

Études de dangers des digues domaniales de classe B du département de la Nièvre – Val de Nevers

S7 - Etude des aléas de rupture sur la digue (diagnostic)

V1



HFG23585W

Janvier 2016

Table des matières

1.	Arbres de défaillance simplifiés.....	1
1.1	Arbre de défaillance du scénario de rupture par surverse.....	2
1.2	Arbres de défaillance du scénario de rupture par érosion interne.....	2
1.3	Arbres de défaillance du scénario de rupture par glissement de talus côté val.....	3
1.3.1	Rupture par glissement de talus côté zone protégée.....	3
1.3.2	Rupture par glissement de talus côté cours d'eau.....	4
1.4	Arbres de défaillance du scénario de rupture par érosion externe (affouillement).....	5
1.5	Arbre de défaillance du scénario de rupture par soulèvement hydraulique.....	6
2.	Méthodologie adoptée pour le calcul de l'aléa de rupture de digue ..	7
2.1	Principes généraux et probabilités.....	7
2.1.1	Introduction et objectifs de la méthodologie.....	7
2.1.2	Les probabilités définies dans le modèle.....	8
2.1.2.1	Probabilités d'apparition et de rupture d'un phénomène et Aléa de rupture.....	8
2.1.2.2	Aléa global de rupture.....	9
2.1.2.3	Aléa annuel de rupture.....	9
2.1.2.4	Aléa global annuel de rupture.....	11
2.2	Renseignements des paramètres d'entrée.....	11
2.2.1	Définition des paramètres d'entrée.....	11
2.2.2	Méthodologie de constitution de la base de données.....	13
2.3	Phénomène (scénario) de surverse.....	16
2.3.1	Probabilité d'apparition d'une surverse $P(s_a)$	16
2.3.2	Probabilité de rupture en cas de surverse $P(s_r)$	18
2.3.3	Aléa de rupture par surverse $P(s)$	22
2.3.4	Etude de sensibilité pour la surverse.....	22
2.4	Phénomène (scénario) d'érosion interne.....	26
2.4.1	Probabilité d'apparition d'érosion interne $P(ei_a)$	27

2.4.1.1	Facteurs aggravants ou améliorants et coefficients correcteurs	28
2.4.1.2	Probabilité d'apparition selon les coefficients de Bligh « corrigé »	32
2.4.2	Probabilité de rupture en cas d'érosion interne $P(ei_r)$	34
2.4.3	Aléa de rupture par érosion interne $P(ei)$	35
2.4.4	Etude de sensibilité pour l'érosion interne	35
2.4.4.1	Apparition	35
2.4.4.2	Rupture	38
2.5	Phénomène (scénario) de glissement de talus	38
2.5.1	Probabilité d'apparition de glissement de talus $P(g_a)$	39
2.5.2	Probabilité de rupture en cas de glissement de talus $P(g_r)$	41
2.5.3	Aléa de rupture par glissement de talus $P(g_r)$	42
2.5.4	Etude de sensibilité pour le glissement de talus côté val	42
2.5.4.1	Apparition	42
2.5.4.2	Rupture	43
2.6	Phénomène (scénario) d'érosion externe (affouillement)	44
2.6.1	Probabilité d'apparition d'érosion externe $P(ee_a)$	44
2.6.2	Probabilité de rupture en cas d'érosion externe $P(ee_r)$	46
2.6.3	Aléa de rupture par érosion externe $P(ee)$	47
2.6.4	Etude de sensibilité pour l'érosion externe	47
2.6.4.1	Apparition	47
2.6.4.2	Rupture	48
2.7	Phénomène (scénario) de soulèvement hydraulique	48
2.7.1	Probabilité d'apparition de soulèvement $P(sh_a)$	49
2.7.2	Probabilité de rupture en cas de soulèvement hydraulique $P(sh_r)$	51
2.7.3	Aléa de rupture par soulèvement hydraulique $P(sh)$	51
2.7.4	Etude de sensibilité pour le soulèvement hydraulique	52
2.7.4.1	Apparition	52
2.7.4.2	Rupture	52
3.	Annexes : Cartes de localisation des sondages géotechniques	54

