre 10.

## 9.2 Probabilité de défaillance en état actuel

### 9.2.1 Synthèses de l'étude de dangers du val d'Orléans

Le secteur impacté par l'ouvrage concerne un linéaire de 700m (600 m en amont du franchissement de la digue et 100 m en aval), soit 14 profils identifiés dans l'outil Cardigue (entre les PK 19,85 et le PK 20,55). Afin de quantifier les probabilités de rupture de brèche en été actuel, il a été extrait les probabilités annuelles de défaillance pour chaque phénomène initiateur. Les tableaux ci-après indiquent les résultats pour chaque profil dans le secteur d'étude. Le projet modifie la structure de la digue entre les PK 20,40 et 20,50.

On constate que la probabilité annuelle de rupture est nulle s'il est considéré les périodes de retour de crue inférieures à 200 ans (probabilité prise en compte dans l'EDD du val d'Orléans)

PK digue	Probabilité annuelle des événements jusqu'à Q200					
	Surverse	Erosion interne	Glissement	Erosion externe	Soulèvement	Total
19,85 à 20,55	0,00%					

Tableau 17 – Calcul de probabilité annuelle des événements jusqu'à la Q200 extrait de l'EDD Val d'Orléans

Il a été aussi calculé la probabilité annuelle de rupture en considérant les crues exceptionnelles (Q500 et Q1000). Le tableau ci-après indique ces résultats

PK digue	Probabilité annuelle des événements jusqu'à Q1000					
	Surverse	Erosion interne	Glissement	Erosion externe	Soulèvement	Total
19,85	0,27%	0,03%	0,01%	0,00%	0,00%	0,28%
19,90	0,14%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%	0,14%
19,95	0,02%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%	0,03%
20,00	0,02%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%	0,03%
20,05	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,01%
20,10	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%
20,15	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%
20,20	0,01%	0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,02%
20,25	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
20,30	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
20,35	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
20,40	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
20,45	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
20,50	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
20,55	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Tableau 18 – Calcul de probabilité annuelle des événements jusqu'à la Q1000 – extrait de l'EDD du Val d'Orléans

La probabilité de défaillance par surverse est nulle jusqu'à une période de retour de 200 ans car la ligne d'eau est située entre 0.65 et 1.6 m sous la crête de digue. Le risque augmente pour les périodes de retour de 500 ans et 1000 ans car la ligne d'eau dépasse le niveau de la digue sur le point bas situé sur les PK 19.85 à 20.00.

La probabilité de défaillance par érosion interne est faible car le critère de Bligh est supérieur à 8 pour les crues de période de retour inférieure à 200 ans, mais pour des crues plus importantes, le risque d'érosion interne augmente sur l'amont du fait de l'absence de limon d'assise.

La probabilité glissement reste « improbable » avec un le coefficient F qui varie entre 1.1 et 1.7.

La probabilité d'une rupture initiée par érosion externe est nulle car le pied de digue est situé à plus de 100m du lit mineur de la Loire.

La probabilité de soulèvement hydraulique est nulle pour les PK 19.85 à 20.00 et 20.10 à 20.25 du fait de l'absence d'une couche imperméable sous la fondation de la digue. Pour les autres profils le risque d'apparition de soulèvement hydraulique est de 30 % pour les crues de période de retour inférieure à 200 ans et 80% pour les crues de période de retour supérieure. Néanmoins, le risque de rupture est calculé comme le produit du risque d'apparition du soulèvement hydraulique et du risque d'érosion interne qui est très faible. Le risque résultant reste donc « très improbable » selon la classification de l'étude de dangers du val d'Orléans.

En conclusion, le risque de rupture de digue est donc « très improbable » sur le linéaire étudié pour les crues de période de retour inférieure à 200 ans (crue de sureté de la digue). Le risque de rupture est analysé dans l'EDD du val d'Orléans dès que le risque dépasse le niveau de « très peu probable ». Pour les crues plus rares, l'apparition d'une surverse sur les profils amont implique une augmentation du risque de rupture.

## 9.2.2 Prise en compte des données géotechniques complémentaires

Dans le cadre de cette étude, les analyses géotechniques locales (cf. annexe 2) ont permis de préciser la nature des matériaux sous la digue (entre les PK 20.40 et 20.50) par rapport à l'étude de dangers du val d'Orléans. :

- § La couche de fondation est composée du même matériau que le corps de digue. Il n'y a donc pas d'assise argilo limoneuse.
- § La perméabilité des alluvions sous la couche d'assise de 3 m est proche de la perméabilité de la digue et de son assise.
- § Le substratum est situé entre 15 à 17 sous la crête de digue contre 10 m dans le profil général du tronçon.
- § Au Nord Est du profil (à partir du PK 20.45) une couche de substratum calcaire fortement altéré comblé par les matériaux sableux se développe sur une épaisseur de 2 à 2.5 m.

Le tableau ci-après indique l'impact de ces nouvelles données sur les probabilités des 5 modes de rupture étudiés.

Type de défaillance	Impact nouvelles données géotechnique
Surverse	Inchangé
Erosion interne	Augmenté car la perméabilité interne est plus importante.
Glissement	Augmenté car la perméabilité interne est plus importante.
Erosion externe	Inchangé
Soulèvement hydraulique	Réduit voir supprimé car : l'épaisseur de la couche d'assise est plus importante la perméabilité de la couche d'alluvions est du même ordre de grandeur que la perméabilité de la couche d'assise

Tableau 19 – Impact des données géotechnique sur la probabilité de rupture en état actuel

Ces nouvelles données n'impactent pas le risque de surverse, ni d'érosion externe, qui ne dépendent pas de la géotechnique de la digue.

L'actualisation des probabilités de rupture du fait des nouvelles données géotechniques est présentée dans les deux paragraphes ci-après. L'actualisation est réalisée sur l'ensemble de la zone d'étude (PK 19.85 à 20.55), mais seul les résultats au PK 20.45 sont présentés du fait que la structure de la digue est identique sur tout le linéaire.

### 9.2.3 Actualisation des risques d'érosion interne et de glissement

La perméabilité plus importante du corps de digue et de sa fondation induit une augmentation du risque de rupture par un gradient hydraulique plus important sur le pied de digue coté val

#### Actualisation avec l'outil Cardigue

Les nouvelles données géotechniques ne peuvent pas être intégralement prises en compte par l'outil Cardigue. En effet, cet outil repose sur une paramétrisation à partir de profils types, or les investigations complémentaires mettent en évidence un profil de digue partiellement modifié. Ainsi l'évolution de la perméabilité ne peut pas être intégrée. Néanmoins, l'information principale à savoir l'absence de couche de limon imperméable en assise peut être intégrée.

Les deux tableaux ci-après indiquent les actualisations des coefficients de Bligh et de sécurité utilisés pour le calcul de la probabilité de rupture.

Le coefficient de Bligh diminue logiquement du fait de l'absence d'assise imperméable. Les valeurs restent néanmoins toutes supérieures à 9, sauf pour Q1000. Cela signifie que jusqu'à Q500, la probabilité de rupture ne change pas de classe de valeur. Pour Q1000, le risque d'initiation de rupture est de 10% au lieu de 1% estimé dans l'EDD, sans que cela ne modifie sensiblement le risque de rupture annuel (car la crue de période de retour de 1000 ans à une très faible probabilité et le tapis drainant réduit le risque de rupture d'un facteur 10)

Pour le calcul du glissement, le facteur de sécurité diminue ce qui induit à partir de la crue de période de retour de 170 ans un changement de classe de probabilité d'apparition de glissement: la probabilité passe à 10% au lieu de 1% estimé dans l'EDD du val d'Orléans. Ce risque est ensuite multiplié par le risque d'érosion interne qui est très faible. Il en résulte une évolution marginale du risque de rupture par glissement. Pour Q1000, le risque de rupture par glissement passe à 0.33% contre 0.01% en état actuel. Cette évolution marginale ne change pas la classe de risque de rupture annuelle par glissement qui reste très improbable.

Critère	Période de retour des crues						
	Q 50	Q70	Q100	Q170	Q200	Q500	Q1000
Coefficient de Bligh en état EDD val d'Orléans	Pas d'eau	80.05	29.64	21.80	18.54	12.10	11.12
Coefficient de Bligh en état actuel	Pas d'eau	62.44	23.12	17.00	14.46	9.44	8.68

Tableau 20 : Actualisation des coefficients de Bligh (PK 20.45)

Critère	Période de retour des crues						
	Q 50	Q70	Q100	Q170	Q200	Q500	Q1000
Facteur de sécurité en état EDD val d'Orléans	Pas d'eau	1.80	1.73	1.64	1.58	1.55	1.46
Facteur de sécurité en état actuel	Pas d'eau	1.71	1.62	1.49	1.43	1.39	1.28

Tableau 21 : Actualisation des facteurs de sécurité (PK 20.45)

## Actualisation avec calcul 2D (logiciel SEEP/SLOPE)

L'outil Cardigue, ne permettant pas de prendre en compte finement l'actualisation des données géotechniques, il a été réalisé deux calculs complémentaires de stabilité :

- § Un calcul d'écoulement interne du corps de digue avec le logiciel SEEP ;
- § Un calcul de stabilité avec le logiciel SLOPE ;

Le tableau ci-après indique les caractéristiques géotechniques de la digue retenues pour les simulations. Les simulations prenant en compte les données de l'étude de dangers du val d'Orléans seront appelées « situation EDD val d'Orléans ». Les simulations prenant en compte les investigations complémentaires seront appelées « état actuel ».

Matériau	retenue dans l'étude de dangers du val d'Orléans		Investigations complémentaires locales	
	Epaisseur (m)	Perméabilité (m/s)		
Corps de digue, initial	3.7	10 <sup>-7</sup>	3.7	4 .10 <sup>-6</sup>
Recharge aval	-	10 <sup>-4</sup>	-	10 <sup>-4</sup>
Assise sous digue	0.7	10 <sup>-7</sup>	3.5	4 .10 <sup>-6</sup>
Alluvions	7	10 <sup>-5</sup>	9.4	4.3. 10 <sup>-6</sup>
Substratum	-	10 <sup>-6</sup>	-	10 <sup>-7</sup>

Tableau 22 : Valeurs retenues pour le calcul de stabilité

En situation EDD du val d'Orléans (cf figure 33), la ligne de saturation de l'eau est située au niveau des fondations, ce qui induit l'absence d'eau dans la recharge côté val. Le risque d'érosion interne du corps de digue et de glissement est donc plutôt faible. Mais, la digue repose sur une assise imperméable elle-même située sur les alluvions de la Loire plus perméables, il en résulte un gradient hydraulique important sous la couche imperméable. Le risque de soulèvement est donc important. Après soulèvement de l'assise, le risque d'érosion interne de fondation est plus important du fait du gradient hydraulique important dans les fondations. En conclusion, en « situation EDD du val d'Orléans », le risque d'érosion interne comme phénomène initiateur de la rupture est très faible. Par contre si un soulèvement hydraulique se produit à proximité du pied de digue, le risque d'érosion interne de fondation est non négligeable.

En situation « état actuel » (cf figure 12), la plus grande homogénéité des perméabilités induit une répartition des charges différentes. La sur-pression sous la couche d'assise initialement simulée n'est pas retrouvée. Le risque d'érosion interne est donc localisé plutôt dans le corps de digue que dans les fondations (situation EDD val d'Orléans). De plus la perméabilité dans le corps de digue est plus importante. Il en résulte une ligne de saturation plus élevée (hauteur d'eau en pied de digue à 0.46 m) et un gradient hydraulique de 0.41. Il est admis que le risque d'érosion interne est négligeable pour des gradients hydrauliques inférieurs à 0.5 (sécurité de digues fluviale et de navigation, acte du colloque du CFGB, novembre 2004). Le risque d'érosion interne est très faible jusqu'à la crue de période de retour de 500 ans. Pour une crue de période de retour de 200 ans, le gradient hydraulique est de 0.3, traduisant un risque plus faible d'érosion interne.

Il faut noter que la perméabilité du corps de digue retenue pour le cas « état actuel » est la plus forte valeur mesurée (4 10<sup>-6</sup>). Avec la valeur la plus faible (2 10<sup>-6</sup>), le gradient hydraulique est logiquement plus faible (0.32) ce qui induit un risque d'érosion interne plus faible.

L'estimation du risque de glissement coté val est réalisé à l'aide du Logiciel SLOPE, qui calcule un facteur de sécurité. Les valeurs simulées du facteur de sécurité entre les deux situations sont proches

(2.35 et 2.25) sachant que pour une situation exceptionnelle il est préconisé un facteur de sécurité minimal de 1.2. Le risque de glissement de talus est donc peu modifié.

Etat	Hauteur d'eau en pied de digue (m)	Gradient hydraulique en pied de digue coté val	Facteur sécurité pour le glissement
Situation EDD val d'Orléans	<0.01	0.82	2.35
Situation actuelle	0.46	0.41	2.25

Tableau 23 : Résultats du calcul de stabilité de la digue en état actuel pour une crue cinq centennale

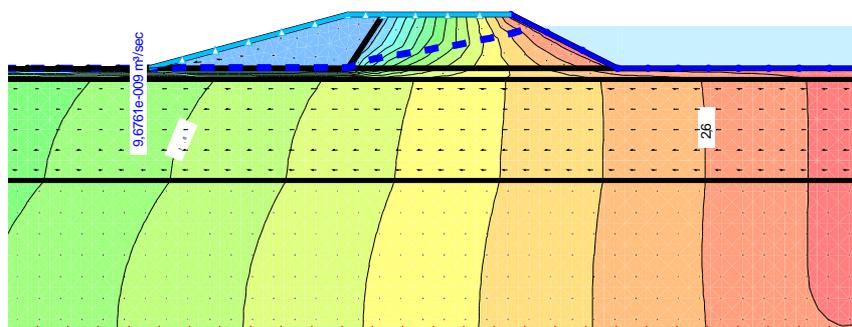


Figure 36 : Charge hydraulique en crue cinq centennale pour la digue EDD du val d'Orléans

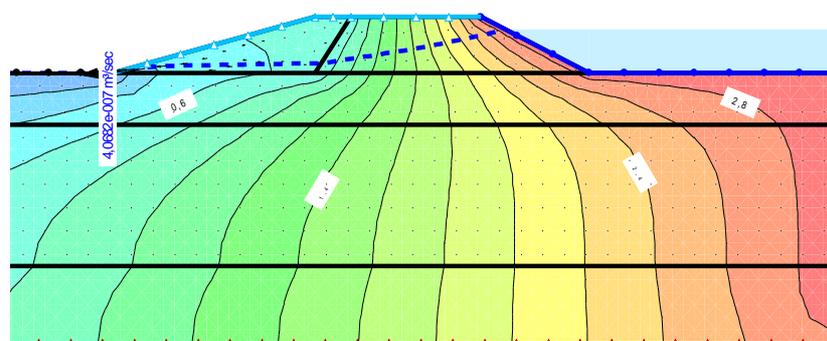


Figure 37 : Charge hydraulique en crue cinq centennale après prise en compte des investigations géotechniques complémentaires

#### 9.2.4 Actualisation du risque de soulèvement

Pour le risque de soulèvement, les nouvelles données peuvent être intégrées à l'outil Cardigue de deux façons :

- § Soit la couche imperméable est considérée comme absente (hypothèse retenue pour le calcul de l'érosion interne et du glissement), ce qui se justifie au regard de la perméabilité très proche de la couche d'assise et des alluvions. Le risque de soulèvement est nul.
- § Soit le critère  $F_h$  est calculé avec les nouvelles caractéristiques. Le tableau ci-après indique la valeur du critère entre les deux situations. Le facteur de sécurité est largement augmenté avec les investigations complémentaires, ce qui traduit un risque de soulèvement fortement réduit. Ce risque de soulèvement étant déjà très faible en état EDD val d'Orléans, on peut considérer ce risque nul en « état actuel ».

Critère	PK digue	Période de retour des crues						
		Q 50	Q70	Q100	Q170	Q200	Q500	Q1000
Valeur de Fh avec donnée initial	20,40	Pas d'eau	25.69	3.02	2.00	1.64	0.99	0.90
Valeur de Fh avec investigation complémentaire	20,40	Pas d'eau	145.91	17.13	11.38	9.30	5.64	5.14

Tableau 24 : Actualisation du facteur de soulèvement

### 9.2.5 Conclusion de l'actualisation des probabilités de risque en état actuel

Le tableau ci-après indique la conclusion de la comparaison des risques de rupture. Il en résulte que pour chaque type de défaillance, le risque de rupture reste très improbable.

La crue de sureté de la zone étudiée est donc supérieur à une période de retour de 200 ans .

Type de défaillance	Situation EDD val d'Orléans	Situation actuelle
Surverse	Très improbable	Inchangé
Erosion interne	Négligeable comme phénomène initiateur Très improbable	Devient un phénomène initiateur très peu probable pour une crue de période de retour < 200 ans probable pour les périodes de retour plus rares.
Glissement	Très improbable	Très faiblement augmenté
Erosion externe	Très improbable	Inchangé
Soulèvement hydraulique	Très improbable	Fortement réduit

Tableau 25 – Conclusion de l'impact des données géotechnique sur la probabilité de rupture en état actuel au PK 20.45

## 9.3 Modification apportée par le projet

### 9.3.1 Description du projet

Le franchissement de la digue par la voirie, implique une charge sur la crête de digue. Cette charge est liée au poids de la chaussée et du trafic. Les matériaux de la digue présentant une capacité modeste à moyenne, le risque de tassement de la digue est donc important. Pour réduire ce risque, il est proposé de soutenir la plateforme de la chaussée par des inclusions rigides au droit du franchissement (PK 20.45).

La mise en place de ces inclusions rigides dans le corps de digue induit une modification des caractéristiques de la digue. Ces modifications sont de deux types:

- § Injection d'un nouveau matériau dans la digue. Ce nouveau matériau possède des propriétés distinctes du reste du corps de digue ;
- § La création d'une nouvelle interface entre deux matériaux et la déstructuration locale des sols autour de l'inclusion rigide.

Ces deux évolutions conduisent à augmenter l'hétérogénéité de la digue ce qui augmente de fait le risque d'érosion interne.

L'impact des inclusions rigides (qui sont rarement utilisées dans les digues) sur les écoulements internes est aujourd'hui peu étudié. Il est donc difficile de quantifier directement l'impact de ces inclusions

rigides sur l'augmentation de la charge hydraulique en pied de digue et donc sur la probabilité d'apparition d'érosion interne.

Néanmoins, de façon qualitative, les inclusions rigides augmentent la probabilité d'apparition de ces phénomènes. Afin de palier à cette augmentation, il est préconisé la mise en place d'un rideau de palplanches devant les inclusions rigides coté Loire. Ce rideau de palplanche permet de limiter les infiltrations dans le corps de digue au droit des inclusions (PK 20.45). Il coupe l'ensemble des matériaux perméables de fondation.

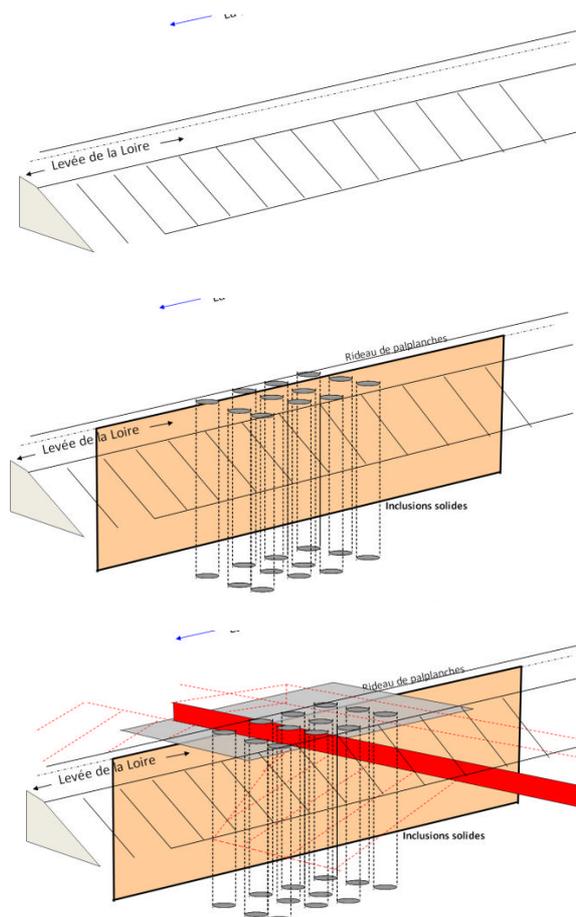


Figure 38 : Schéma de réalisation des travaux (situation actuelle, intervention sur la digue et réalisation de la voie)

La digue est aussi concernée par une augmentation de la charge de 15 cm au droit du pont. Cette augmentation de la charge induit une augmentation de la probabilité de soulèvement hydraulique et d'érosion interne.

### 9.3.2 Impact sur les risques de rupture

Ces modifications de l'aléa et de la structure de la digue vont impacter :

- § Le risque de surverse, du fait de l'augmentation de la ligne d'eau ;
- § Le risque d'érosion interne. Les inclusions rigides et l'augmentation de la ligne d'eau modifient le risque d'érosion interne. L'objectif de l'écran étanche est de supprimer ce risque ;
- § Le risque de glissement du fait de l'augmentation de la ligne d'eau et de la modification du corps de digue ;
- § La probabilité de soulèvement hydraulique puis d'érosion interne du fait de l'augmentation de la ligne d'eau et donc de la charge côté Loire.

Le risque d'érosion externe n'est pas impacté par l'aménagement car :

- § Le lit mineur de la Loire n'est pas déplacé et l'analyse morphologique de l'étude du franchissement de la Loire a montré que le risque de déplacement du lit vers la digue suite à la réalisation du pont est non significatif;
- § Les vitesses d'écoulement en pied de digue et donc le risque d'affouillement ne sont pas augmentées. En effet, l'implantation et le dimensionnement de l'ouvrage de décharge ont été fixés afin de ne pas augmenter les vitesses d'écoulement en pied de digue (l'ouvrage de décharge est à 100 m en retrait du pied de la digue).

### 9.3.3 Sectorisation des impacts potentiels

L'impact du projet sur l'aléa et sur la structure de la digue n'est pas identique sur tout le linéaire étudié. Il sera donc distingué des tronçons homogènes de point de vue des impacts du projet (cf. figure 28) :

- § Le tronçon avec écran étanche et non affecté par le remous du pont (aval du pont, PK 20.50) ;
- § Le tronçon avec inclusions rigides et un écran étanche et affecté par le remous du pont : rehausse de la ligne d'eau de 15 cm (PK 20.45) ;
- § Le tronçon avec écran étanche et affecté par le remous : rehausse de la ligne d'eau de 15 cm (PK 20.40) ;
- § Le tronçon de digue non modifié et affecté par le remous du pont : rehausse de 7 cm (au PK 19.85) à 15 cm (au PK 20.35) d'amont en aval.

Note : les lignes d'eau indiquées sont calculées à l'aide du modèle LM10-EDD

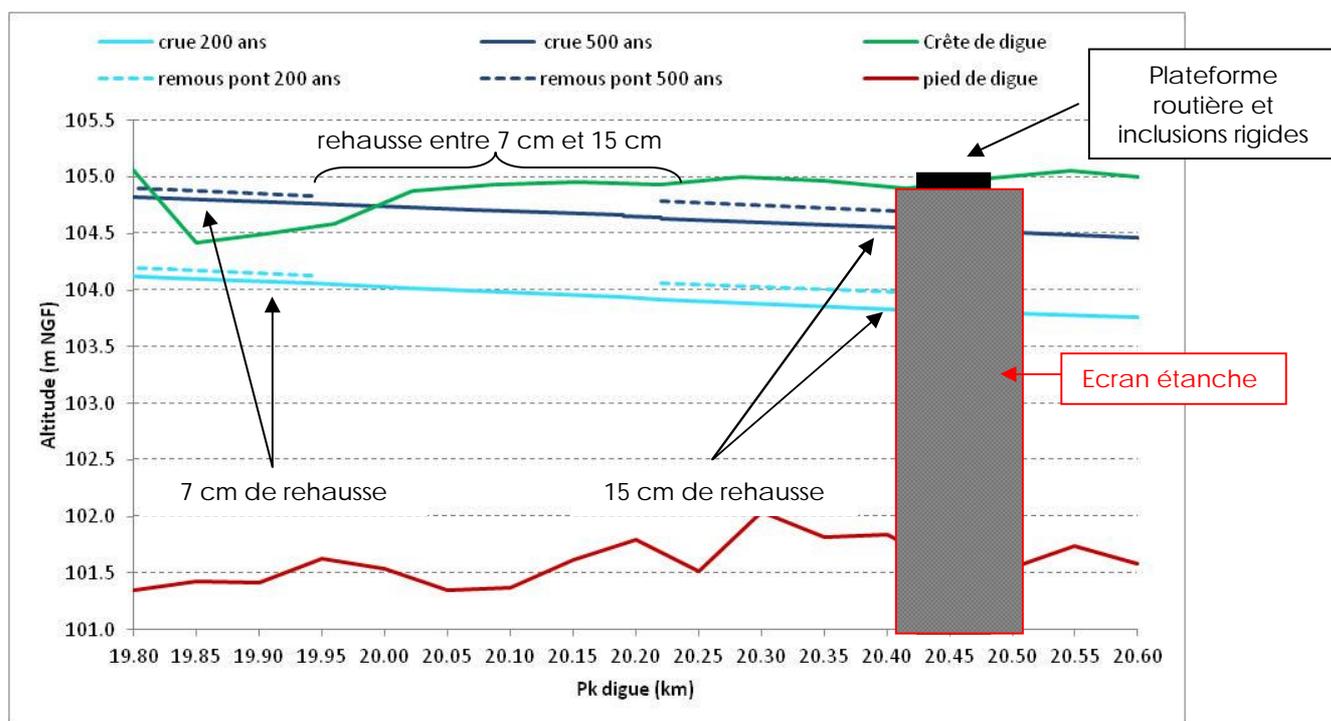


Figure 39 : Ligne d'eau au pied de la digue

Au vu des impacts du projet sur les risques de rupture, seuls deux des quatre tronçons présentés ciavant présentent les risques d'aggravation des risques de rupture:

- § Le tronçon 20.45 appelé situation 1 pour lequel des inclusions rigides déstructurent la digue, l'écran étanche compense les effets négatifs et le pont conduit à une rehausse de 15 cm de la charge;
- § Le tronçon 19.85 à 20.40 appelé situation 2 pour lequel la structure de digue n'est pas modifiée mais le pont conduit à une augmentation de la charge de 7 à 15 cm d'amont en aval.

## 9.4 Risque d'érosion interne

### 9.4.1 Mode de calcul de situation 1 (PK 20.45), inclusions rigides, palplanche et rehausse de la ligne d'eau de 15 cm

En situation 1, il est nécessaire de quantifier l'impact local des inclusions et du rideau de palplanche pour vérifier que la charge sous le pied de digue n'est pas augmentée (en lien direct avec le risque d'érosion interne de pied de digue).

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour quantifier l'impact du projet.

- § La première approche repose sur l'outil Cardigue. Cette approche est simplifiée car le projet ne peut pas être inclus directement. En effet, pour les inclusions rigides, les options possibles sont la prise en compte de canalisations horizontales et non verticales. Ensuite la mise en place de palplanche est considéré comme supprimant le risque d'érosion quelque soit sa profondeur et son extension latérale.
- § La seconde option consiste à mettre en place un modèle 2D de type SLEEP/SLOPE déjà utilisé dans le paragraphe 9.2.2. Ce modèle à l'avantage de pouvoir prendre en compte la géométrie des aménagements et de calculer le gradient hydraulique en tous points de la digue. Néanmoins, la digue est représentée uniquement par des profils en travers, ce qui ne permet pas de prendre en compte les effets de bord aux extrémités de la palplanche.
- § La modélisation 3D de la digue avec le Logiciel ANSYS est la troisième option. Elle présente les avantages de la seconde option (prise en compte de la géométrie de l'aménagement) et permet le dimensionnement de l'extension de la palplanche.

Dans la suite de cette étude, il sera d'abord présenté un calcul avec la 3<sup>ème</sup> option (modélisation 3D ANSYS) afin de dimensionner la palplanche et quantifier l'impact des travaux par rapport à l'état actuel. La 1<sup>ère</sup> option (Cardigue) sera ensuite étudiée afin d'avoir un calcul de probabilité de rupture cohérent avec le reste de la digue du val d'Orléans.

### 9.4.2 Modélisation 3D du corps de digue en situation 1 (inclusions rigides palplanche et rehausse de la ligne d'eau de 15 cm)

Il a été modélisé le corps de digue ainsi que les fondations jusqu'au niveau du substratum rocheux. L'ensemble des caractéristiques (hauteur, largeur, perméabilité) sont issues des investigations géotechniques complémentaires réalisées pour cette étude (étude géotechnique en annexe n°2). Le tableau ci-dessous indique les perméabilités retenues. Il est pris une anisotropie de facteur 5 (perméabilité horizontale 5 fois supérieure à la perméabilité verticale) pour le corps de digue et l'assise conformément aux recommandations de l'étude de dangers du val d'Orléans.

Les pieux sont pris en compte individuellement avec une perméabilité de  $10^{-9}$  m/s.

Matériau	Perméabilité horizontale	Perméabilité verticale
Corps de digue, initial	$4 \times 10^{-6}$ m/s	$8 \times 10^{-7}$ m/s
Recharge aval	$10^{-4}$ m/s	$2 \times 10^{-5}$ m/s
Assise sous digue	$4 \times 10^{-6}$ m/s	$8 \times 10^{-7}$ m/s
Alluvions	$4.3 \times 10^{-6}$ m/s	$4.3 \times 10^{-6}$ m/s
Substratum	$10^{-7}$ m/s	$10^{-7}$ m/s
Corps de digue, avec inclusions	$4 \times 10^{-4}$ m/s	$8 \times 10^{-5}$ m/s

Tableau 26 : hypothèses de perméabilité pour la modélisation 3D

L'écoulement à travers un rideau de palplanches n'obéit pas à la loi de Darcy puisque chaque palplanche en elle-même est parfaitement étanche et les écoulements se font uniquement à travers les serrures.

Cependant, des recherches<sup>1</sup> sur l'étanchéité des rideaux de palplanches ont permis d'aboutir à des modèles de parois équivalentes respectant la conservation des débits de percolation et des pertes de charge à travers le rideau. La modélisation du rideau de palplanches par une paroi équivalente permet donc de bien modéliser le rabattement de la nappe au passage du rideau, ainsi que les valeurs des gradients en sortie.

Expérimentalement, les fabricants mesurent sur les rideaux un paramètre noté  $\rho$  qui est l'inverse de la résistance du joint à l'écoulement (exprimé en m/s). On le convertit en une perméabilité de paroi d'épaisseur choisie à 1,00 mètre par :

$$K_e = \rho/b$$

Avec,  $b$  = largeur d'une palplanche

La palplanche a été modélisée comme un matériau de 1 m d'épaisseur et de perméabilité de  $5 \times 10^8$  m/s (joint avec produit bitumineux).

Type de joint entre les palplanches	Perméabilité équivalente (m/s)
Joint sans produit	$1 \times 10^{-7}$
Joint avec produit bitumineux	$5 \times 10^{-8}$
Joint avec produit hydrogonflant	$3 \times 10^{-10}$
Joint soudé	0

Tableau 27 : perméabilité équivalente d'un rideau de palplanche (source : ARBED groupe)

Les trois graphiques ci-après indiquent pour la crue cinq centennale, la courbe d'iso valeur de pression dans le corps de digue :

§ En état actuel ;

§ En état projeté au droit des inclusions rigides avec le rideau de palplanches (situation 1 au PK 20.45).

Il est ajouté pour information un graphe relatif à la situation actuelle avec une rehausse de 15 cm du niveau d'eau.

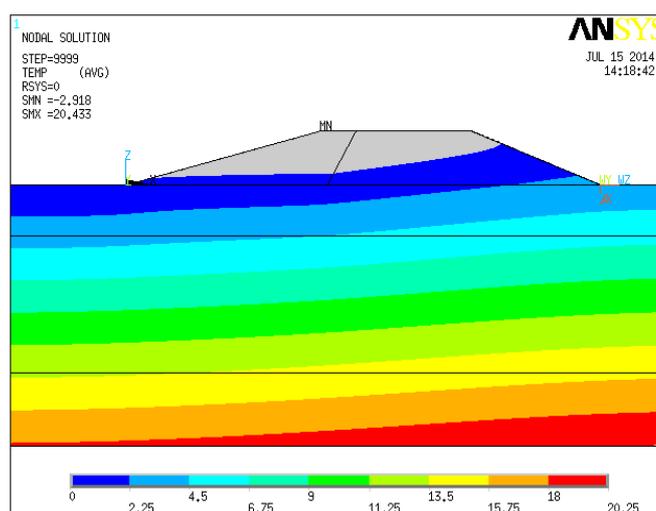


Figure 40 : Pression de l'eau en état actuel (Q500 ans)

<sup>1</sup> Recherches menées en commun par ProfilARBED (producteur de palplanches) et Delft Geotechnics.

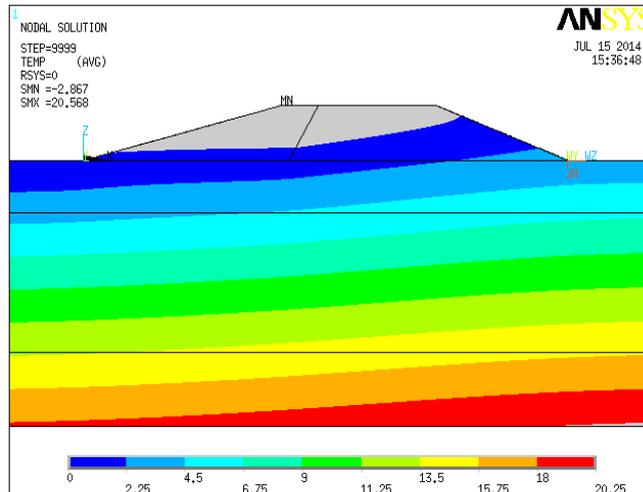


Figure 41 : Pression de l'eau en état avec remous de 15 cm (situation 2) pour Q500 ans

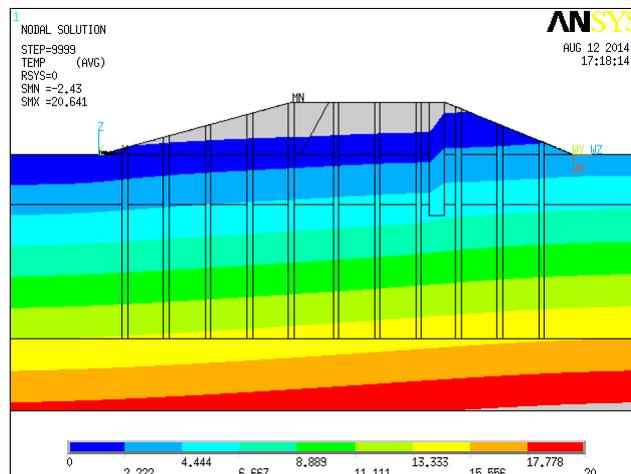


Figure 42 : Pression de l'eau en état avec inclusions rigides + palplanche + remous de 15 cm (situation 1) pour Q 500ans

Le tableau ci-après indique les résultats des simulations au niveau du pied de talus côté val. Le remous hydraulique provoque une augmentation faible du gradient hydraulique. Avec les inclusions et le rideau de palplanches, le gradient hydraulique est plus faible qu'en l'état actuel.

Etat	Crue 100 ans	Crue 200 ans	Crue 500 ans
Actuel	0.19	0.30	0.47
Remous (15 cm)	0.21	0.32	0.48
Remous (15 cm) + inclusions rigides + rideau de palplanches ( $K_s=5 \cdot 10^{-8}$ ) (situation n°1)	0.18	0.28	0.41

Tableau 28 : Impact sur le gradient hydraulique

Le guide Erinoh (ERosion INterne dans les Ouvrages Hydrauliques - en cours de validation) fournit des indications complémentaires, utilisées ici pour évaluer le risque d'érosion interne dans l'état conforté, en complément des analyses présentées ci-dessus.

Les chemins et mécanismes d'érosion examinés sont les suivants :

1) Un chemin se développant dans le corps de digue, et traversant le rideau de palplanches

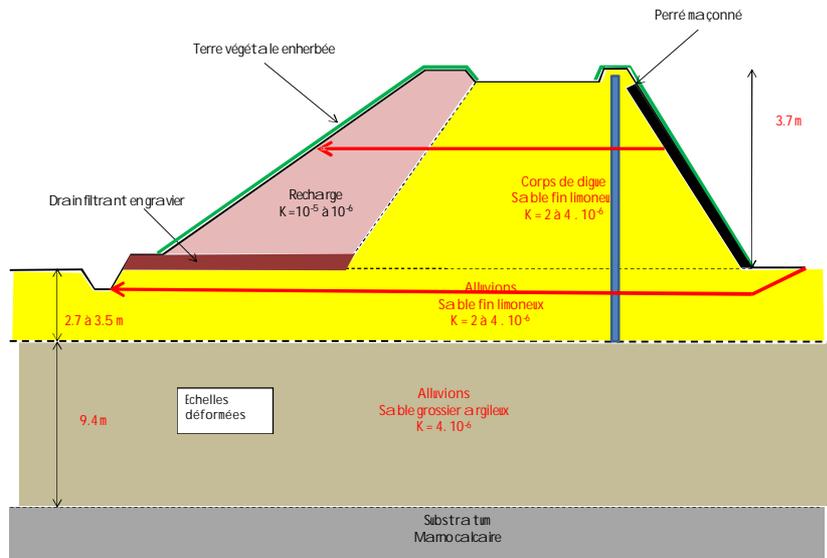


Figure 43 : exemple de chemin se développant dans le corps de digue

Les matériaux de digues sont hétérogènes (A1 / A2 / B5 / B6). Deux mécanismes d'érosion conduisant à la rupture peuvent se développer : l'érosion de conduit, et l'érosion régressive. Le rideau de palplanches est une parade efficace vis-à-vis de ces deux mécanismes.