Liste des figures

Figure 1 : Zone représentée par un profil en travers (exemple : P33).....	7
Figure 2 : Description des points topographiques rentrés pour le profil de la digue.....	12
Figure 3 : Exemple de profil en travers type pour le val de Nevers (58)	14
Figure 4: Exemples de profils en travers avec des manques de données importants (profil 27 de la levée de Nevers)	15
Figure 5: Levé LIDAR du profil 122 faussé par les présences du remblai RFF et d'un tertre à Nevers (58)	15
Figure 6 : Logigramme de détermination de la probabilité d'apparition de la surverse.....	18
Figure 7 : Logigramme de détermination de la probabilité de rupture de la surverse	19
Figure 8 : Tableau recensant les valeurs de C1	20
Figure 9 : Tableau recensant les valeurs de C ₂	21
Figure 10 : Tableau recensant les valeurs de C ₃	21
Figure 11 : Tableau recensant les valeurs de C ₄	21
Figure 12 : répartition des profils par classe de probabilité avec ou sans hauteur d'influence.....	23
Figure 13 : Données d'entrée pour le calcul de rupture de la banquettes par érosion interne.....	23
Figure 14 : Résultats aléa de rupture par érosion interne.....	24
Figure 15 : Coefficient lié à la largeur de digue en crête	25
Figure 16 : Coefficient lié à la pente du talus côté val	25
Figure 17 : Schéma de principe pour le calcul du gradient hydraulique de la formule de Bligh	27
Figure 18 : Profil non renforcé sans assise imperméable et sans recharge (F1).....	28
Figure 19 : Profil non renforcé avec assise imperméable et sans recharge (F1).....	29
Figure 20 : Intervalles sur le critère de Bligh par défaut pris en compte pour la probabilité d'apparition de l'érosion interne	33
Figure 21 : Coefficients correcteurs reflétant la présence d'un renforcement en pied côté val.....	34
Figure 22 : Coefficients correcteurs reflétant l'action du gestionnaire en temps de crue	35
Figure 23 : Intervalles de coefficients de Bligh « corrigés » retenus	36
Figure 24 : Coefficients liés aux renforcements en pied côté val.....	38
Figure 25 : Coefficient lié à l'action du gestionnaire	38
Figure 26 : Schéma de principe d'un glissement de talus sur une digue côté val.....	39
Figure 27 : Schéma de principe de la méthode des tranches et forces en jeu.....	40
Figure 28 : Probabilité d'apparition d'un glissement de talus côté val P(ga) en fonction du facteur de sécurité F calculé.....	41
Figure 29 : Probabilité de rupture par glissement côté Loire obtenue par surclassement de la probabilité d'apparition de l'érosion interne.....	42
Figure 30 : Comparaison des méthodes de calcul pour la probabilité événementielle de rupture par glissement de talus côté val	43

Figure 31 : Probabilité de base d'apparition de l'érosion externe (affouillement) en fonction de la largeur du franc-bord.....	45
Figure 32 : Coefficients C_1 symbolisant les éléments s'opposant à l'érosion externe.....	45
Figure 33 : Coefficients C_2 symbolisant les facteurs aggravants de l'érosion externe.....	45
Figure 34 : Probabilité événementielle de rupture par érosion externe obtenue par surclassement de l'aléa de glissement côté Loire.....	46
Figure 35 : Comparaison des méthodes de calcul des probabilités de rupture par érosion externe	48
Figure 36 : Schéma type présentant les variables utilisées dans le calcul du coefficient de sécurité F_h du soulèvement hydraulique.....	49
Figure 37 : Probabilités d'apparition du soulèvement hydraulique en fonction de F_h	50
Figure 38 : Test sur le calcul d'aléa de rupture par soulèvement hydraulique	52

Liste des tableaux

Tableau 1 : Correspondance entre les probabilités qualitative et quantitative - probabilité événementielle	8
Tableau 2 : Probabilités d'occurrence des crues retenues pour le calcul d'aléa de rupture	10
Tableau 3 : Coefficients correcteurs appliqués aux coefficients de Bligh brut	30
Tableau 4 : Coefficients correcteurs au coefficient de Bligh.....	37
Tableau 5 : Caractéristiques physiques par défaut des couches de sols d'assise de la levée	51

1. Arbres de défaillance simplifiés

L'Analyse des Modes de Défaillance et de ses Effets (AMDE) permet de passer de l'analyse fonctionnelle de chacun des profils en travers types de digue étudié (cf. chapitre 3 de l'Etude de dangers) à la détermination des scénarios de défaillance qui lui sont attachés. L'objectif est d'identifier les modes de défaillance des fonctions géotechniques de chaque composant d'un profil en travers type. Les causes et les effets de ces défaillances sont également identifiés dans le but de mettre en évidence des interactions possibles entre éléments, en fonction de l'organisation de ces derniers au sein des profils. Les effets des défaillances des uns sont les causes des défaillances des autres, d'où des enchaînements possibles entre les causes et les effets des défaillances des fonctions géotechniques.