2) Un chemin se développant à l'aval du rideau de palplanches, à la faveur des gradients résiduels.

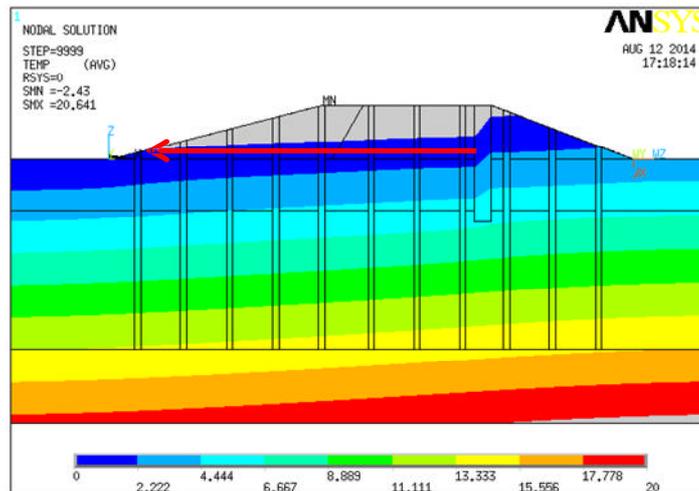


Figure 44 : exemple de chemin se développant à l'aval du rideau

Les gradients moyens dans le remblai sont sensiblement plus faibles que ceux que l'ouvrage a déjà subis. Le risque d'initiation de l'érosion est donc plus faible que dans l'état initial. Par ailleurs, la présence d'un rideau de palplanches empêche qu'un conduit d'érosion traversant se forme.

3) Un chemin se développant à la faveur de l'interface remblai / inclusion.

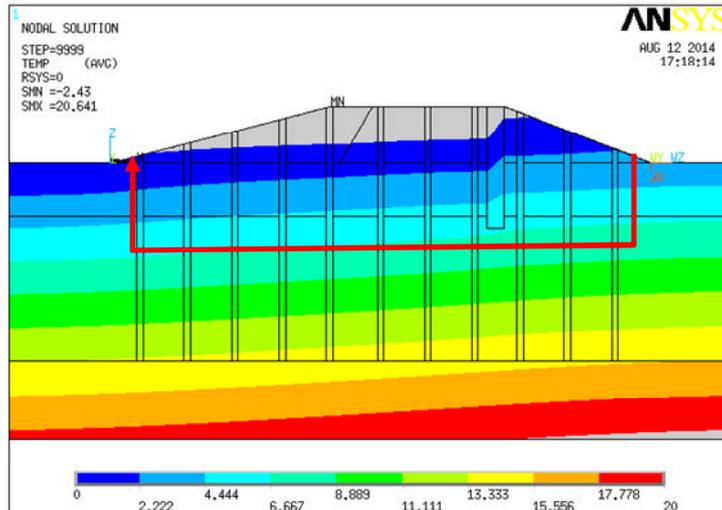


Figure 45 : exemple de chemin se développant au pied de la palplanche

Le mode d'érosion est l'érosion régressive sous la digue, initiée par un conduit le long d'une des inclusions, au pied aval de la digue.

Les gradients moyens dans la remontée verticale, sont de l'ordre de 0,1. De tels gradients sont plus faibles que les gradients d'initiation de l'érosion régressive (cf. par exemple règle de Lane, valable dans les conditions d'interface sol - remblai ; pour les plus mauvais sols, le gradient maximal recherché est 0,12).

En conclusion, au PK 20.45, la classe de risque d'érosion interne est inchangée par rapport à l'état actuel.

#### Dimensionnement de la longueur du rideau de palplanche

Le risque d'érosion interne est apprécié de façon globale par le gradient hydraulique en pied de digue côté val. Afin de préciser l'impact du projet, les écoulements internes ont été étudiés de manière plus fine. Ceci a permis de préciser aussi les dimensions du rideau de palplanches

Il a notamment été étudié la zone d'impact des inclusions et les effets de bord sur le rideau de palplanches (afin de s'assurer de l'absence de contournement de la digue par le dessous ou latéralement).

Les simulations réalisées à l'aide du logiciel ANSYS ont montré que la zone d'impact d'un pieu est de 2 m environ alors que l'entraxe entre deux pieux est de 2.9 m. Les zones d'impact des pieux se recoupent donc. Ceci rend possible la création d'écoulement préférentiel dans le corps de digue entre les inclusions. Néanmoins, l'augmentation de la hauteur de charge en amont d'un pieu est de 1 cm (pour une charge amont de 3.05 m en état actuel) et le gradient hydraulique reste inférieur à 0.13 (pour une crue cinq centennale), ce qui constitue une valeur faible qui seule ne peut initier un processus d'érosion interne.

Le rideau de palplanche est justifié par l'hétérogénéité des matériaux constitutifs des digues de Loire (ce qui conduit à considérer avec précaution les hypothèses géotechniques qui sont prises dans les calculs en particulier suite à la déstructuration associée à l'enfoncement de pieux). Il prévient de toute évolution défavorable du risque d'érosion interne par rapport à l'état actuel. Il est vérifié que son extension latérale qui est à 10 m du groupe de pieux garantit tout risque d'érosion interne.

Pour la profondeur, il a été choisi de s'éloigner autant que possible du substratum rocheux pour éviter d'augmenter le risque karstique.

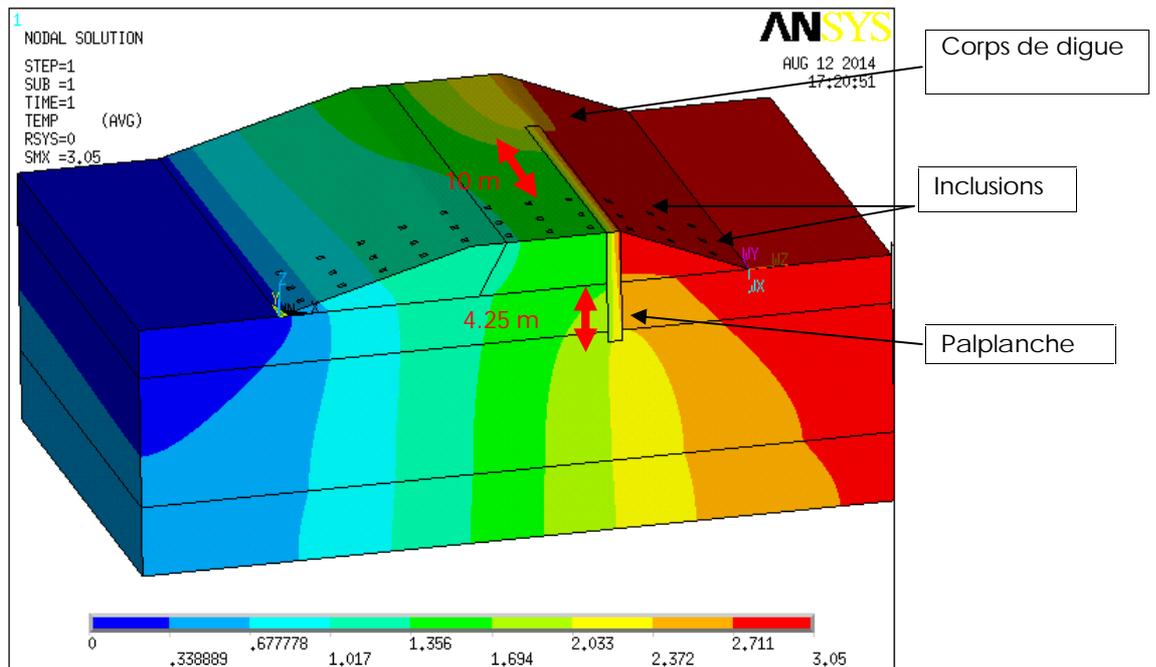


Figure 46 : Vue 3D des pressions interstitielles dans le corps de digue

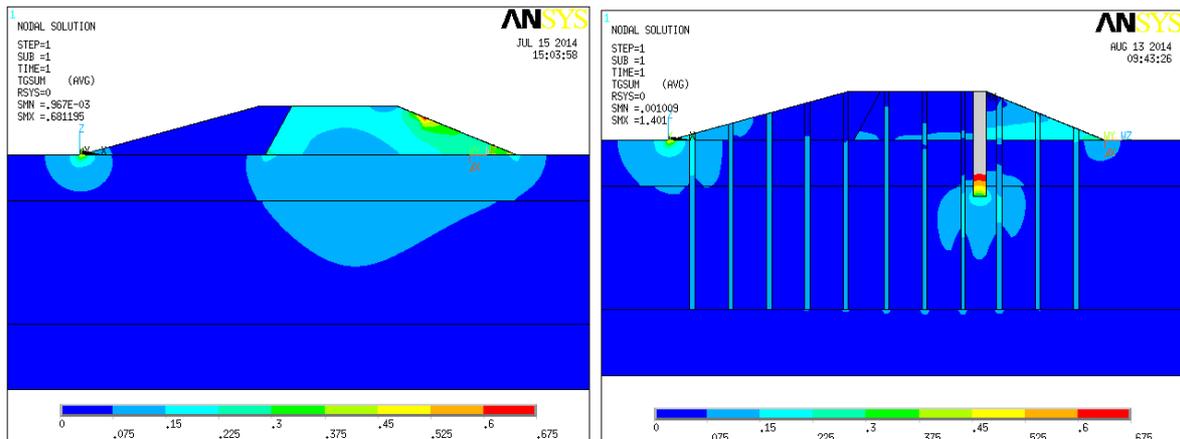


Figure 47 : Gradient hydraulique en état actuel (à gauche) et en situation projetée (à droite)

Il faut noter que l'impact du rideau de palplanches est calculé sur la base d'une mise en place avec joint bitumineux (perméabilité équivalente de  $5 \times 10^{-8}$ ). Une analyse de sensibilité a montré que sans la présence de joints (perméabilité équivalente de  $10^{-7}$ ) le gradient hydraulique en pied de digue côté val reste inférieur à l'état actuel.

#### 9.4.3 Impact sur le risque d'érosion interne estimé à partir de Cardigue

Cardigue ne peut prendre en compte directement les inclusions rigides. Une option d'intégration de ces inclusions serait d'être est similaire à la présence d'une canalisation dans le corps de digue. Cette configuration est prise en compte dans l'outil Cardigue en appliquant un facteur multiplicateur du coefficient de Bligh :

$$C_{\text{final}} = C_{\text{brut}} * 0.09 \text{ (canalisation position basse)}$$

La probabilité d'apparition de l'érosion interne est alors calculée avec le coefficient final. Ensuite, la mise en place d'un rideau de palplanches est prise en compte en multipliant le critère de Bligh par 10 000. De plus, la rehausse de la ligne d'eau de 15 cm est ajoutée. Ces modifications concernent le PK 20.45.

Le tableau indique les coefficients de Bligh en situation actuelle et projetée sans palplanche et projetée avec palplanche.

Coefficient de Bligh	Période de retour des crues						
	Q 50	Q70	Q100	Q170	Q200	Q500	Q1000
état actuel	Pas d'eau	62.44	23.12	17.00	14.46	9.44	8.68
inclusion assimilée à une canalisation+ rehausse niveau d'eau	494.20	5.28	2.35	1.78	1.54	1.03	0.95
inclusion assimilée à une canalisation+ palplanche+ rehausse niveau d'eau	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000

Tableau 29 : Calcul du coefficient de Bligh au PK 20.45

Les inclusions induisent une réduction du coefficient de Bligh, mais cette réduction est compensée par la mise en place de palplanche. Le tableau ci-après indique les probabilités de rupture calculées avec les coefficients du tableau précédent.

Probabilité de rupture	Période de retour des crues						
	Q 50	Q70	Q100	Q170	Q200	Q500	Q1000
état actuel	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
inclusion assimilée à une canalisation+ rehausse niveau d'eau	0.01	1	1	1	1	1	1
inclusion assimilée à une canalisation+ palplanche+ rehausse niveau d'eau	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

Tableau 30 : Calcul de probabilité de rupture au PK 20.45

La probabilité d'apparition d'érosion interne est augmentée pour la période de retour de 50 ans du fait du remous hydraulique. Ce remous met en eau le pied de digue, mais la charge hydraulique est inférieure à 10 cm, ce qui est insuffisant pour déclencher une érosion interne.

Il en résulte que le risque de rupture par érosion interne reste « très improbable » selon la classification de l'étude de dangers du val d'Orléans.

Etat	Probabilité annuelle de rupture	
	Jusqu'à 200 ans	Jusqu'à 1000 ans
Etat actuel	0.00%	0.00%
Etat projeté : Inclusion (canalisation) + rideaux de palplanches + remous	0.00%	0.00%

Tableau 31 : Calcul de probabilité annuelle de rupture par érosion interne au Pk 20.45 (outil Cardigue)

#### 9.4.4 Situation n°2 : rehausse de la ligne d'eau

Risque d'érosion interne

Le tableau indique les coefficients de Bligh en situations actuelle et projetée.

Critère	PK digue	Période de retour des crues						
		Q 50	Q70	Q100	Q170	Q200	Q500	Q1000
état actuel	19,85	24.47	16.12	10.75	9.02	8.16	6.15	5.79
	20.35	Pas d'eau	66.70	22.96	16.68	14.11	9.13	8.39
Etat projeté	19,85	21.15	14.61	10.06	8.53	7.76	5.91	5.59
	20.35	1047.09	47.40	20.14	15.14	12.99	8.65	7.98

Tableau 32 : Calcul du coefficient de Bligh

Les coefficients de Bligh évoluent peu sur les profils impactés uniquement par le remous hydraulique (situation 2). Le tableau ci-après indique les probabilités évènementielles de rupture calculées avec les coefficients du tableau précédent.

Critère	PK digue	Période de retour des crues						
		Q 50	Q70	Q100	Q170	Q200	Q500	Q1000
état actuel	19,85	0.01	0.01	0.01	0.01	0.1	0.7	1
	20.35	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.1
Etat projeté	19,85	0.01	0.01	0.01	0.1	0.3	1	1
	20.35	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.1	0.3

Tableau 33 : Calcul de probabilité évènementielle de rupture par érosion interne

La probabilité d'apparition d'érosion interne est augmentée :

- § Au PK 20.35, pour la période de retour de 50 ans, du fait du remous hydraulique qui met en eau le pied de digue, mais la charge hydraulique est inférieure à 10 cm, ce qui n'est pas suffisant pour déclencher une érosion interne. La probabilité de rupture est augmentée aussi pour les crues de périodes de 500 ans et 1000 ans ;
- § AU PK 19.85 pour les périodes de retour de 170 ans, 200 ans et 500 ans, ou la faible diminution du coefficient de Bligh induit un changement de classe.

Il faut noter que la présence d'un massif drainant en pied de digue côté val réduit le risque de rupture après déclenchement de l'érosion interne d'un facteur 10. Il en résulte que le risque de rupture par érosion interne reste « très improbable » selon la classification de l'étude de dangers du val d'Orléans (analyse pour les crues de période de retour inférieures à 200 ans) même si au PK 19.85, la probabilité évènementielle de rupture est supérieure à 10% pour les crues de période de retour supérieure à 170 ans.

Pour la probabilité de rupture jusqu'à 1000 ans, l'augmentation de la probabilité d'érosion interne au PK 19.85, n'induit pas de changement de classe de risque : « risque improbable ».

Etat	PK digue	Probabilité annuelle de rupture	
		Jusqu'à 200 ans	Jusqu'à 1000 ans
Actuel	19,85	0.00%	0.04%
	20.35	0.00%	0.00%
Projeté	19,85	0.00%	0.04%
	20.35	0.00%	0.00%

Tableau 34 : Calcul de probabilité annuelle de rupture par érosion interne (outil Cardigüe)

#### 9.4.5 Conclusion

Pour la situation n°1 (PK 20.45), la modélisation du corps de digue a montré que la réalisation du rideau de palplanches permettait de ne pas augmenter les risques d'érosion interne par rapport à la situation actuelle.

Notons que les hypothèses qui ont été prises pour estimer l'effet de l'ensemble inclusions rigides+palplanches sur les processus sont sécuritaires :

- § anisotropie des perméabilités la plus défavorable ( $K_h/K_v=5$ ),
- § durée de l'événement permettant à la ligne de saturation de s'établir totalement. En réalité, il s'agit d'un phénomène transitoire.

L'utilisation de l'outil Cardigue a montré que le risque d'érosion interne est :

- § en section courante de digue (non modifiée) augmenté par le remous, mais reste comme en état actuel dans la classe « très improbable ».
- § au droit des inclusions, le risque d'érosion interne est non augmenté par rapport à l'état actuel. Le risque est qualifié de « très improbable ».

Ces éléments permettent de considérer que le projet n'est pas de nature à provoquer un danger supplémentaire sur le système de protection du val d'Orléans vis-à-vis du risque d'érosion interne.

## 9.5 Impact du projet sur les autres modes de rupture

### 9.5.1 Risque de surverse

Pour ce risque seul le remous hydraulique est considéré. Il n'y a donc pas de différence d'impact entre les situations 1 et 2.

Le graphique ci-après indique la ligne d'eau pour les crues de périodes de retour de 200 ans et 500 ans au droit du projet. Ces lignes d'eau sont issues du modèle LM10-EDD utilisé pour définir le risque de surverse dans l'étude de dangers du val d'Orléans. Il est aussi indiqué le remous provoqué par le pont : 15 cm au droit du pont (PK 20.40) et 7 cm au droit de point bas de la digue (PK 19.85).

Ce graphique montre que la survenue des surverses est limitée à des crues de périodes de retour supérieures à 200 ans, malgré l'augmentation des hauteurs d'eau associée au projet. Ceci s'explique par la marge importante entre la ligne d'eau et la crête de digue pour les crues moyennes à rares (de période de retour inférieure ou égale à 200 ans).