Théoriquement, la démarche d'analyse de risque doit permettre l'identification exhaustive des scénarios de défaillance du système que l'on étudie. Il existe plusieurs méthodes de modélisation de ces scénarios : méthode des arbres de causes, méthode des arbres d'événements, méthode du nœud papillon. Toutefois, l'application de ces méthodes aux systèmes de protection, souvent extrêmement complexes de par leur constitution très hétérogène et leur étendue, est encore mal maîtrisée.

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

Ces modes peuvent se décrire en termes de scénarios de rupture de digues. Plusieurs scénarios de types différents ont été distingués, définis par leur mécanisme élémentaire d'initiation mais mettant le plus souvent en jeu plusieurs mécanismes élémentaires de détérioration :

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

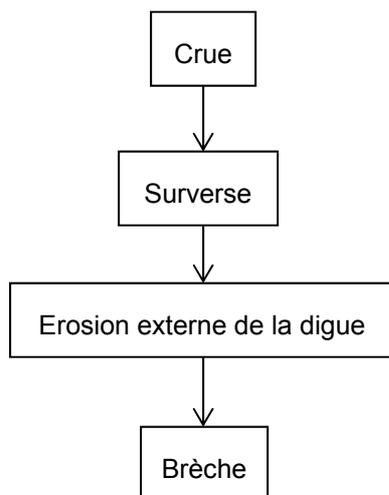
Ces scénarios distinguent d'un côté le mécanisme initiateur du mode de rupture (par exemple la surverse, l'affouillement, le soulèvement hydraulique) et de l'autre le ou les mécanismes physiques responsables de la rupture. Cette distinction est au cœur de la méthodologie du modèle d'aléa de rupture.

Les scénarios de rupture pris en compte sont détaillés ci-dessous sous la forme d'arbres de défaillance simplifiés.

Les 3 profils type fonctionnels des levées de Loire, utilisés dans le cadre des EdD des vals de Tours, Orléans et Authion sont repris ici :

- PT1 : Profil non renforcé
- PT2 : Profil renforcé côté Loire
- PT3 : Profil renforcé côté Val

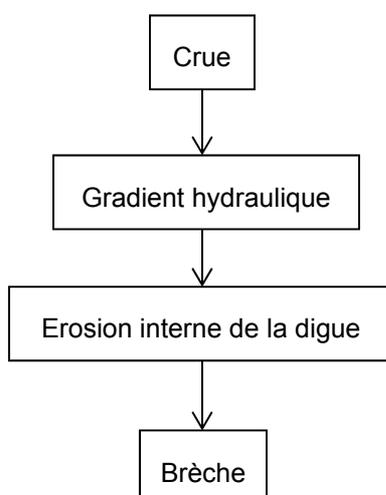
1.1 Arbre de défaillance du scénario de rupture par surverse



Pour les trois profils en travers types :

Fonction	Composants
Résistance à l'érosion externe	Crête de digue Talus côté Val

1.2 Arbres de défaillance du scénario de rupture par érosion interne



Pour les profils en travers types 1 et 3 :

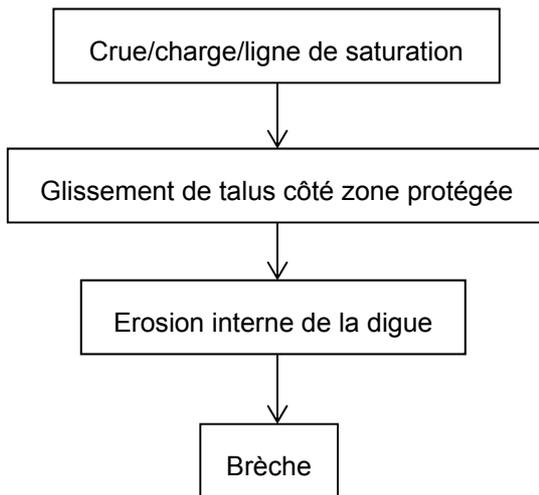
Fonction	Composants
Résistance à l'érosion interne	Tous

Pour le profil en travers type 2 :

Fonctions	Composants
Etanchéité	Organe d'étanchéité (palplanche, recharge amont)
Résistance à l'érosion interne	Tous

1.3 Arbres de défaillance du scénario de rupture par glissement de talus côté val

1.3.1 Rupture par glissement de talus côté zone protégée



Pour le profil en travers type 3 :

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

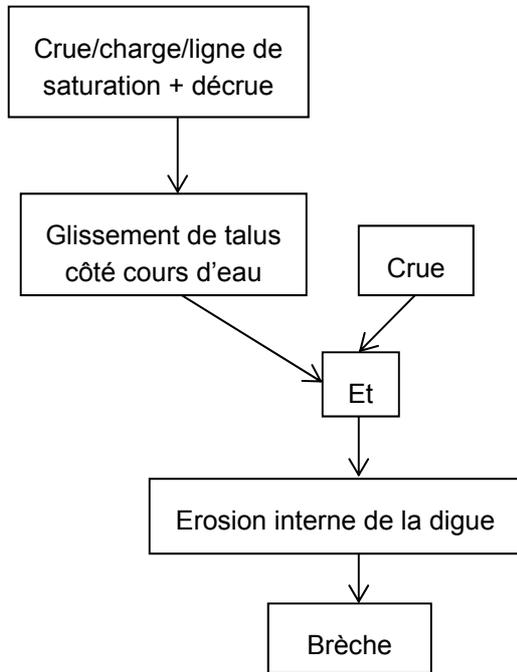
Pour le profil en travers type 2 :

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

Pour le profil en travers type 1 :

Fonctions	Composants
Stabilité	Tous
Résistance à l'érosion interne	Tous

1.3.2 Rupture par glissement de talus côté cours d'eau



Pour le profil en travers type 3 :

Fonctions	Composants
Stabilité	Tous
Résistance à l'érosion interne	Tous

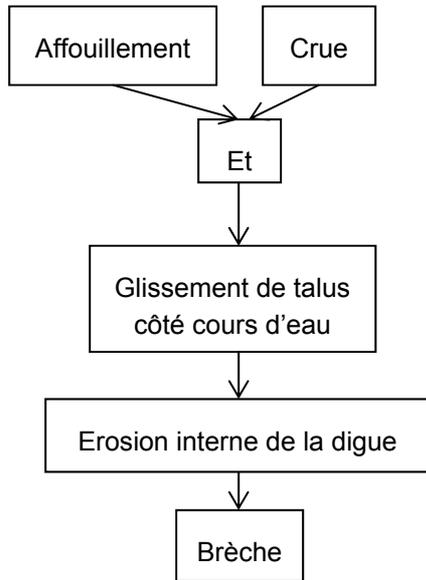
Pour le profil en travers type 2 :

Fonctions	Composants
Stabilité	Tous
Résistance à l'érosion interne	Tous

Pour le profil en travers type 1 :

Stabilité	Tous
Résistance à l'érosion interne	Tous

1.4 Arbres de défaillance du scénario de rupture par érosion externe (affouillement)



Pour le profil en travers type 3 :

Fonctions	Composants
Résistance à l'érosion externe	Renforcement de pied externe
Stabilité	Tous
Résistance à l'érosion interne	Tous

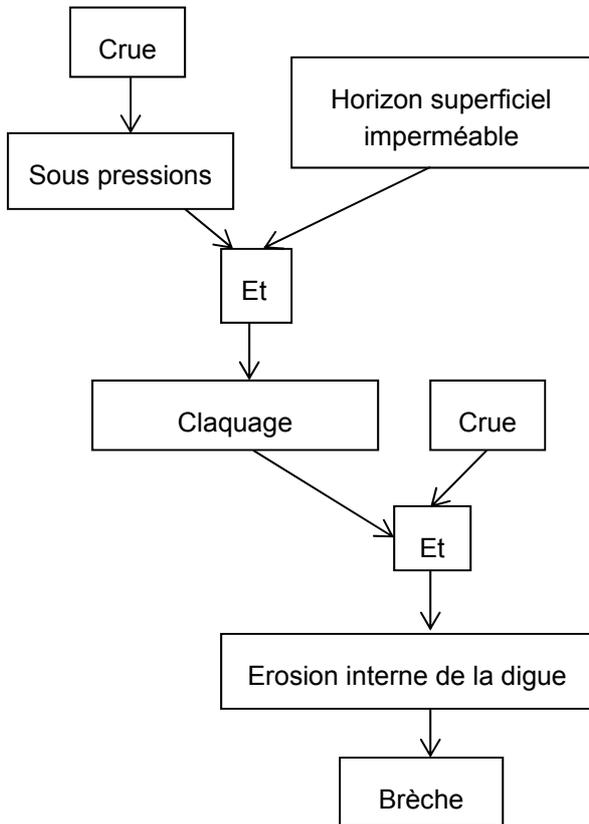
Pour le profil en travers type 2 :

Fonctions	Composants
Résistance à l'érosion externe	Parafouille
Stabilité	Tous
Résistance à l'érosion interne	Tous

Pour le profil en travers type 1 :

Stabilité	Tous
Résistance à l'érosion interne	Tous

1.5 Arbre de défaillance du scénario de rupture par soulèvement hydraulique



Pour le profil en travers type 3 :

Fonctions	Composants
Étanchéité	Horizon superficiel
Résistance à l'érosion interne	Horizon intermédiaire interne

Pour le profil en travers type 2 :

Fonctions	Composants
Étanchéité	Horizon superficiel
Résistance à l'érosion interne	Horizon intermédiaire interne

Pour le profil en travers type 1 :

Étanchéité	Horizon superficiel
Résistance à l'érosion interne	Horizon intermédiaire interne

2. Méthodologie adoptée pour le calcul de l'aléa de rupture de digue

2.1 Principes généraux et probabilités

2.1.1 Introduction et objectifs de la méthodologie

Dans le cadre des études de dangers des digues de la Loire moyenne et de ses affluents, une méthodologie a été mise au point pour l'estimation de la probabilité de rupture d'une digue. Elle fait intervenir les 5 scénarios de rupture décrits dans le paragraphe précédent.