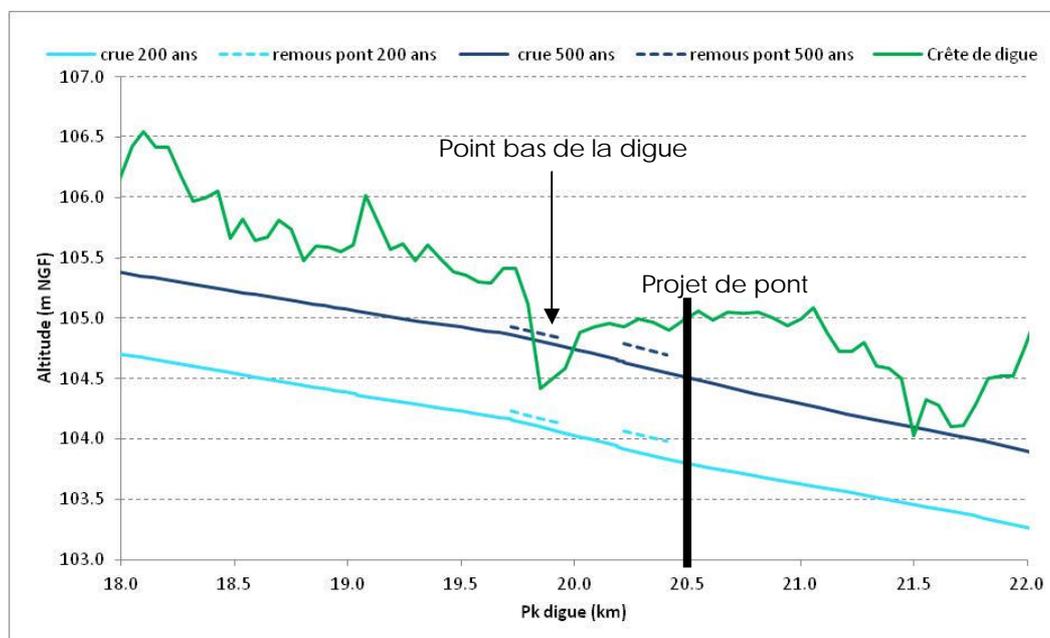


Figure 48 : ligne d'eau en état actuel (modèle LM10-EDD) et remous lié au pont

A partir du remous calculé dans l'étude hydraulique du projet de pont et des données du logiciel Cardigue, il a été recalculé les hauteurs de surverse et les probabilités d'apparition de surverse pour toutes les périodes de retour. Le tableau ci-dessous indique les résultats pour deux profils représentatifs de la digue :

- § Le profil situé immédiatement à l'amont du pont (Pk 20.40) car c'est celui pour lequel la surcote liée au pont est la plus forte (+15 cm) ;
- § Le profil situé au droit du point bas de la digue qui est un secteur déversant en état actuel et pour la crue de 500 ans (PK 19.85).

Critère	PK digue	Période de retour des crues						
		Q 50	Q70	Q100	Q170	Q200	Q500	Q1000
Hauteur de surverse en état actuel	19,85	-2.65	-2.16	-1.43	-1.01	-0.74	0.20	0.43
	20,40	-3.37	-2.88	-2.18	-1.77	-1.51	-0.56	-0.32
Hauteur de surverse en état projet	19,85	-2.58	-2.09	-1.36	-0.94	-0.67	0.27	0.50
	20,40	-3.23	-2.74	-2.04	-1.63	-1.37	-0.42	-0.18
Probabilité évènementielle d'apparition par crue en état actuel	19,85	0	0	0	0	0	0.80	1
	20,40	0	0	0	0	0	0	0
Probabilité évènementielle d'apparition par crue en état projet	19,85	0	0	0	0	0	1	1
	20,40	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 35 : Calcul de probabilité de rupture

La probabilité évènementielle d'apparition de surverse est logiquement inchangée pour les périodes de retour entre 50 ans et 200 ans. Pour la crue cinq-centennale la hauteur de surverse passe de 20 cm à 27 cm ce qui induit une augmentation de la probabilité évènementielle d'apparition de surverse (de 80% de risque à 100 %). Pour une crue de période de retour de 1000 ans le risque d'apparition est inchangé car la surverse est déjà certaine en état actuel.

La probabilité annuelle de rupture a été calculée avec ces données sur les deux profils (cf. tableau ci-après)

La probabilité annuelle de rupture jusqu'à 200 ans (probabilité prise en compte dans l'étude de dangers du val d'Orléans) est inchangée.

Si on considère les crues plus exceptionnelles (500 ans et 1000 ans) le risque de surverse est augmenté par le projet au PK 19.85. Mais ceci est sans incidence sur le risque d'inondation du val car dès une crue de période de retour de 200 ans, 4 zones de surverse sont identifiées dans le val d'Orléans (cf. figures ci après). La présence de ces zones de surverses implique :

- Que le niveau minimum pour une surverse au droit du point bas est extrêmement peu probable à atteindre. Il faudrait en effet un débit T500 de 7500 m<sup>3</sup>/s (au droit de Jargeau). Or dès une crue T200 ans (débit de 6 100 m<sup>3</sup>/s), le risque de rupture est de 100% en plusieurs points du val (Guilly, Sigloy). Donc dès que le niveau T200 ans sera atteint, une part importante du débit sera captée dans le val et donc le débit de la Loire diminuera. Les lignes d'eau calculée pour une crue T500 ans, ne prennent pas en compte cette répartition des débits, elles sont donc maximisées ;
- Que s'il y a surverse et donc rupture, l'impact sur les zones inondables sera marginal car le val sera déjà inondé par les ruptures survenues à l'amont pour des débits plus faibles ;
- Que le val sera déjà totalement évacué avant apparition de la surverse sur le point bas.

Etat	PK digue	Probabilité annuelle de rupture	
		Jusqu'à 200 ans	Jusqu'à 1000 ans
Actuel	19,85	0.00%	0.27%
	20,40	0.00%	0.00%
Projeté (remous)	19,85	0.00%	0.31 %
	20,40	0.00%	0.00%

Tableau 36 : Calcul de probabilité annuelle de rupture par surverse

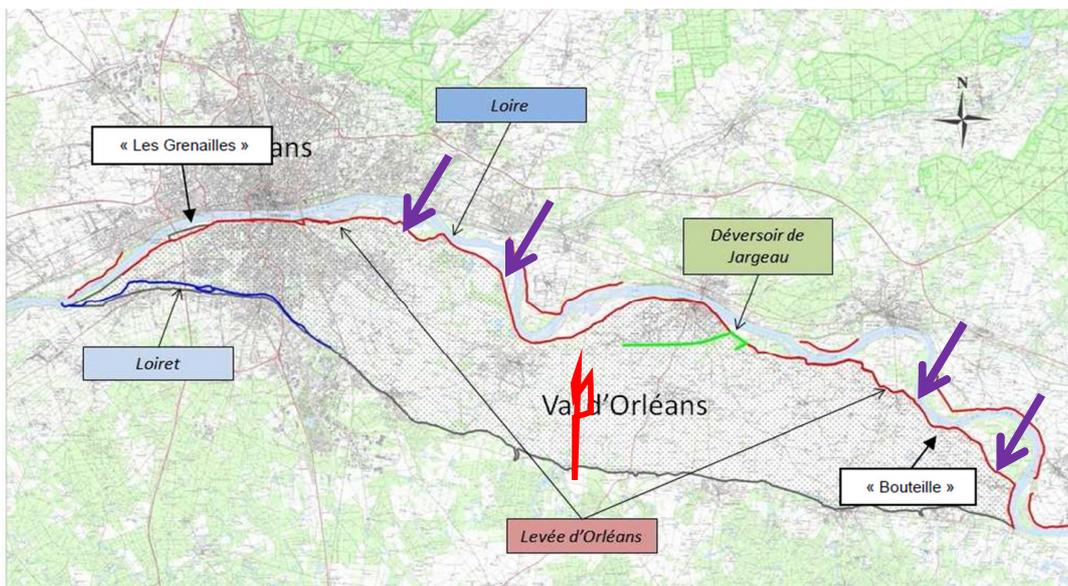


Figure 49 : Zones de surverse (flèches) pour une crue de période de retour de 200 ans (source EDD, val d'Orléans)

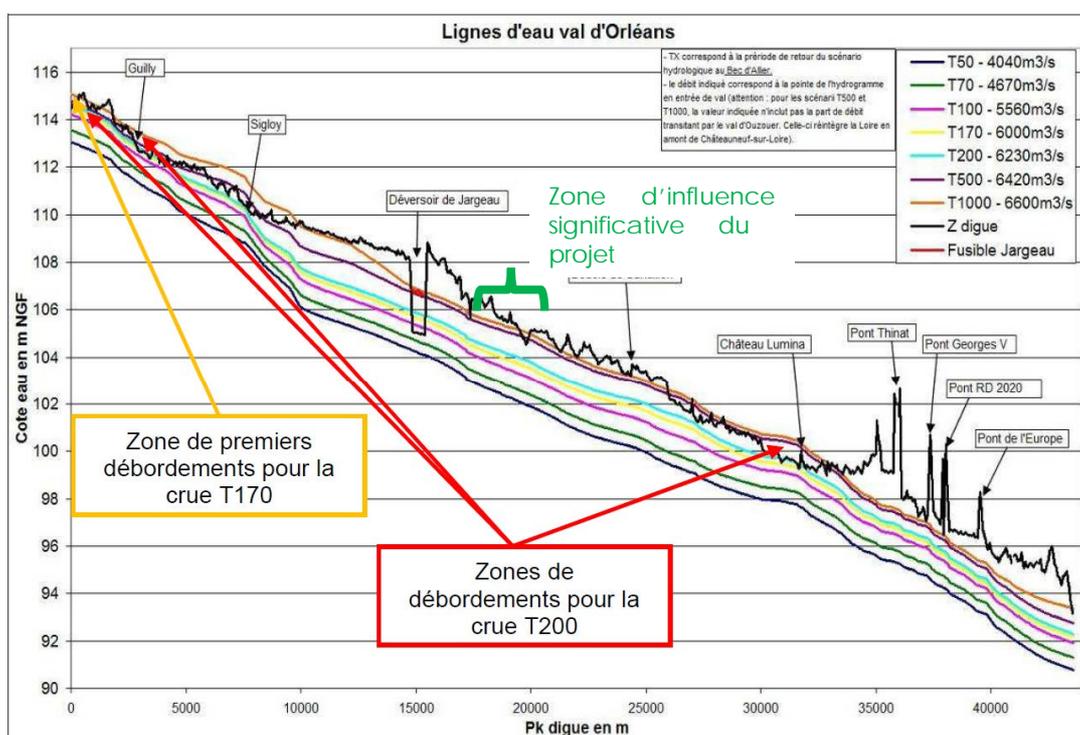


Figure 50 : Profil en long de la crête de digue et de la ligne d'eau (EDD du val d'Orléans).

Il faut noter qu'en cas d'embâcle dans l'ouvrage de décharge, la surcote serait de 31 cm au droit du pont (pour une crue cinq-centennale) soit 16 cm au-dessus de la situation sans embâcle. Ceci n'induit pas de nouvelle surverse pour une crue de 200 ans car les hauteurs de revanche calculées dans le tableau 20 sont toutes supérieures à 16 cm.

## 9.5.2 Risque de glissement

Il est pris en compte dans l'étude de dangers deux risques de glissement :

- § Le risque de glissement coté val qui est pris en compte directement ;
- § Le risque de glissement coté Loire qui est pris en compte dans le calcul du risque de rupture après érosion externe.

Le risque de glissement est impacté par :

- § L'augmentation de la ligne d'eau liée au pont qui augmente la charge hydraulique
- § Les inclusions rigides qui impactent la ligne de saturation de l'eau dans le corps de digue.

Comme pour le risque d'érosion interne, il a été utilisé deux approches de calcul du glissement : l'outil Cardigue utilisé dans l'étude de dangers du val et le logiciel SLOPE.

Glissement coté val avec l'outil Cardigue

Le tableau ci-dessous indique les évolutions du facteur de glissement et de la probabilité annuelle d'initialisation d'un glissement du fait de l'augmentation de la ligne d'eau. Le facteur F varie faiblement ce qui n'induit pas une augmentation de la probabilité de rupture par glissement coté val.

Critère	PK digue	Période de retour des crues						
		Q 50	Q70	Q100	Q170	Q200	Q500	Q1000
Valeur de F en état actuel	19.85	1.52	1.44	1.34	1.29	1.26	1.20	1.19
	20.35	1.71	1.63	1.50	1.44	1.40	1.28	1.26
	20,40	1.77	1.75	1.62	1.55	1.50	1.36	1.33
Valeur de F en état projet (rehausse uniquement)	19.85	1.51	1.43	1.33	1.28	1.26	1.19	1.19
	20.35	1.70	1.60	1.48	1.41	1.37	1.27	1.25
	20,40	1.77	1.72	1.59	1.52	1.48	1.34	1.31
Probabilité d'initiation par crue en état actuel	19.85	0.01	0.1	0.1	0.3	0.3	0.3	0.3
	20.35	0.01	0.01	0.01	0.1	0.1	0.3	0.3
	20,40	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.1	0.1
Probabilité d'initiation par crue en état projet (rehausse uniquement)	19.85	0.01	0.1	0.1	0.3	0.3	0.3	0.3
	20.35	0.01	0.01	0.1	0.1	0.1	0.3	0.3
	20,40	0.01	0.01	0.01	0.01	0.1	0.1	0.1

Tableau 37 : Calcul de probabilité événementielle de rupture par glissement coté val

Il faut noter de plus que la présence de palplanche au PK 20.45 (situation 1) réduira le risque de glissement par rapport à l'état actuel car la présence de l'écran étanche abaisse la ligne de saturation de l'eau dans la digue.

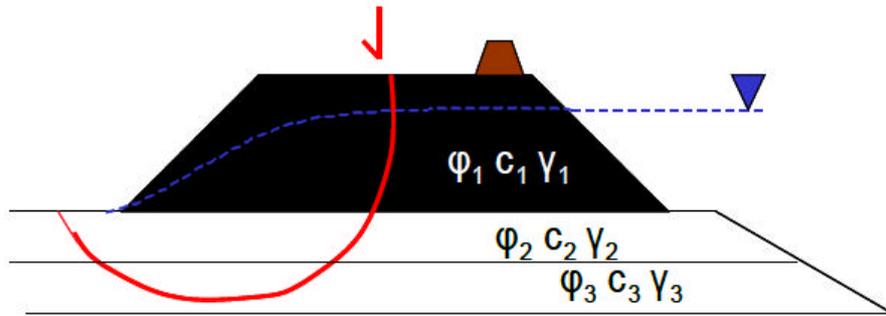


Figure 51 : Schéma de principe d'un glissement de talus coté val en état actuel

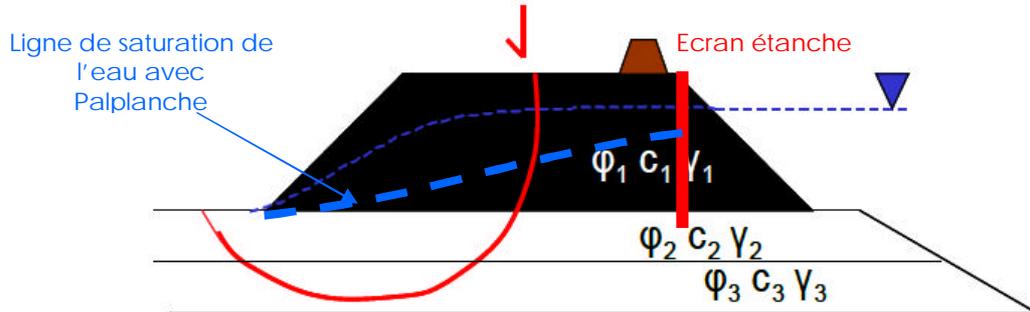


Figure 52 : Schéma de principe d'un glissement de talus coté val avec rideau de palplanche  
Glissement coté val avec le Logiciel SLOPE

Le risque de glissement a été recalculé à l'aide du logiciel SLOPE développé par GeoStudio. Ce nouveau calcul utilise les caractéristiques des matériaux obtenues dans l'étude géotechnique locale en y appliquant les caractéristiques de la digue (au PK 20.45) ainsi que la ligne d'eau concernée. Ceci permet d'obtenir un calcul localisé du facteur de sécurité et permet de prendre en compte l'impact du rideau de palplanches à l'aide de la ligne d'eau dans la digue, calculée précédemment avec le logiciel ANSYS.

	Sol	digue	assise	alluvions
caractéristiques EDD val d'Orléans	Gamma (kN/m <sup>3</sup> )	18	18	18
	C (kPa)	5	5	0
	Phi (°)	30	27	25
Caractéristiques retenues	Gamma (kN/m <sup>3</sup> )	20	20	22
	C (kPa)	4.5	4.5	9
	Phi (°)	25	25	38.1

Tableau 38 : Caractéristiques des matériaux utilisés

Il a été considéré qu'en état projeté, les inclusions rigides ne pouvaient conduire à une augmentation de la perméabilité du corps de digue supérieure d'un facteur 100 ( $10^7$  m/s en état initial contre  $10^5$  m/s en état projeté). On prend cette hypothèse pour calculer l'augmentation des niveaux de saturation de l'eau dans la digue (cf. calcul avec le logiciel ANSYS dans le paragraphe sur le risque d'érosion interne).

Les figures ci-après indiquent les calculs réalisés en crue cinq-centennale dans les trois configurations suivantes :

- § En situation actuelle où le facteur de sécurité est égal à 2.23 ;
- § En situation avec remous de 15 cm (situation n°2) où le facteur de sécurité est égal à 2.22 ;
- § En situation avec ajout du rideau de palplanches pour laquelle le facteur de sécurité est de 2.29.

Etat	Facteur de sécurité pour la crue cinq centennale
Actuel	2.23
Remous 15 cm (situation n°2)	2.22
Remous (15 cm) + inclusions rigide+ Rideau de palplanches (Ks=5.10 <sup>-8</sup> ) (situation n°1)	2.29

Tableau 39 : Impact sur le facteur de sécurité

Ces calculs montrent que :

- Le remous de 15 cm n'induit pas d'évolution significative du facteur de sécurité
- Le rideau de palplanches permet de ramener le facteur de glissement à une valeur supérieure à la valeur initiale.

En conclusion, le risque de glissement reste négligeable car :

- les facteurs de sécurité sont largement supérieurs à ceux calculés à l'aide de l'outil Cardigue. Ceci s'explique par la prise en compte des deux types de matériaux dans la digue. En effet, côté val, la digue a fait l'objet d'une recharge avec un matériau plus perméable et accompagnée d'un drain. Ceci induit un abaissement important de la ligne d'eau dans la digue côté val. Le risque de glissement est « très improbable » s'il est appliqué la paramétrisation du logiciel Cardigue.
- Les facteurs de sécurité sont largement supérieurs aux préconisations pour ce type d'ouvrage. En effet en situation exceptionnelle, il est préconisé un facteur de sécurité minimale de 1.2.