Cette méthodologie est traduite et intégrée dans un programme de calcul appelé « modèle de Calcul de l'Aléa de Rupture de Digue » (CARDigue), développé sous le logiciel Microsoft Office Excel par le Laboratoire Régional de Blois.

La digue est segmentée en tronçons réputés homogènes, rattachés à des profils en travers topographiques espacés de 50 mètres maximum (les profils peuvent être plus rapprochés lorsqu'il existe des hétérogénéités). La méthode recherche la probabilité d'occurrence d'une rupture de digue (brèche) pour chaque profil en travers et dans les conditions hydrauliques des différentes crues.

Pour le système de protection de Nevers cela représente 131 tronçons étudiés (89 pour le système de protection principal et 42 pour le système de protection secondaire). Les profils topographiques de chacun des tronçons sont renseignés et représentent le tronçon sur 25 m en amont et 25 m en aval (lorsque les espaces avec les tronçons amont et aval sont de 50 m). De manière générale ce découpage peut être représenté par la figure située sur la page suivante :



Figure 1 : Zone représentée par un profil en travers (exemple : P33)

Les données nécessaires à l'alimentation du logiciel CARDigue sont de nature très variées (coordonnées X, Y, Z des points « caractéristiques » de chaque profil (voir § 2.2.1), code profil, codification des désordres, des renforcements présents...) et nécessitent un traitement adapté. A titre d'exemple, les anomalies ponctuelles, présentes sur un tronçon et recensées dans le logiciel SIRSDIGUES, sont insérées au niveau du profil en travers le plus proche afin que chaque profil tienne compte de la situation la plus défavorable.

L'utilisation des probabilités nécessite d'affecter à des valeurs qualitatives d'aléas, des valeurs quantitatives de probabilité. Dans le cas des études de dangers du val de Nevers, l'affectation retenue est la suivante :

Aléa	Probabilité qualitative	Probabilité quantitative
Quasi-nul	Quasi-nulle	$0 < P < 0.001$
Négligeable	Peu probable	$0.001 < P < 0.01$
Moyen	Improbable	$0.01 < P < 0.2$
Fort	Forte	$0.2 < P < 0.8$
Très fort	Très forte	$0.8 < P < 0.99$
Certain	Sûre	$0.99 < P < 1$

Tableau 1 : Correspondance entre les probabilités qualitative et quantitative - probabilité événementielle

2.1.2 Les probabilités définies dans le modèle

2.1.2.1 Probabilités d'apparition et de rupture d'un phénomène et Aléa de rupture

Chaque phénomène « n » rappelé ci-dessus est étudié, pour un profil, en considérant séparément :

- La probabilité d'apparition de ce phénomène qu'on notera : $P(n_a)$

Où "n" représente le phénomène et l'indice "a" désigne l'apparition.

- La probabilité de rupture : c'est à dire la probabilité que ce phénomène, une fois apparu (en terme probabiliste : sachant $P(n_a)$) entraîne une rupture de la levée qu'on notera : $P(n_r)$

Où "n" représente le phénomène et l'indice "r" désigne la rupture.

- l'aléa de rupture : la probabilité que ce phénomène "n" entraîne la rupture de la levée pour la situation hydraulique de la crue Q_i s'écrira donc :

$$P(n)_{Q_i} = P(n_a) \times P(n_r) \quad (1)$$

Dans l'étude de dangers nous appelons $P(n)$ « l'aléa de rupture » du phénomène « n » pris alors comme un scénario de rupture. Il est calculé pour une situation hydraulique donnée.

Dans ce qui suit, le phénomène de surverse sera noté "s", celui d'érosion interne "ei", celui d'érosion externe "ee", celui du glissement de talus "g" et celui de soulèvement hydraulique de fondation côté val "sh".

2.1.2.2 Aléa global de rupture

L'aléa global de rupture est l'aléa de rupture tous modes confondus. Il représente, pour une situation hydraulique de la crue Q_i , la probabilité de rupture de la levée pour l'ensemble des phénomènes pris en compte.