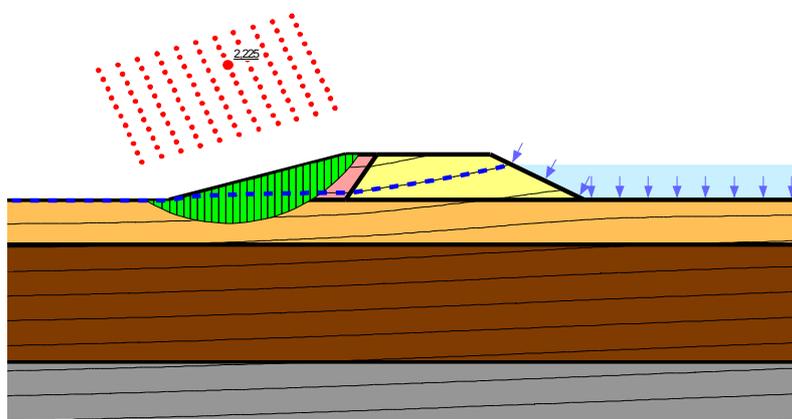


Figure 53 : Facteur de sécurité en état actuel

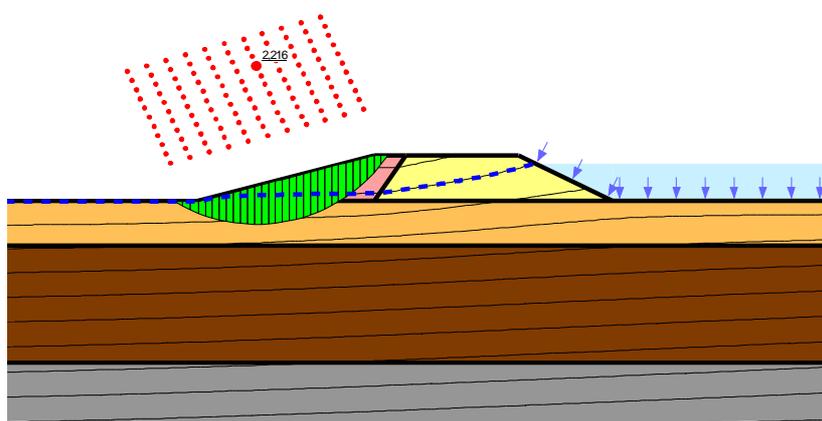


Figure 54 : Facteur de sécurité avec remous de 15 cm (situation 2)

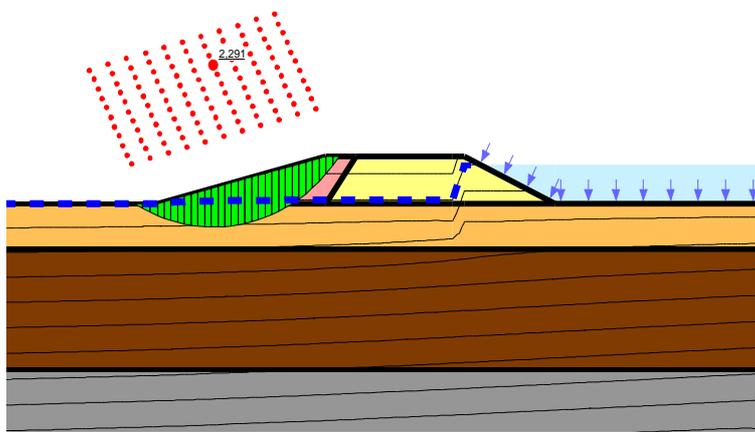


Figure 55 : Facteur de sécurité avec inclusion rigide + rideau de palplanche (situation 2)

#### Glissement coté Loire avec l'outil cardigüe

A l'image du risque de glissement coté val, le risque de glissement coté Loire est légèrement augmenté, mais sans affecter la classe la probabilité d'initiation.

Il faut noter qu'un glissement peut survenir uniquement en cas :

- § de décrue rapide de la Loire. Cette situation n'a jamais été observée et n'est d'ailleurs pas étudiée dans l'étude de dangers du val d'Orléans ;
- § d'érosion du pied de talus de la digue (situation prise en compte dans l'étude de dangers du val d'Orléans), mais le risque d'érosion en pied de talus est nul sur notre secteur.

En conclusion, le risque de glissement coté Loire reste donc « très improbable ».

Critère	PK digue	Période de retour des crues						
		Q 50	Q70	Q100	Q170	Q200	Q500	Q1000
Valeur de F en état actuel	19.85	1.74	1.65	1.52	1.45	1.41	1.29	1.26
	20,45	1.63	1.53	1.42	1.36	1.33	1.24	1.22
Valeur de F en état projet (rehausse uniquement)	19.85	1.76	1.66	1.53	1.46	1.42	1.30	1.27
	20,45	1.60	1.51	1.40	1.34	1.31	1.23	1.21
Probabilité évènementielle d'initiation en état actuel	19.85	0.01	0.01	0.01	0.1	0.1	0.3	0.3
	20,45	0.01	0.01	0.1	0.1	0.1	0.3	0.3
Probabilité évènementielle d'initiation en état projet (rehausse uniquement)	19.85	0.01	0.01	0.01	0.1	0.1	0.3	0.3
	20,45	0.01	0.01	0.1	0.1	0.1	0.3	0.3

Tableau 40 : Calcul de du facteur F pour le glissement coté Loire

Au Pk 20.45, La présence d'un écran étanche permet en cas de glissement de maintenir la structure de la digue, le temps d'une intervention.

### 9.5.3 Risque de soulèvement

Le risque de soulèvement est présent quand une couche moins perméable constitue les fondations de la digue. Au vu des investigations géotechniques récentes (cf. annexe 2) ce cas ne s'applique donc pas au secteur étudié.

Le risque de soulèvement hydraulique ne change pas de classe de probabilité annuelle de rupture. Le risque reste «très improbable» (probabilité annuelle inférieure à 0.01%

## 9.6 Conclusions sur le risque de rupture

En conclusion, pour chaque mode de rupture de digue, il est possible de caractériser l'impact du projet :

- § La probabilité de rupture par surverse n'est augmentée que pour des périodes de retour de 500 ans et 1000 ans dans un secteur déjà soumis à surverse en état actuel. Cette surverse surviendra après d'autres secteurs dans le val d'Orléans (secteur de Guilly notamment). Cela explique pourquoi dans l'étude de dangers du val d'Orléans, ce secteur de surverse à proximité du projet n'est pas considéré comme critique. Il est rappelé que la crue de protection du val d'Orléans est de période de retour de 200 ans ;
- § Le risque d'érosion interne est augmenté sur les secteurs de digues non modifiés du fait du remous hydraulique. L'impact des inclusions rigides, du point de vue de ce processus, est quant à lui compensé par la présence de rideau étanche. L'augmentation du risque ne modifie pas la classe de risque la maintenant dans la tranche la plus basse (très improbable) ;
- § Le risque de glissement est augmenté du fait d'une réduction des facteurs de sécurité côté val et côté Loire, mais il reste négligeable car :
  - Pour le risque de glissement côté val, les facteurs de sécurité sont supérieurs aux seuils minimaux recommandés;
  - Pour le risque de glissement côté Loire les phénomènes initiateurs du glissement côté val sont extrêmement peu probables ;
- § Le risque d'érosion externe n'est pas modifié par le projet ;
- § Le risque de soulèvement est inexistant.

La probabilité annuelle de rupture au droit du projet après réalisation de celui-ci est donc estimée comme très improbable (inférieure à 0.01%) comme en état actuel.

Pour la crue de sureté de l'ensemble du val (période de retour du val) le risque de rupture au droit du projet ne change pas de classe. De plus, le niveau sureté du secteur étudié (PK 19.85 à PK 20.55) est supérieur à une crue de période de retour de 200 ans.

PK digue	Probabilité annuelle des évènements jusqu'à Q200					
	Surverse	Erosion interne	Glissement	Erosion externe	Soulèvement	Total
19,85 à 20,55	0,00%					

Tableau 41 – Calcul de probabilité annuelle des évènements jusqu'à la Q200 en état projeté

PK digue	Probabilité annuelle des évènements jusqu'à Q1000					
	Surverse	Erosion interne	Glissement	Erosion externe	Soulèvement	Total
19,85	0.31%	0.04%	0.01%	0.00%	0.00%	0.32%
19,90	0.28%	0.02%	0.01%	0.00%	0.00%	0.28%
19,95	0.12%	0.02%	0.01%	0.00%	0.00%	0.12%
20,00	0.02%	0.02%	0.01%	0.00%	0.00%	0.03%
20,05	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.01%
20,10	0.01%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%
20,15	0.01%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%
20,20	0.02%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.02%
20,25	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
20,30	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
20,35	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
20,40	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
20,45	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
20,50	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
20,55	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

Tableau 42 – Calcul de probabilité annuelle des évènements jusqu'à la Q1000 en état projeté

## 9.7 Estimation du risque inondation

### 9.7.1 Localisation des brèches

Il est considéré une brèche en amont de l'ouvrage existant du fait que les écoulements sont le plus perturbés dans ce secteur.

Ce scénario de brèche est distinct des scénarios de l'étude de dangers du val d'Orléans pour laquelle le faible risque de rupture au droit du projet par rapport aux autres secteurs ne justifiait pas un scénario spécifique à proximité de la nouvelle voie.

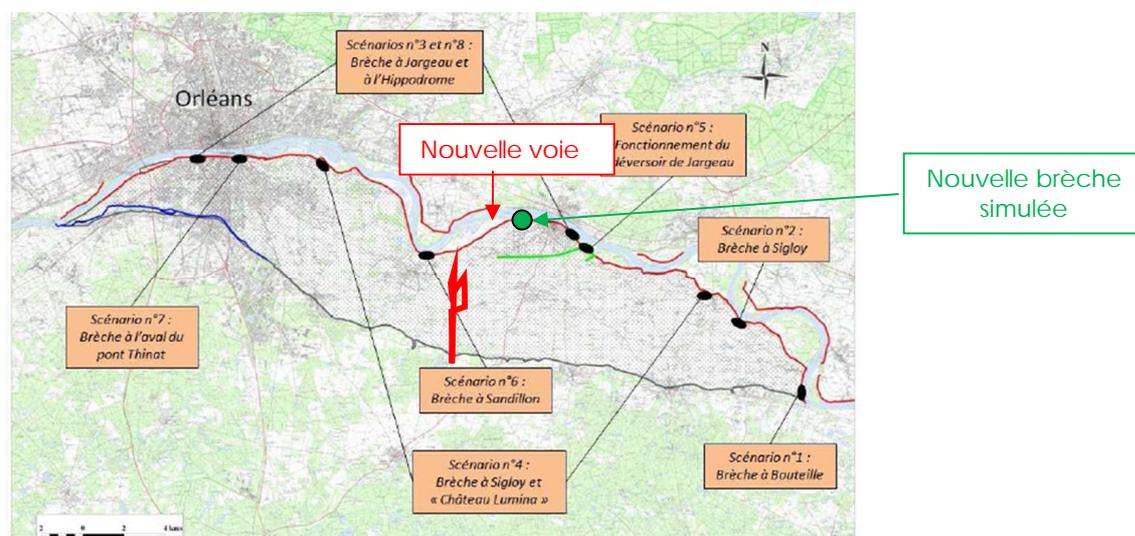


Figure 56 : Scénario de brèche de l'étude de dangers (source : EDD, val d'Orléans)

### 9.7.2 Scénarios de l'étude de dangers du val d'Orléans

Le tableau ci-dessous présente les scénarios d'inondation considérés dans l'étude de dangers du Val d'Orléans.

La largeur des brèches est proche de 600 m sauf pour le scénario 8, situé en zone urbaine qui présente donc un fonctionnement distinct des autres scénarios. Cette largeur de 600 m est cohérente avec le retour d'expérience sur les brèches historiques de la Loire qui présentaient des largeurs entre 300 m et 650 m.

Les débits passant dans les brèches varient du simple au triple en fonction des scénarios (entre 700 m<sup>3</sup>/s et 2400 m<sup>3</sup>/s).

- § Pour les scénarios 1, 2 et 6, les débits déversés sont de 2400 m<sup>3</sup>/s ; L'hydrogramme de brèche est établi sur la base d'une brèche identique à la brèche de Jargeau en 1856. Toutes ces brèches sont situées en bordure du lit vif et dans l'extrados d'un méandre, ce qui explique en partie l'importance des débits déversés ;
- § Pour les scénarios 7 et 8, les débits déversés sont limités par la configuration du casier en aval ;
- § Pour le scénario 5, le débit est limité par la capacité du déversoir de Jargeau calculé par un modèle 1D casier ;
- § Pour les scénarios 3 et 4, les débits déversés sont calculés à l'aide des modèles 1D et 1D casier existant sur la Loire moyenne. Le débit total déversé par les deux brèches semble important (3800 m<sup>3</sup>/s) au regard du débit maximum de la crue de période de retour de 200 ans utilisé pour caractériser les débits déversés (6000 m<sup>3</sup>/s).

Scénario	Type	Largeur brèche (m)	Débit max dans la brèche (m <sup>3</sup> /s)	Méthode d'estimation de l'hydrogramme de rupture
Scénario 1 : brèche à Guilly	Erosion interne et glissement	600	2400	Similaire brèche Jargeau 1856
Scénario 2 : brèche à Sigloy		600	2400	Similaire brèche Jargeau 1856
Scénario 3 : brèche à Jargeau	Erosion interne	500	700	Couplage modèle 1D et 2D
Scénario 4 : brèche à Sigloy et château lumina	Surverse ou érosion interne	600	1700 à Sigloy et 2100 à Lumina	Couplage modèle 1D et 2D
Scénario 5 : fonctionnement déversoir de jargeau	Fusible	700	1050	Modèle 1D
Scénario 6 : brèche à Sandillon	Erosion interne et glissement	600	2400	Similaire brèche Jargeau 1856
Scénario 7 : brèche à Pont Thinat	Erosion interne	600	1 000	Loi de déversoir
Scénario 8 : brèche à Orléans		100	120	Couplage modèle 1D et 2D

Tableau 43 - Caractéristiques hydraulique des scénarios de l'étude de dangers

### 9.7.3 Scénarios au droit du projet

#### 9.7.3.1 Analyse des conditions d'écoulement en crue au droit du projet

Le tableau ci-dessous indique les conditions hydrauliques en crue en amont du projet. Ces données sont issues du modèle 2D mis en place pour le dimensionnement de l'ouvrage de franchissement de la Loire pour la déviation de Jargeau. Les hauteurs de charge sur la digue sont faibles (2.4 m pour la crue de période de retour de 500 ans) comparativement à la hauteur de charge sur le reste du val d'Orléans (jusqu'à 5 m).

Période de retour	Débit maximum (m <sup>3</sup> /s)		Cote en pied de digue (m NGF)	Hauteur d'eau par rapport au pied de digue coté val (m)
	dans le lit vif	dans l'ouvrage de décharge		
50 ans	4 038	4	101.8	0.00
70 ans	4 601	14	102.50	0.70
100 ans	5 438	42	103.09	1.29
170 ans	5 780	60	103.38	1.58
200 ans	5 974	72	103.67	1.87
500 ans	6 760	120	104.30	2.40

Tableau 44 - Caractéristiques des écoulements en crues

Le projet est situé dans l'intrados d'un méandre de la Loire. Le graphique ci-après montre les profils en travers en amont et en aval du secteur de brèche retenu dans l'étude. Le lit majeur gauche se développe rapidement en passant d'une largeur de 150 m à 400m. Au pied de la digue, un axe d'écoulement formé par un point bas est visible depuis Jargeau, jusqu'à 600 m en aval du pont. Le lit majeur est peu sollicité par la Loire car il ne commence à être en eau (en pied de digue) que pour des périodes de retour de 50 ans environ et n'est complètement submergée qu'à partir de la crue centennale. Pour une crue cinq-centennale, la durée de submersion du lit majeur gauche est de 100 h environ pour une crue d'une durée de 200 h (8 jours)

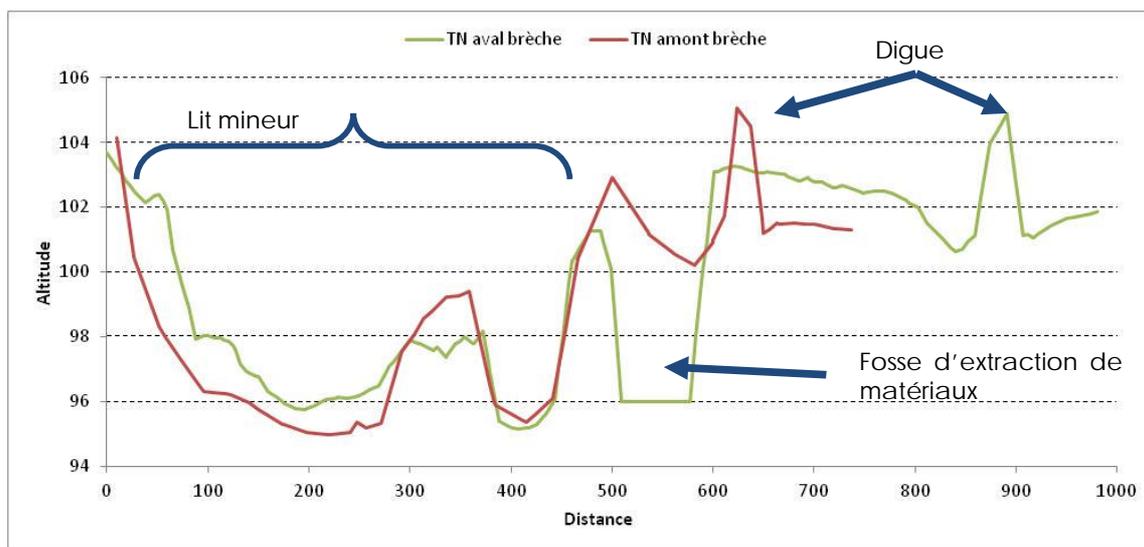


Figure 57 : profil en travers en amont et aval du secteur de brèche

### 9.7.3.2 Première approche de l'hydrogramme de brèche

Pour déterminer l'hydrogramme d'une brèche du projet de pont, il était possible d'utiliser un hydrogramme de brèche identique à la brèche de Jargeau en 1856 (de façon similaire aux scénarios 1, 2 et 6 de l'EDD). Néanmoins, cet hydrogramme n'est pas adapté à la brèche en amont du pont car :

- § la brèche n'est pas située en bordure du lit mineur et dans l'extrados d'un méandre (contrairement à la brèche de Jargeau) ;
- § la hauteur de charge en amont est plus faible.

Le débit (2400 m<sup>3</sup>/s) et le volume estimé pour la brèche de Jargeau de 1856 semblent donc surévalués.

Il a donc été préféré un calcul de l'hydrogramme à partir du modèle 2D utilisé pour l'étude hydraulique du franchissement de la Loire.

Les hypothèses de brèches sont les suivantes :

- § Elle est localisée en amont du pont (cf. illustration ci-après) ;
- § Sa largeur est de 600m ;
- § Son temps de formation est de 2h ;
- § Elle survient pour une charge de 2 m (soit une cote de 103.90 m NGF) ;
- § La cote finale de la digue après rupture est de 101.8 m NGF.

Il faut noter que pour la simulation de cette brèche, il est supposé qu'aucune autre brèche ne survient et que le déversoir de Jargeau n'entre pas en fonctionnement. Cette configuration est plutôt maximaliste sachant que :

- § la crue de sureté des digues du val d'Orléans a une période de retour estimée à 200 ans ;
- § le déversoir de Jargeau entre en fonctionnement pour la crue de période de retour de 500 ans.

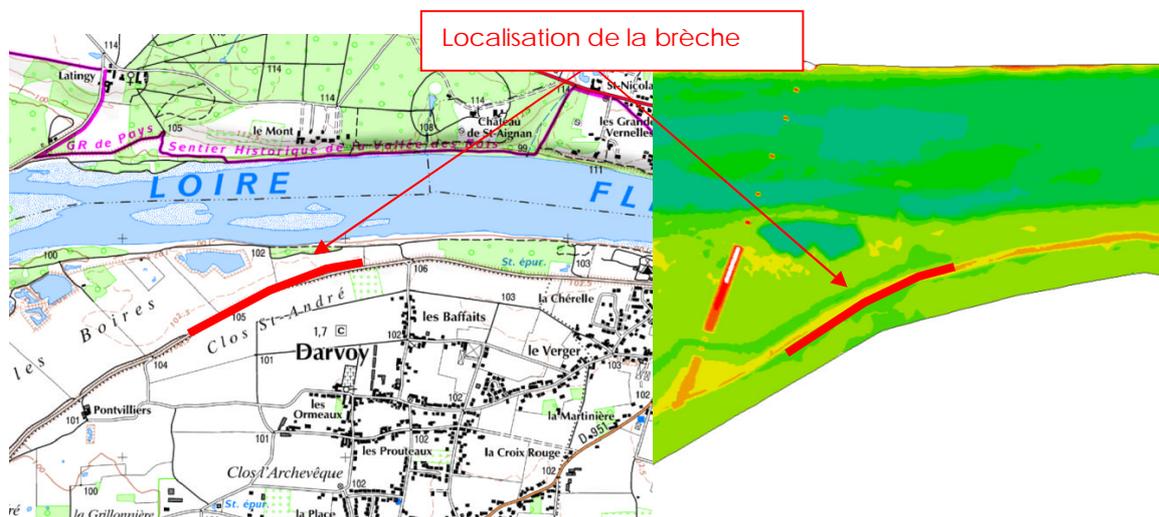


Figure 58 : Localisation de la brèche.

## Résultats

Les graphiques ci-après montrent les résultats de la première simulation. Le débit maximum de la brèche est de 450 m<sup>3</sup>/s et le déversement a une durée de 40h environ. Le volume entrant dans le val est de 39 millions de m<sup>3</sup>. Ce débit est faible comparativement aux débits retenus pour les autres brèches dans le val d'Orléans. Ceci s'explique par :

- § La hauteur de la lame d'eau limitée en amont de la digue. Au début de la brèche la hauteur de charge est de 2 m. Après ouverture de la brèche la hauteur d'eau en amont est abaissée de 0.7 m à 1 m en pied de digue. La hauteur d'eau dans le val à proximité de la digue est de 50 cm ;
- § La largeur de la risberme entre le lit mineur et le pied de la digue. Le pied de digue est en retrait de l'axe d'écoulement principal. Les vecteurs vitesses montrent clairement que l'écoulement dans le lit mineur est peu impacté par la brèche. La ligne d'eau est ainsi abaissée de 14 cm.

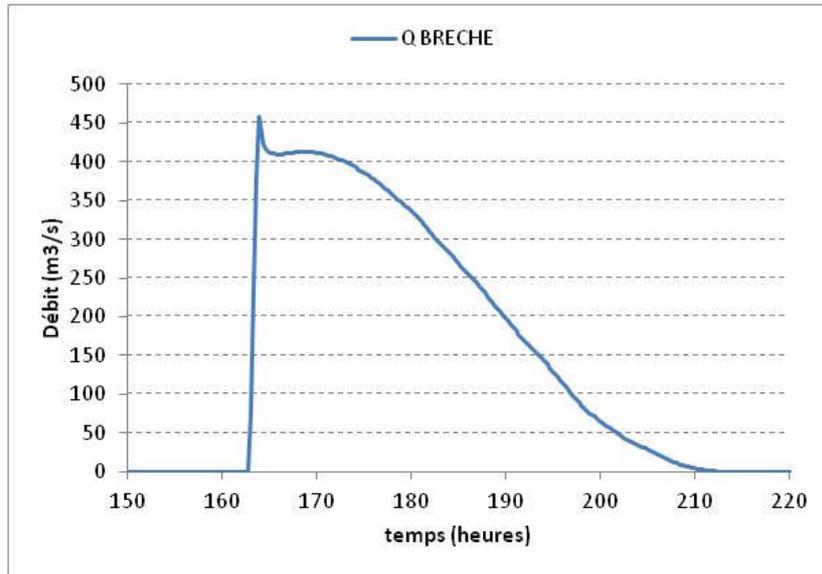


Figure 59 : Débit de brèche

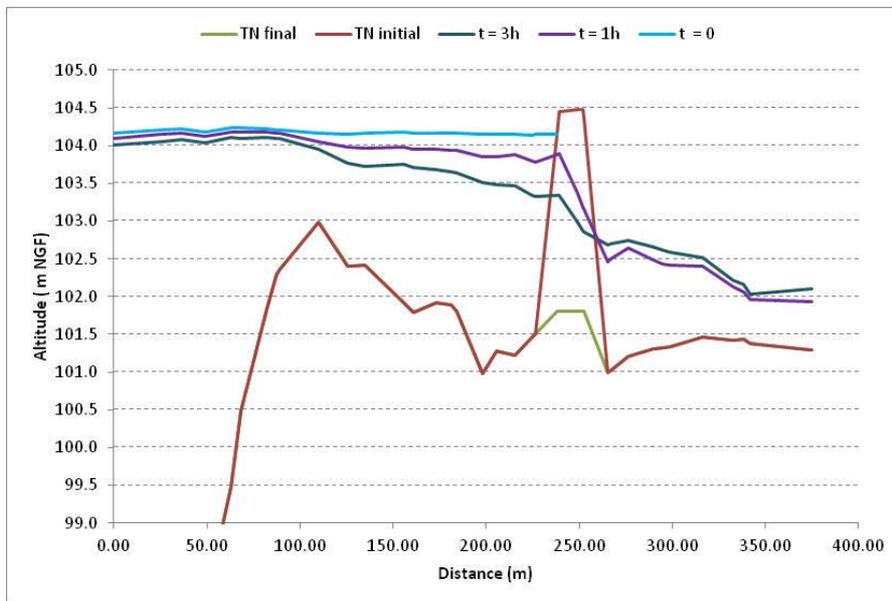


Figure 60 : Profil en long du lit mineur au val d'Orléans

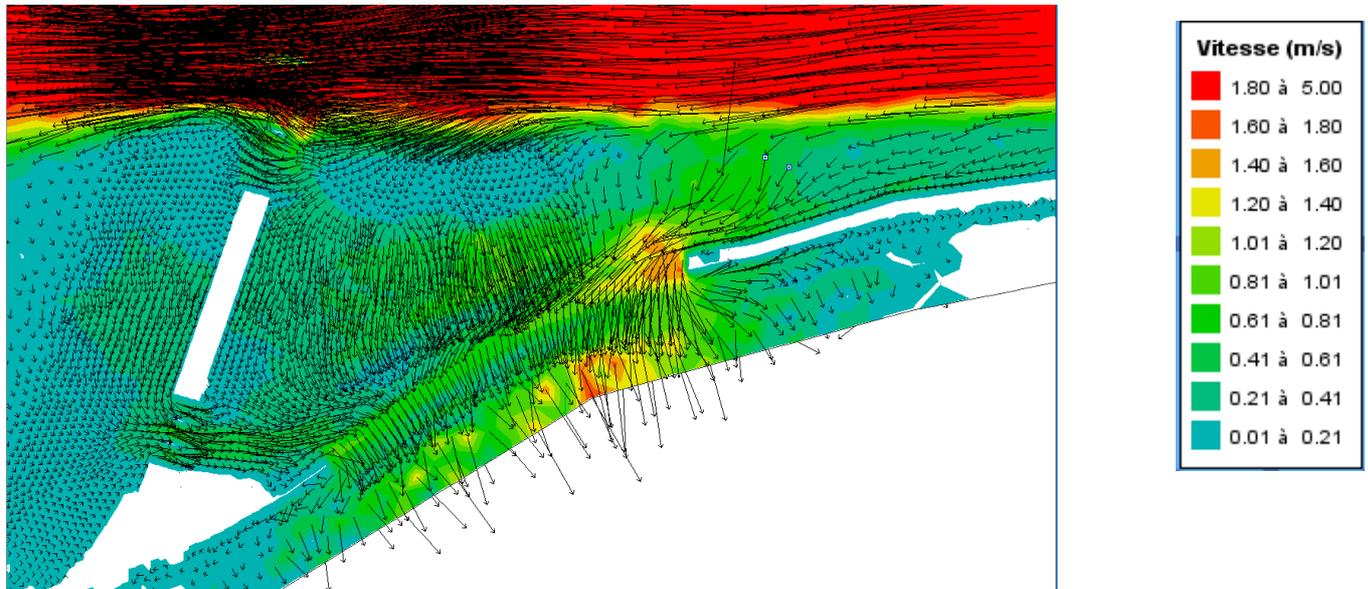


Figure 61 : Vecteurs vitesses sur la zone d'étude

### 9.7.3.3 Comparaison avec le modèle LM10

La brèche présentée précédemment a été paramétrée dans le modèle LM10-EDD qui est un modèle 1D casier. Le débit maximum entrant dans la brèche est des 1200 m<sup>3</sup>/s (contre 450 m<sup>3</sup>/s avec le modèle 2D) pour un volume déversé de 110 millions de m<sup>3</sup> (contre 39 millions avec le modèle 2D).

Cet écart entre les deux modèles s'explique par :

- § L'écart entre les lignes d'eau calculées entre les deux modèles. L'étude hydraulique du franchissement de la Loire a mis en évidence qu'au droit du projet, les cotes calculées à l'aide du modèle 2D sont 29 cm inférieures aux cotes simulées dans le modèle LM10. La hauteur d'eau sur le pied de la digue variant entre 1.5 et 2 m, l'écart représente entre 15 % et 20 % de la hauteur d'eau ;
- § Les modes de représentation des modèles. Le modèle 1D, ne permet pas de prendre en compte l'incidence de la largeur de la risberme entre le lit mineur et le pied de digue coté val.

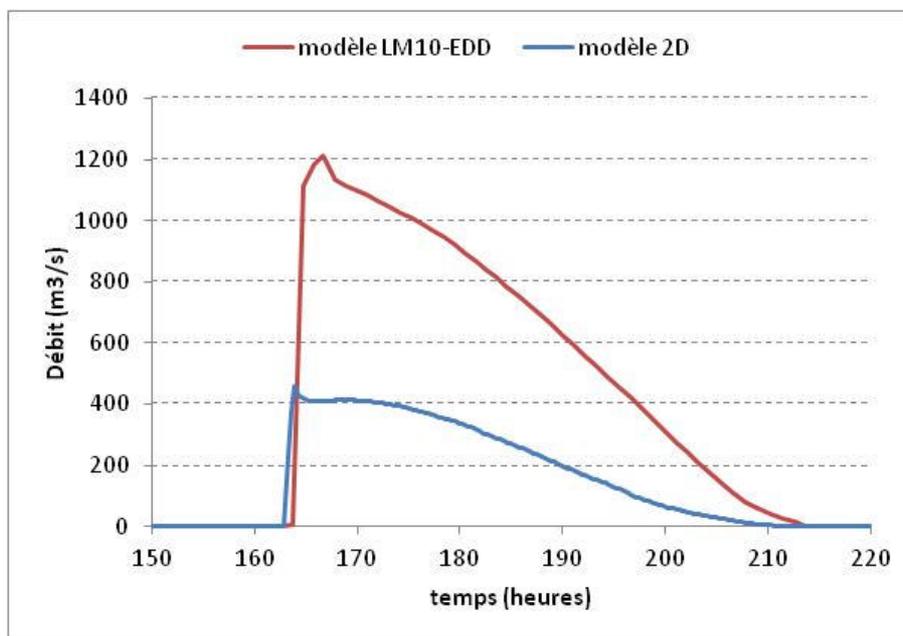


Figure 62 : Comparaison des hydrogrammes de brèche

#### 9.7.3.4 Analyse de sensibilité aux paramètres de rupture

Une analyse de sensibilité de l'hydrogramme de brèches aux paramètres de formation de celle-ci a été réalisée :

- § Sur la vitesse d'ouverture de la brèche ;
- § Sur la hauteur de charge au moment de l'ouverture ;
- § Sur la largeur finale de la brèche.

Cette analyse met en évidence, que pour les hypothèses de temps d'ouverture et de charge, les débits maximum entrants varient de - ou + 10% alors que les volumes sont quasi identiques.

La largeur de la brèche a un impact important sur le débit entrant dans le val. L'hypothèse d'une brèche de 600 m de large est proche du maximum observé sur les digues de Loire (val d'Orléans et de Tours) ; elle est donc sécuritaire.

Paramètre de la brèche	Débit maximum déversé (m³/s)	Volume entrant dans le val (Mm³)
Ouverture instantanée	400	31
Ouverture en 2h	450	39
Ouverture en 6h	460	40
Brèche pour une charge de 1.8 m	390	41
Brèche pour une charge 2 m	450	39
Brèche d'une largeur de 100 m	233	21
Brèche d'une largeur 600 m	450	39

Tableau 45 : Analyse de sensibilité des brèches

### 9.7.3.5 Impact des fosses d'érosions

L'état de l'art sur le mécanisme de formation des brèches indique que la formation d'une fosse d'érosion au droit de la brèche augmente le débit passant dans la brèche. Le projet «LEVEES» piloté par L'IRSTEA (dont l'objectif est de comprendre les mécanismes de formation des brèches) a clairement mis en évidence, via des modélisations 2D des mécanismes de création de fosses d'érosion, que ces dernières augmentaient les débits déversés dans la zone protégée (de 50% environ dans le cas test étudié).

De plus, les analyses sur la brèche de Jargeau de 1856 détaillées dans l'annexe 25 de l'étude de dangers du val d'Orléans mettent en évidence que la largeur de la brèche de Jargeau (650 m) était insuffisante pour permettre le transit des 2 400 m<sup>3</sup>/s déversés (ce débit déversé étant reconstitué par l'analyse des échelles sur la Loire). Seul le développement d'une fosse d'érosion qui augmente la longueur de l'interface lit mineur-val peut expliquer le débit déversé.

Au vu de l'impact de la fosse d'érosion sur les débits déversés, il a été réalisé une analyse des risques d'érosion au droit de la brèche.

#### Rappel des données historiques

Dans le cadre de l'étude de dangers du val d'Orléans, 26 brèches historiques dans le val d'Orléans ont fait l'objet d'une analyse. Cette analyse comprend une estimation des fosses d'érosion. Ainsi sur 26 brèches, 19 fosses d'érosion ont pu être caractérisées. Pour la majorité d'entre elles, la largeur de la fosse d'érosion est proche de la largeur de la brèche. La longueur de la fosse d'érosion varie entre 50 et 300 m. Elle reste néanmoins réduite à moins de 100 m pour 13 des 19 fosses d'érosion analysées. Ces fosses se développent essentiellement coté val. Le développement coté Loire est observé quand une risberme est présente.

Il est recommandé dans « l'étude des brèches dans le val d'Orléans » menée par le CETE de retenir un fossé d'érosion de 1 m de profondeur moyenne et de longueur de 300 m.

#### Approche numérique des fosses d'érosion dans le projet LEVEES.

Dans le cadre du projet LEVEES, le CETE méditerranée (M.LAROCHE) a tenté de modéliser la rupture de la digue et la création de la fosse d'érosion à l'aide du logiciel TELEMAC. Pour cela il a été implémenté dans le code de calcul, une fonction d'érosion basée sur la Loi de Parthéniades (Erosion and deposition of cohesive soils. Journal of the Hydraulic Division, n°91, pp 105) présenté ci-après :

$$e = k_d \times (t - t_c)$$

Où

- § e: vitesse d'érosion en (m/s) ;
- §  $K_d$ : coefficient d'érosion (m<sup>3</sup>/N.s) ;
- § T : force tractrice (N/m<sup>2</sup>) ;
- §  $T_c$ : force tractrice critique (N/m<sup>2</sup>).

Avec

$$t = r \times g \times h^{-1/3} \times V^2 \times K_s^{-2}$$

Où

- § T : force tractrice (N/m<sup>2</sup>) ;
- §  $\rho$  : masse volumique de l'eau ;
- § h : la hauteur d'eau ;
- § I : la pente de la ligne d'eau qui peut être calculée à l'aide de formule de Manning Strickler.

Sur le graphique ci-après, il est proposé une relation entre la force tractrice critique et le taux d'érosion. Dans l'étude LEVEES, il était pris deux jeux de paramètres : le premier correspondant à un matériau très érodable ( $K_d = 10^{-5}$  et  $t_c = 0.1$ ) et le second correspondant à un matériau moyennement résistant ( $K_d = 10^{-7}$  et  $t_c = 10$ ).