Pour l'ensemble des scénarios de rupture qui seront considérés « mathématiquement » comme indépendants et pour une crue donnée, l'aléa global de rupture pourra être calculé de la manière suivante :

- En prenant l'aléa de rupture maximum obtenu pour les scénarios de rupture (surverse, érosion interne ...)

Ou

- En appliquant la formule de Poincaré qui s'exprime de la manière suivante :

$$P(\text{rupture})_{Q_i} = \left[1 - \left((1 - P(s)) * (1 - P(ei)) * (1 - P(ee)) * (1 - P(g)) * (1 - P(sh)) \right) \right] \quad (2)$$

L'aléa global est calculé pour une situation hydraulique donnée.

Remarque :

Il est difficile de dire que les phénomènes ne sont pas dépendants puisqu'un scénario fait souvent appel à plusieurs mécanismes pour se développer et aboutir à la rupture.

Ainsi, les glissements de talus n'étant généralement pas susceptibles d'entraîner directement la rupture de la digue, il nécessite l'action du phénomène d'érosion interne pour aboutir à la rupture. De même l'érosion externe du pied de levée (affouillement) devra mobiliser le glissement de talus côté rivière et donc l'érosion interne pour aboutir à une brèche.

Il a donc été nécessaire d'aborder chaque scénario de rupture dans son ensemble en considérant chacun des mécanismes qui composera ce scénario. C'est ce qui a été fait dans le modèle d'aléa de rupture, comme défini dans les paragraphes suivants.

2.1.2.3 Aléa annuel de rupture

Pour apprécier de façon qualitative les sections les plus « faibles » du système de protection, la détermination de l'aléa annuel de rupture de la digue pour un profil considéré nécessite de déterminer les probabilités d'apparition et de rupture des différents scénarios pour toutes les situations de charge hydraulique affectant la levée.

Classiquement, les situations hydrauliques correspondant à un débit Q_T sont affectées d'une période de retour T qui, par définition, permet de caractériser la probabilité annuelle d'occurrence de la crue, c'est-à-dire la probabilité que ladite crue soit dépassée. Ainsi :

$$P(Q_T) = 1/T \quad (3)$$

Dans le cadre de l'étude de dangers du val de Nevers, 7 situations hydrauliques issues de la modélisation hydraulique bidimensionnelle de la Loire ont été utilisées (cf. étude spécifique S2 sur la modélisation hydraulique). Pour l'étude de dangers du val de Decize, 6 situations hydrauliques sont utilisées (cf. étude spécifique S1) : Q50, Q70, Q100, Q170, Q200 et Q500.

Afin de déterminer des probabilités annuelles de rupture par phénomènes et tous phénomènes de rupture confondus, des intervalles de crue représentés par des crues ponctuelles sont choisis. Le choix retenu pour ces intervalles est présenté dans le tableau ci-dessous :

Crues Q_i considérées	Réprésentative de la crue Q_a à la crue Q_b		Probabilité annuelle qu'une crue comprise entre Q_a et Q_b soit dépassée $P(Q_i) = (1/a)-(1/b)$
Pas de crue	Pas de crue	Q20	0,95
Crue type 2003 (Q30)	Q20	Q40	0,025
Q50	Q40	Q60	0,008333
Q70	Q60	Q90	0,0055556
Q100	Q90	Q150	0,0044444
Q170	Q150	Q190	0,0014035
Q200	Q190	Q300	0,0019298
Q500	Q300	Q750	0,0020000
Q1000	Q750	Qinfini	0,0013333

Tableau 2 : Probabilités d'occurrence des crues retenues pour le calcul d'aléa de rupture

Ainsi, pour un phénomène n donné, la probabilité de rupture sur une année, quelle que soit la crue considérée, est calculée par la formule suivante :

$$P(n)_{an} = \sum_{i=50}^{\infty} P(n) * P(Q_i) \quad (4)$$

Où i représente les périodes de retour des crues considérées avec $P(Q_i)$ telle que définies dans le tableau ci-dessus.

Nous l'avons nommé P_a « Aléa annuel de rupture par le phénomène n ».

2.1.2.4 Aléa global annuel de rupture

Pour calculer l'aléa global annuel de rupture c'est à dire la probabilité annuelle de rupture au droit d'un profil tous modes confondus et pour toutes les crues considérées, nous avons procédé comme pour l'aléa annuel décrit ci-dessus en prenant en compte l'aléa global de chaque crue.

Ainsi, la formule 4 devient :

$$\text{Aléa annuel global} = \sum_{i=50}^{\infty} P(\text{rupture})_{Q_i} * P(Q_i) \quad (5)$$

Où i représente les périodes de retour des crues considérées avec $P(Q_i)$ telle que définies dans le tableau 2 ci-dessus.