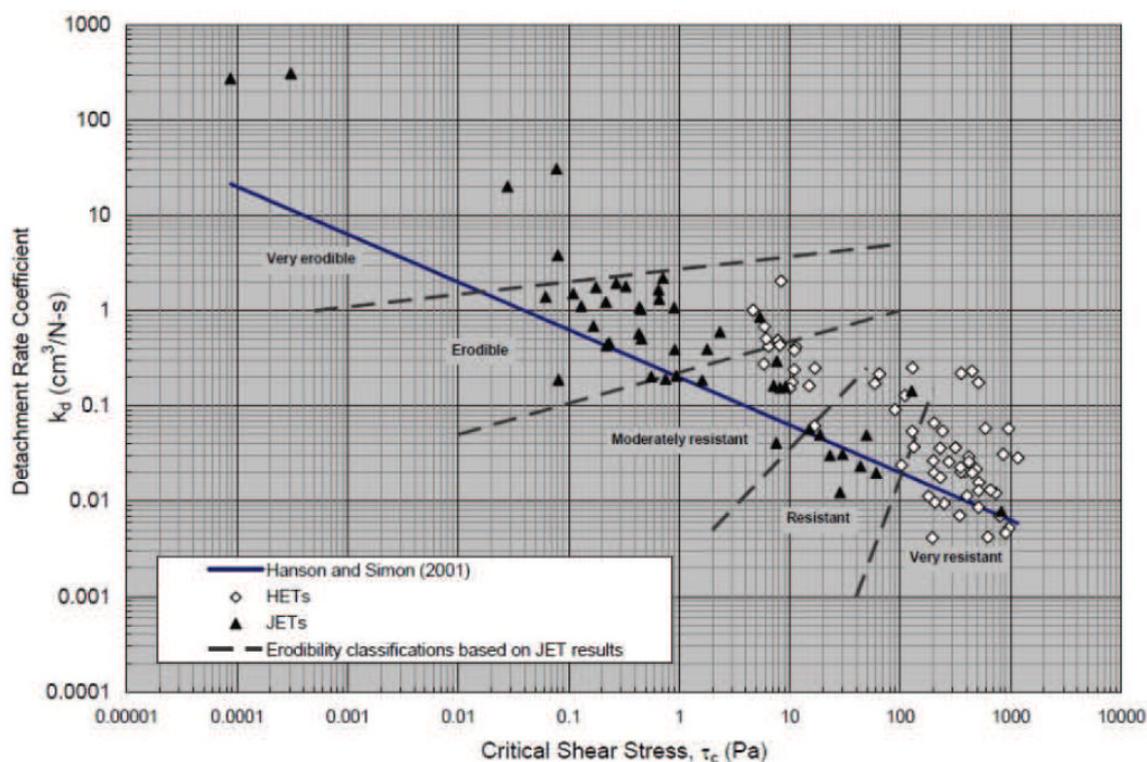


Figure 63 : Relation entre la force tractrice et la vitesse d'érosion (source : rapport projet LEVEES)

#### Application au cas du projet

Les fosses d'érosion peuvent augmenter les débits transitant dans les brèches, il semble donc intéressant d'analyser les capacités de formation de fosses d'érosions au droit de la brèche. Cette fosse peut :

- § se développer sur l'aval (coté val), mais cela n'aura que peu d'influence sur le débit car, c'est essentiellement la configuration de la risberme entre le lit mineur et la brèche qui conditionne le débit entrant de le val ;
- § se développer sur l'amont jusqu'à rejoindre le lit mineur et faciliter ainsi la captation du débit par la brèche.

Il sera donc plutôt analysé le risque de développement de la fosse d'érosion sur l'amont.

La capacité de développement d'une fosse d'érosion est liée à la force tractrice qui est essentiellement conditionnée par la vitesse d'écoulement. Les graphiques ci-après montrent que lors du début de la brèche, la vitesse d'écoulement augmente au droit de l'extrémité Est de la brèche (vitesse de 1.6 m/s). Sur le reste de la brèche, la vitesse a augmenté par rapport à la situation avant la brèche mais elle reste faible (1 m/s). Dans les champs majeurs devant la brèche, les vitesses sont essentiellement augmentées sur l'amont de la brèche dans une zone où le lit majeur est plus bas. La présence de la gravière devant la brèche limite l'augmentation des vitesses entre la brèche et le lit mineur. Cette faible augmentation des vitesses confirme le fait que la brèche a peu d'influence sur les écoulements en lit mineur.

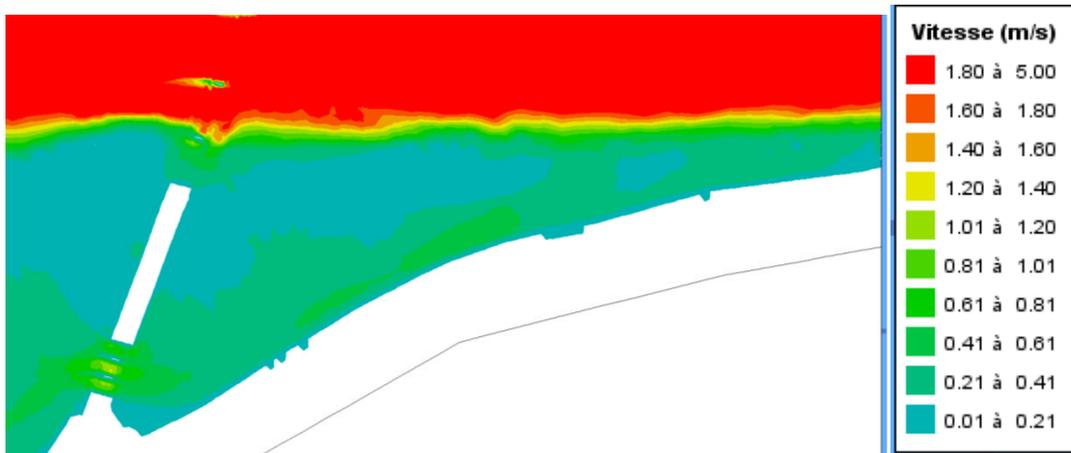


Figure 64 : Vitesse d'écoulement avant le début de la brèche

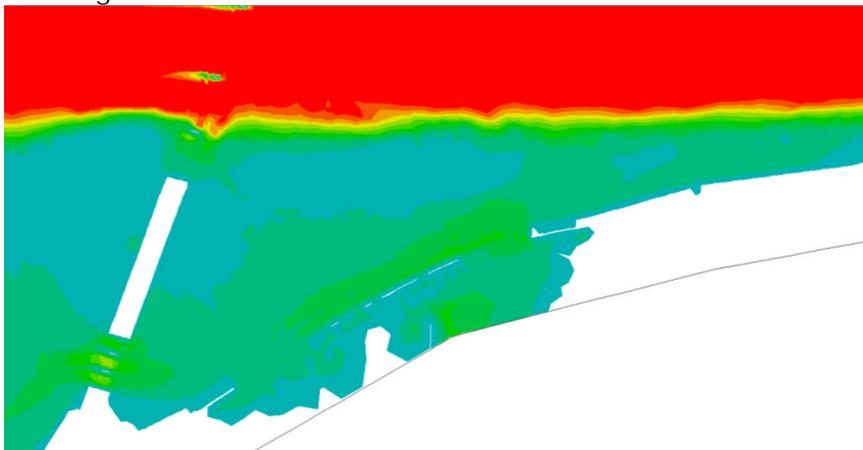


Figure 65 : Vitesse d'écoulement 30 minutes après le début de la brèche

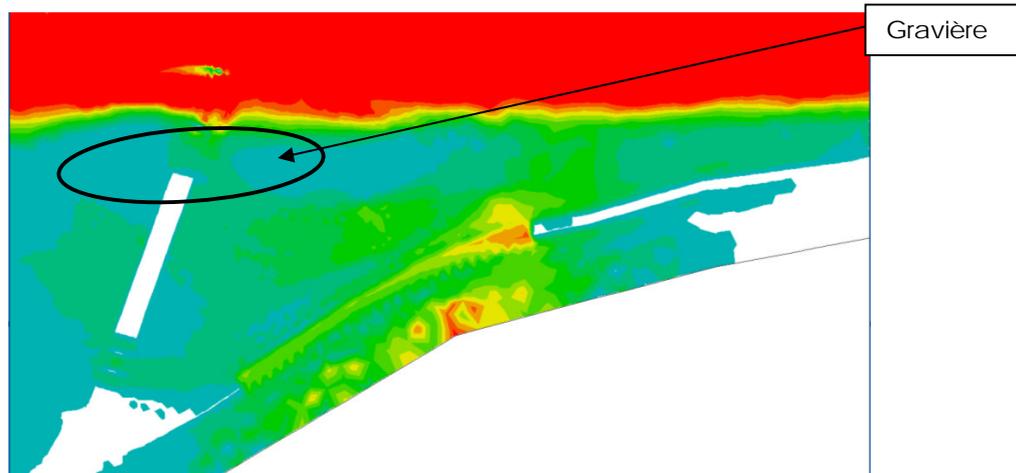


Figure 66 : Vitesse d'écoulement 1h30 après le début de la brèche

A l'aide des formules précédentes et en utilisant les résultats du modèle hydraulique, il a été calculé les vitesses d'érosion en 3 points du modèles : aux deux extrémités de la brèche et en bordure du lit mineur (dans la zone d'accélération des vitesses). Il a été choisi des caractéristiques de matériaux de classe « érodable ».

On constate que les forces tractrices sont faibles sur la brèche (au maximum 41 N/m<sup>2</sup>) et concentrées sur la limite Est des brèches. En conséquence les vitesses d'érosions sont faibles voire nulles autour de la

brèche. Seule l'extrémité Est de la brèche voit le développement possible d'une fosse avec une hauteur affouillée de 1 m sur 10 h et 3 à 4 m à la fin des déversements dans le val. Ces valeurs de hauteurs affouillées ne prennent pas en compte le fait que l'évolution de la fosse modifiera les conditions d'écoulement tout au long de son développement.

paramètres	extrémité Est de la brèche	extrémité Ouest	haut de berge rive gauche
h (m)	1	0.7	1.2
vitesse (m/s)	1.6	0.9	0.6
Strickler	25	25	25
force tractrice (N/m <sup>2</sup> )	40.96	14.60	5.42
force tractrices critiques (N/m <sup>2</sup> )	10	10	10
coefficient de parteniades (m <sup>3</sup> /N.s)	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06
vitesse d'érosion (m/s)	3.10E-05	4.60E-06	0.00E+00
hauteur affouillée en 40h (m)	Entre 2 m et 4 m	< 1 m	-

Tableau 46 – Calcul de la vitesse d'érosion

#### 9.7.3.6 Conclusion et nouvelle simulation de brèche

Le développement d'une fosse d'érosion est donc possible au droit de la brèche mais celle-ci sera limitée à la partie Est de la brèche (dans le sens du courant). Néanmoins, Il est peu probable que la fosse rejoigne le lit mineur car :

- § La brèche présenterait une longueur de l'ordre de 200 m ce qui est supérieure à la majorité des fosses d'érosion observées sur les brèches de la Loire ceci d'autant plus que les débits traversés par cette brèche la qualifieraient de brèche mineure par rapport à celles déjà observées.
- § La vitesse d'érosion limite l'extension de la fosse. Ainsi il faudrait environ 10 h pour creuser une fosse de 1 m de profondeur au droit de la brèche alors que les débits déversés commencent à diminuer pour cette même durée.

Afin d'analyser l'impact du développement d'une fosse d'érosion, le modèle 2D a été modifié de façon à inclure une fosse d'érosion de 1 m de profondeur moyenne et de 200 m de large (150 m sur l'amont de la digue et 50 en aval). Ce modèle est plutôt maximaliste dans le sens où la fosse d'érosion est existante dès le début de la brèche. Le débit maximum et le volume entrant dans le val est doublé.

Paramètre de la brèche	Débit maximum déversé (m <sup>3</sup> /s)	Volume entrant dans le val (m <sup>3</sup> )
Sans fosse d'érosion	450	39
Avec fosse d'érosion	900	70

Tableau 47 : Impact de la fosse d'érosion

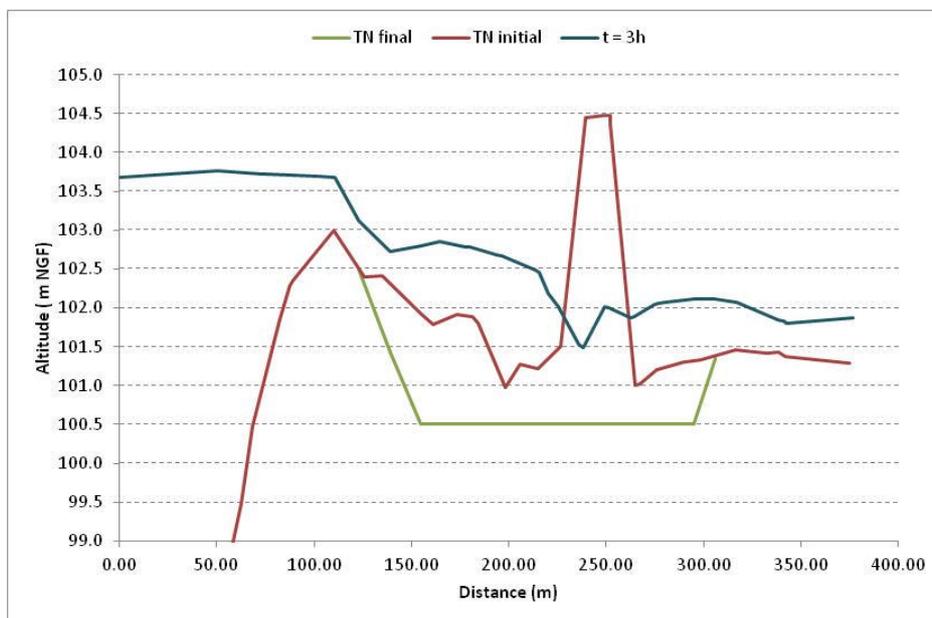


Figure 67 : Fosse d'érosion prise en compte

#### 9.7.3.7 Hydrogramme de brèche retenu

Il a été retenu pour la simulation des écoulements dans le val, l'hydrogramme de brèche calculé avec le modèle 2D et une fosse d'érosion. Celui-ci présente un débit de pointe maximum de 900 m<sup>3</sup>/s et un volume déversé de 70 millions de m<sup>3</sup>

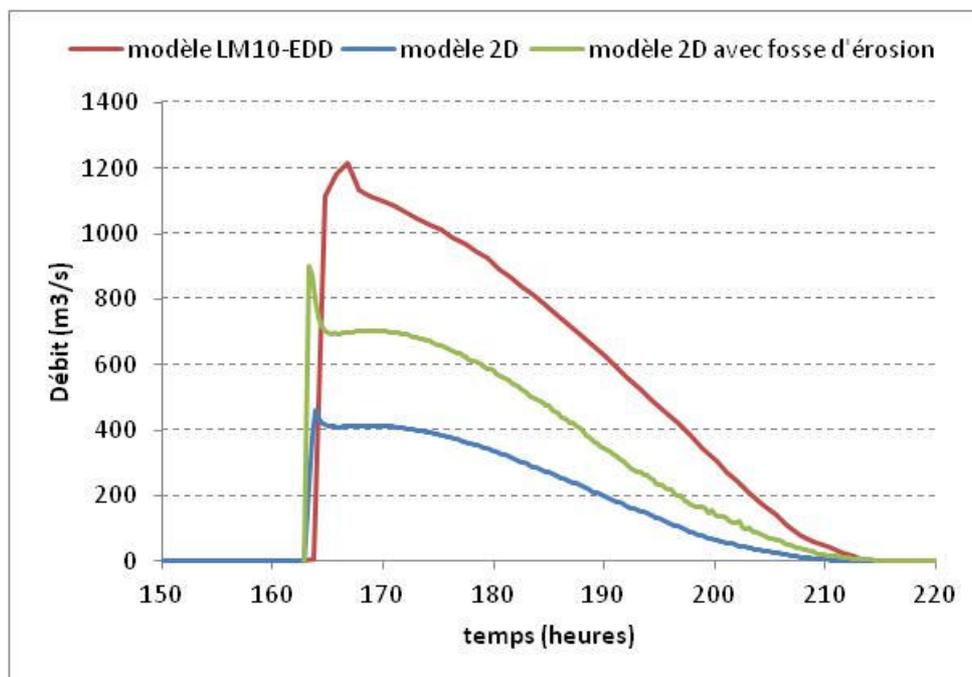


Figure 68 : Comparaison des hydrogrammes de brèches

## 9.8 Simulation de la propagation de l'hydrogramme de brèche dans le val

### 9.8.1 Condition aux limites

Les modèles utilisés pour la simulation de la brèche au droit du projet ont été fournis par la DREAL Centre. Ces modèles ont été utilisés par la DREAL Centre pour caractériser l'aléa inondation dans le cadre de l'étude de dangers du val d'Orléans.

Néanmoins, les modèles ont été conçus sur une version ancienne du logiciel Télémac (version V6P0), ils ont donc été modifiés pour pouvoir être utilisés avec la version actuelle du logiciel Télémac (version V6P2). Une nouvelle simulation en état actuel a été réalisée afin de vérifier que les calculs de la présente étude sont conformes avec ceux obtenus dans l'étude de dangers.

### 9.8.2 Conditions aux limites

Les modèles fournis par la DREAL ont trois conditions aux limites:

- § Le débit entrant dans le val par la brèche ;
- § Le débit de la Loire en aval d'Orléans et en amont de confluence avec le Loiret ;
- § Le limnigramme de la Loire en aval de la confluence avec le Loiret.

Pour la première condition aux limites, il a été utilisé l'hydrogramme présenté précédemment. Les deux autres conditions aux limites ont été obtenues à l'aide du modèle LM10-EDD (méthodologie déjà mise en œuvre dans l'étude de dangers du val d'Orléans). Pour cela, le modèle LM10-EDD a été modifié en créant une brèche engendrant un hydrogramme équivalent à l'hydrogramme déterminé précédemment.

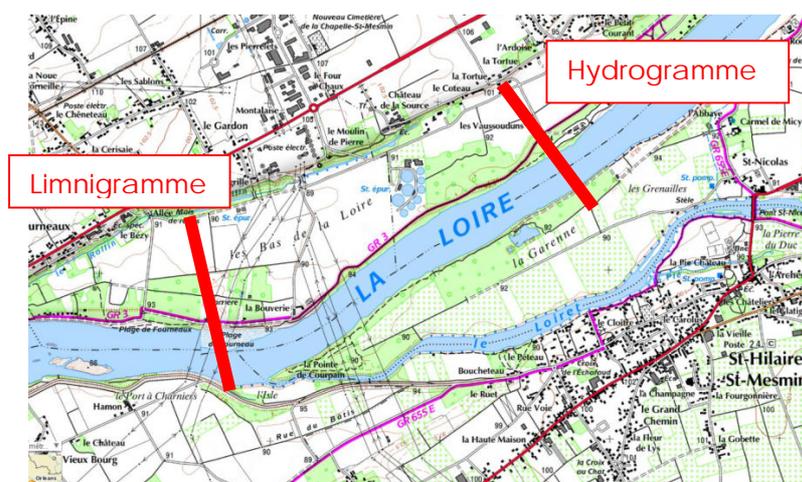


Figure 69 : Conditions aux limites aval du modèle

### 9.8.3 Simulation du scénario d'inondation

La carte située en page suivante indique le résultat de la modélisation de la propagation de l'hydrogramme de brèche dans le val d'Orléans.

L'emprise globale de la zone inondable est proche du scénario 8 de l'étude de dangers du val d'Orléans : brèche à l'amont de Jargeau.

Immédiatement après l'ouverture de la brèche les écoulements suivent deux directions:

- § L'essentiel des écoulements se propage vers l'ouest en direction d'Orléans;
- § Une petite partie traverse la commune de Darvois et remonte jusqu'à la RD 921 située dans le centre de Jargeau. Jargeau est inondée en 2 h environ.

La digue en retour du déversoir de Jargeau, bloque les écoulements protégeant ainsi les terrains situés au sud.

Les écoulements suivent un axe d'écoulement Nord-Est vers Sud-Ouest, en suivant la pente générale du val avant de rejoindre le Loiret. Le bourg de Sandillon est traversé (5 h après de début de la brèche) avec des hauteurs d'eau de l'ordre de 1 à 1.5 m.

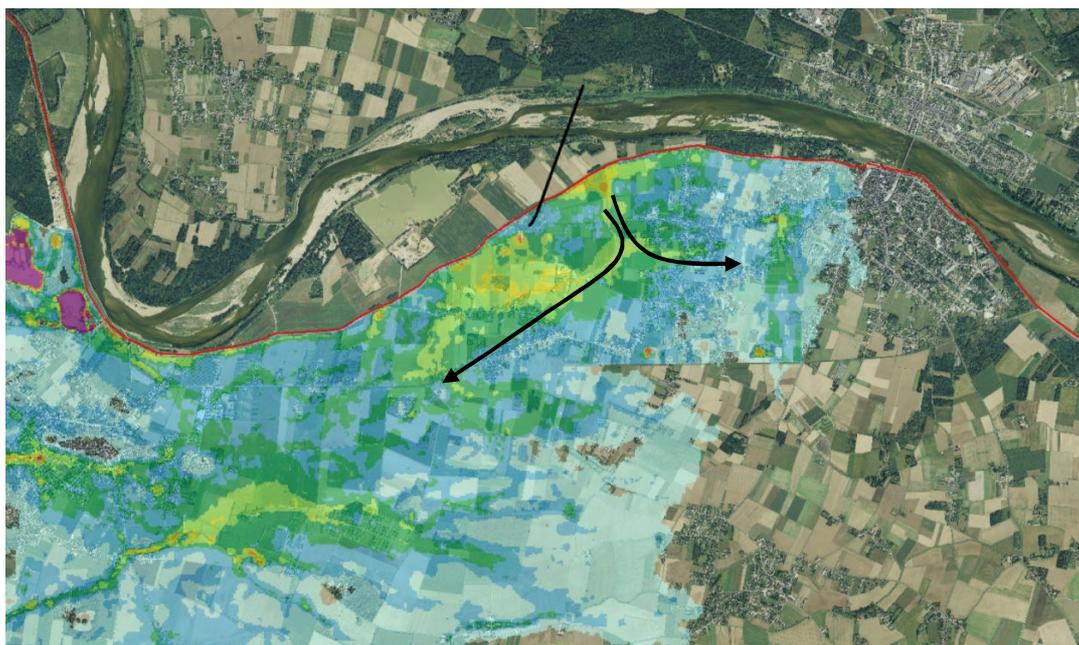


Figure 70 : Hauteur d'eau en cas de brèche – zoom sur la brèche

Au droit d'Orléans, où les eaux arrivent entre 12 et 16h après le début de la brèche, les hauteurs d'eau augmentent du fait de l'obstacle créé par le remblai ferroviaire et la zone urbaine. Le plan d'eau formé par ces obstacles induit une remontée de l'eau jusqu'au centre bourg de Saint-Denis en Val. Le Nord de la commune de Saint Denis en Val n'est pas inondé. A l'aval de la voie ferrée, la majorité des enjeux sont inondés à l'exception de ceux situés en bordure de Loire.

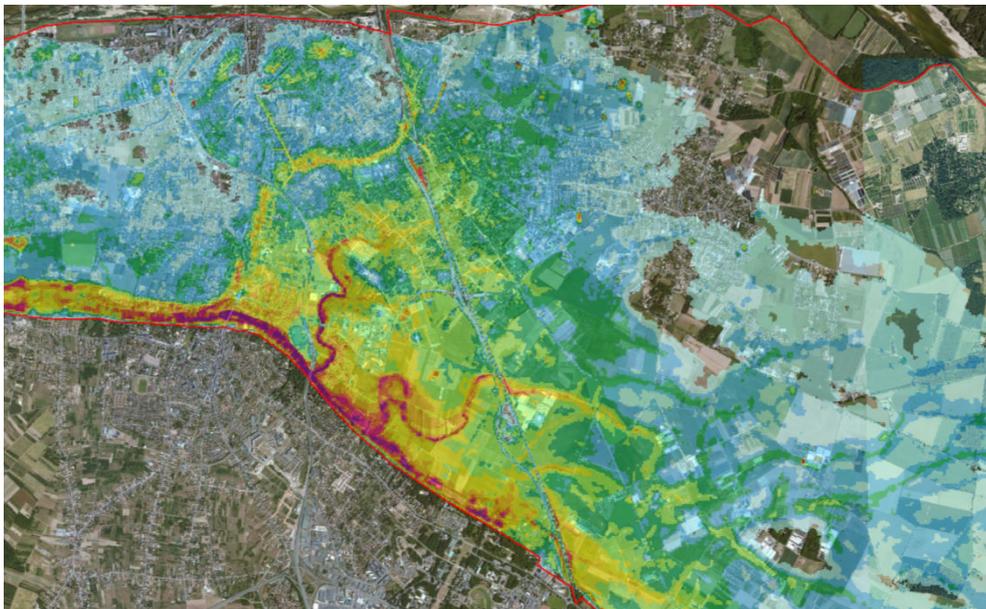


Figure 71 : Hauteur d'eau en cas de brèche – zoom sur le secteur d'Orléans

## 9.9 Gravité du scénario

### 9.9.1 Aléa inondation

En suivant la méthodologie de l'étude de dangers du val d'Orléans, la grille d'analyse ci-dessous a permis de définir 5 classes d'aléa à partir du croisement entre les hauteurs et les vitesses d'écoulement simulés.

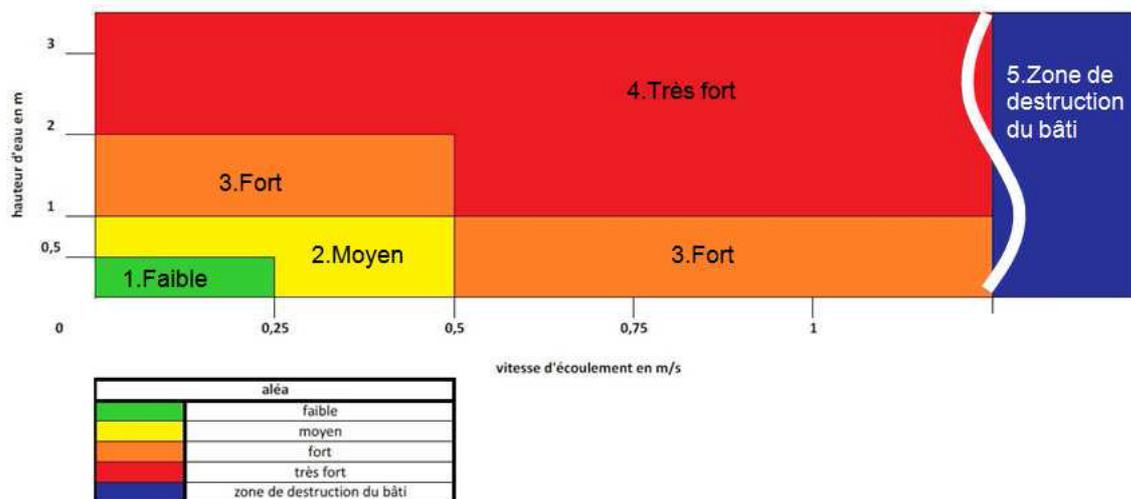


Figure 72 : Grille d'intensité de l'aléa inondation (source EED, val d'Orléans)

Le résultat du croisement est indiqué sur la page suivante.

Les zones d'aléa les plus forts (aléa destruction du bâti et aléa fort) sont situés :

- § En aval de la brèche, sur une bande de 500 m de large ;
- § En amont de la voie ferrée, dans le plan d'eau créé par l'obstacle ;
- § En aval de la voie ferrée dans le lit du Loiret.

### 9.9.2 Analyse des enjeux

Les enjeux présents dans le val d'Orléans ont été analysés dans le cadre de l'étude de dangers du val d'Orléans. Une synthèse de cette analyse est présentée dans le paragraphe 4.3.

Les données SIG, de l'étude ont été fournies par la DREAL Centre. Ceci permet d'avoir une géolocalisation de l'ensemble des habitations avec des informations sur le nombre d'habitants et le nombre d'étages.

### 9.9.3 Croisement aléa-enjeux

Un croisement des cartes d'aléa inondation et des données sur les enjeux fournis par la DREAL, a été réalisé pour obtenir sur chaque bâtiment l'aléa maximum.



Figure 73 : Vue 3D des bâtiments à Sandillon (la couleur indique l'aléa)

Le tableau ci-dessous permet de calculer la population mise en danger dans chaque bâtiment en fonction de l'aléa

Intensité de l'aléa inondation	Part de la population mise en danger		
	Habitat R0	Habitat R+1	Habitat R+2 et plus
1 – faible	0 %	0 %	0 %
2 – moyen	5 %	1 %	0.5 %
3 – fort	30 %	5 %	1 %
4 – très fort	70 %	30 %	10 %
5 – zone de destruction du bâti	95 %	95 %	95 %

Tableau 48 – Calcul de la population mise en danger (source EDD du val d'Orléans)

Le tableau ci-après indique le résultat du croisement entre l'aléa et les enjeux. Ainsi 33 000 habitants sont concernés par le scénario d'inondation étudié (pour 61 000 habitants environ dans le val). Sur cette population concernée, 3 700 habitants sont mis en danger.

Type d'habitat	Population	
	concernée	Mise en danger
Habitant en R0	10 274	1 950
Habitant en R1	20 180	1 337
Habitant en R2 et +	2 173	205
Usager de la route	342	152
Total des habitants	32 969	3 644

Tableau 49 – Calcul de la population mise en danger

La gravité du scénario est donc classée comme « catastrophique » (classe 4). Les scénarios de l'étude de dangers du val d'Orléans présentent des gravités équivalentes (4 des 8 scénarios) ou supérieures : Désastreux (4 des 8 scénarios)

Classe de gravité		Nombre de personnes exposées en zone à cinétique lente
Négligeable	0	
Modéré	1	Entre 1 et 10
Sérieux	2	Entre 10 et 100
Important	3	Entre 100 et 1000
<b>Catastrophique</b>	<b>4</b>	<b>Supérieur à 1000</b>
Désastreux	5	Supérieur à 10 000

Tableau 50 - Classes de gravité, adaptées du guide de lecture des études de dangers

## 9.10 Criticité du scénario

La caractérisation du risque de rupture a permis d'établir :

- § La probabilité annuelle de rupture au droit du projet comme très improbable (inférieure à 0.01%).
- § La gravité du scénario comme « catastrophique » (classe 4).

Suivant la grille d'analyse du risque présentée ci-après, le risque de rupture au droit du projet est qualifié de préoccupant ou tolérable sous condition. Ceci s'explique essentiellement par la très faible probabilité de rupture (classe la plus faible). Cette classe de risque est inchangée par rapport à l'état actuel

A titre comparatif, sur les 8 scénarios de l'étude de dangers du val d'Orléans :

- § 6 sont classés comme risque intolérable ;
- § 2 sont classés comme risque préoccupant ou tolérable sous condition.

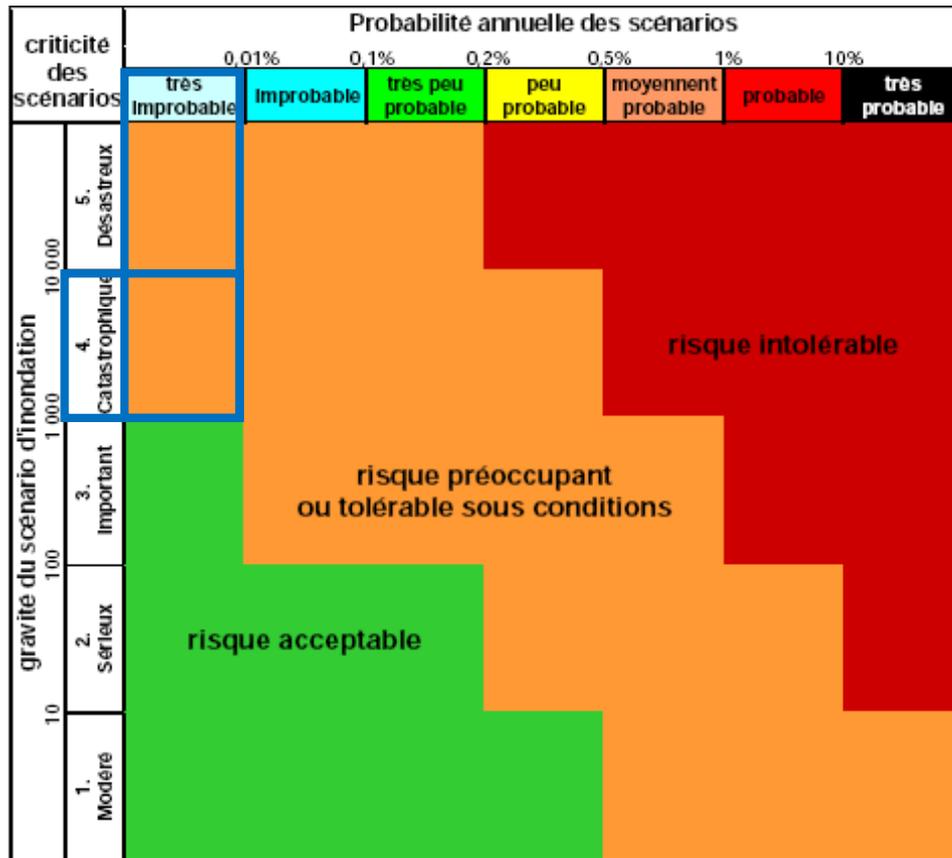


Tableau 51 - Grille de criticité (source : EDD du val d'Orléans)

# 10 ETUDE DE REDUCTION DES RISQUES

## 10.1 Rappel sur le niveau de sécurité du linéaire de digue

La probabilité annuelle de rupture (jusqu'à la crue de période de retour de 200 ans) au droit du projet est inférieure à 0.01% (donc très improbable). Cela signifie que le niveau de sureté de la levée est supérieur à 200 ans sur le linéaire étudié (Pk 19.85 à 20.55). A partir de la crue cinq-centennale, des déversements sont observés au Pk 19.85, le niveau de protection de la digue est donc légèrement inférieur à 500 ans.

Le linéaire étudié présente des niveaux de sécurité (sureté et protection apparente) supérieurs aux niveaux de l'ensemble du linéaire car :

- § Le niveau de sureté de la digue du val d'Orléans est une crue de période de retour de 70 ans
- § Le niveau de protection apparent est une crue de période de retour de 200 ans.

De plus, le risque de rupture au droit du projet est qualifié de risque préoccupant ou tolérable (zone orange) alors que le 6 des 8 scénarios d'inondation de l'étude de dangers présentent un risque qualifié d'intolérable (zone rouge).

En conséquence, le secteur situé entre les Pk 19.85 et 20.55, n'est pas un secteur prioritaire pour la réduction des risques de rupture de digue.

## 10.2 Mesure de gestion de la digue

### 10.2.1 Mesures relevant du gestionnaire de la digue

Le secteur étudié ne présentant pas un risque significatif vis-à-vis du reste de la levée d'Orléans, il n'est pas préconisé de mesures complémentaires à celles inscrites dans l'étude de dangers du val d'Orléans. Ces mesures comprennent le maintien ou l'amélioration des procédures de surveillance, d'entretien et de gestion de l'usage des digues.

Il est néanmoins intéressant que le gestionnaire mette en place une procédure d'échange d'information avec le gestionnaire de la voirie afin de profiter de la double surveillance qui sera mise en place.

### 10.2.2 Mesures relevant du gestionnaire de la voirie

Le gestionnaire de la voirie, qui disposera d'une convention d'occupation du sol avec le gestionnaire de la digue, réalisera sa propre surveillance de la voirie et de son remblai dans le cadre de la gestion normale des voiries départementales.

Néanmoins, pour prendre en compte le caractère particulier du franchissement de la Loire, il sera mis en place :

- § Une formation des agents du gestionnaire à la problématique d'entretien et de surveillance de digue ;
- § Un système d'échange d'information avec le gestionnaire de la digue ;
- § Une surveillance particulière du tassement et des écoulements en pied de remblai dans le cadre des opérations d'entretien courant ;

- § Une surveillance approfondie en cas de débit de la Loire supérieur à 4200 m<sup>3</sup>/s (mise en eau du pied de digue et de l'ouvrage de décharge du pont).

### 10.2.3 Mesures à mettre en œuvre sur le territoire

L'étude de dangers du val d'Orléans préconisait :

- § De maintenir le dispositif d'évacuation du val d'Orléans en cas de crue importante de la Loire. Le plan pourra être modifié du fait que le nouveau pont sur la Loire est une voie possible d'évacuation des riverains (notamment le secteur de Darvoy) ;
- § La réalisation de PCS sur les 18 communes incluses dans le val d'Orléans ;
- § La révision des PPRi sur le périmètre du val d'Orléans à la lumière de résultats de l'étude de dangers ;
- § Une éventuelle révision du Règlement d'Information sur les Crues (RIC) du fait des résultats de l'étude de dangers.

## 10.3 Mesure sur le système d'endiguement

Il n'est pas préconisé sur le secteur de travaux sur le système d'endiguement.

Il faut noter que la réalisation du rideau de Palplanche constitue une mesure de réduction du risque.

## 10.4 Mesure d'amélioration de la connaissance et des méthodes

L'étude de dangers de l'ensemble du val préconise des actions d'amélioration de la connaissance de l'aléa naturel, des ouvrages et de leurs fondations (notamment vis-à-vis du risque d'effondrement karstique).



# 11 ANNEXES

## 11.1 Annexe 1 : Arrêté de classement de la digue du val d'Orléans (source EDD du val d'Orléans)



## 11.2 Annexe 2 : Etudes géotechniques du franchissement de la digue



## 11.3 Annexe 3 : Exemple de convention de superposition d'usage