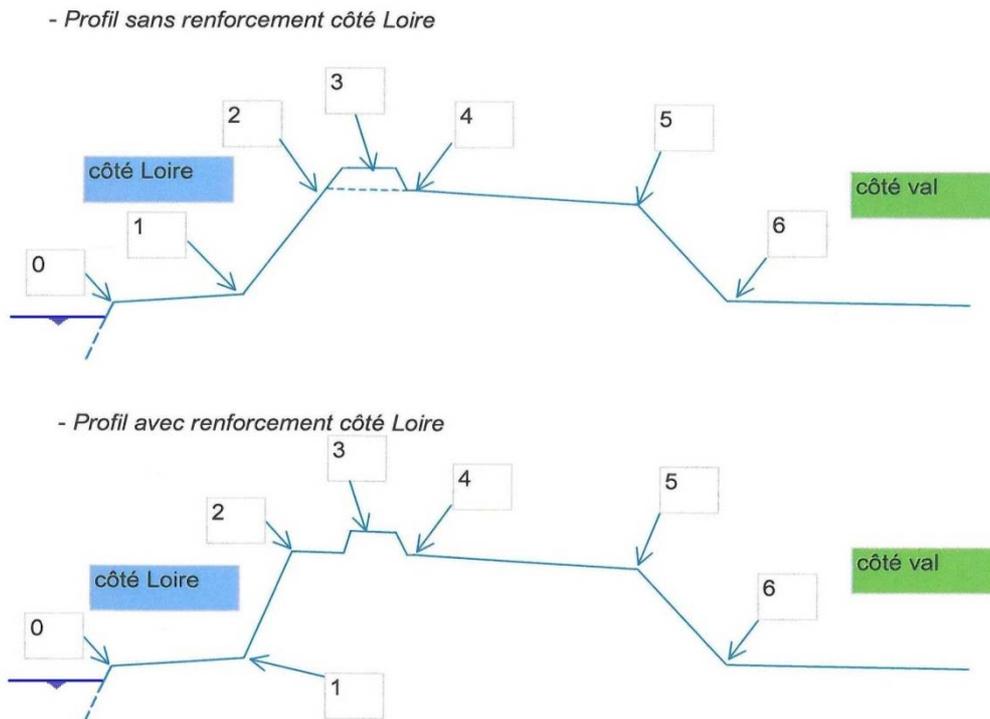
2.2 Renseignements des paramètres d'entrée

2.2.1 Définition des paramètres d'entrée

Les calculs d'aléas de rupture pour les digues domaniales de la Loire du val de Nevers font appel à de nombreux paramètres d'entrée qui sont renseignés dans l'onglet « Données Tronçons ». Ces paramètres d'entrées sont les suivants :

- Des renseignements « administratifs » (point kilométrique, commune, numéro profil...) permettant de repérer rapidement un tronçon de digue particulier.
- Topographie : La méthodologie CARDigue nécessite de renseigner la topographie de chacun des profils en travers de digues étudiés afin de pouvoir déterminer les caractéristiques géométriques de la digue (hauteur, largeur en pied, largeur en crête, pente du talus côté val, largeur du franc-bord). Le logiciel se base ensuite sur ces données pour effectuer des calculs probabilistes. Ces données sont aussi utilisées dans les corrections des probabilités de base.

Le renseignement de la topographie sur CARDigue se fait à l'aide de 7 points caractéristiques (voir figure 2). Pour chacun de ces points il est demandé de rentrer les coordonnées X, Y et Z afin de pouvoir mener les calculs.



- Point 0 : crête de berge
- Point 1 : pied côté Loire
- Point 2 : crête côté Loire
- Point 3 : crête de banquette
- Point 4 : crête de digue (= pied de banquette)
- Point 5 : crête côté val
- Point 6 : pied côté val

Figure 2 : Description des points topographiques rentrés pour le profil de la digue

■ Lignes d'eau pour les crues étudiées :

Pour pouvoir effectuer les calculs pour les crues étudiées, il est nécessaire de renseigner les hauteurs d'eau. Le logiciel CARDigue n'étant qu'un logiciel de calcul de probabilités, il ne permet pas de déterminer ces lignes d'eau.

Ainsi, le modèle hydraulique bidimensionnel de la Loire est utilisé au niveau du val de Nevers pour différentes crues afin de déterminer ces valeurs (modèle construit par ISL et fourni par la DDT58). Le modèle hydraulique 2D est présenté dans l'étude spécifique S2.

- Désordres :

Cette rubrique concerne tous les éléments ponctuels et propres à un profil en particulier qui vont renseigner l'état de la levée. Elle répertorie entre autre la présence d'ouvrages traversant tels que les canalisations et les terriers, la végétation arbustive et ligneuse, les protections apparentes de la digue (mur de soutènement, perré...) et les défauts de celle-ci (déchaussement de pierres, point bas...). Ces désordres sont ensuite utilisés lors du calcul d'aléa de rupture par application de coefficients correcteurs sur une probabilité de base dans les différents scénarios de rupture.

- Action du gestionnaire :

Cette rubrique fait référence à la capacité du gestionnaire à répondre rapidement et efficacement à un possible endommagement de la digue lors d'une crue. Il sera représenté par un facteur correcteur fourni par le gestionnaire dans le scénario de rupture par érosion interne.

- Données géologiques :

Elles font référence à la composition et l'épaisseur des différentes couches de fondations ainsi qu'à leurs propriétés physiques (perméabilité, poids volumique). Ces données sont essentielles dans le calcul d'aléa de rupture de digue par soulèvement hydraulique.

2.2.2 Méthodologie de constitution de la base de données

Pour constituer la base de données qui permettra le calcul de l'aléa de rupture, les différents paramètres d'entrée demandés par le logiciel sont entrés selon diverses méthodes. Celles-ci sont détaillées ci-après par paramètre d'entrée.

- Topographie :

Comme indiqué précédemment, il est nécessaire de renseigner la topographie de chacun des profils en travers dans la base de données (caractéristique géométrique des digues). Pour cela, les données issues du LiDAR fourni par la DDT58 ont été utilisées. Les points ont été traités sous le logiciel DAO AutoCAD (construction d'un modèle numérique de terrain). Une fois les profils en travers construits, une projection 3D via le logiciel COVADIS a permis d'obtenir les coordonnées x, y, z de tous les points puis de tracer les profils en travers (voir figure 2 ci-après).

Les 7 points caractéristiques ont ensuite été identifiés sur les profils en travers créés pour définir la géométrie de la digue.

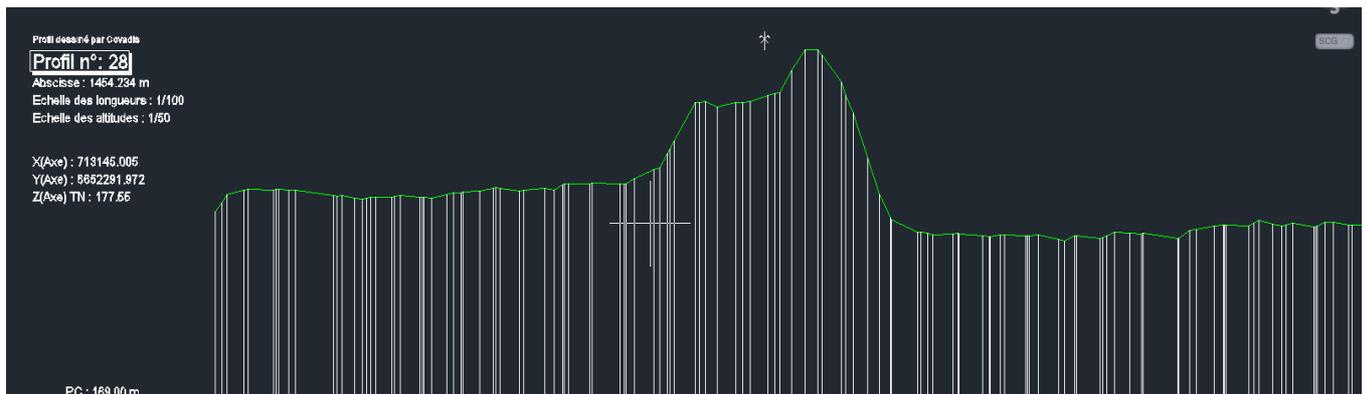


Figure 3 : Exemple de profil en travers type pour le val de Nevers (58)

Les figures ci-dessus sont des exemples de profils pour lequel les 7 points caractéristiques sont nettement identifiables. Ce qui n'est pas le cas pour tous les profils.

Certains profils présentent des « trous » (absence de points dans le LiDAR). Ceux-ci peuvent correspondre à la présence d'une étendue d'eau (étang, ruisseau, bassin) mais aussi à un manque de données dû à la présence d'une végétation importante par exemple. Ces manques de données ne sont pas cruciaux lorsqu'ils ne se situent pas à proximité d'un point caractéristique de définition de la géométrie de la digue. Néanmoins, sur les données LiDAR de Nevers par exemple, le point 3, qui permet de symboliser la présence d'une banquette, est manquant pour de nombreux profils (par exemple profils 29, 30, 16, 14...).

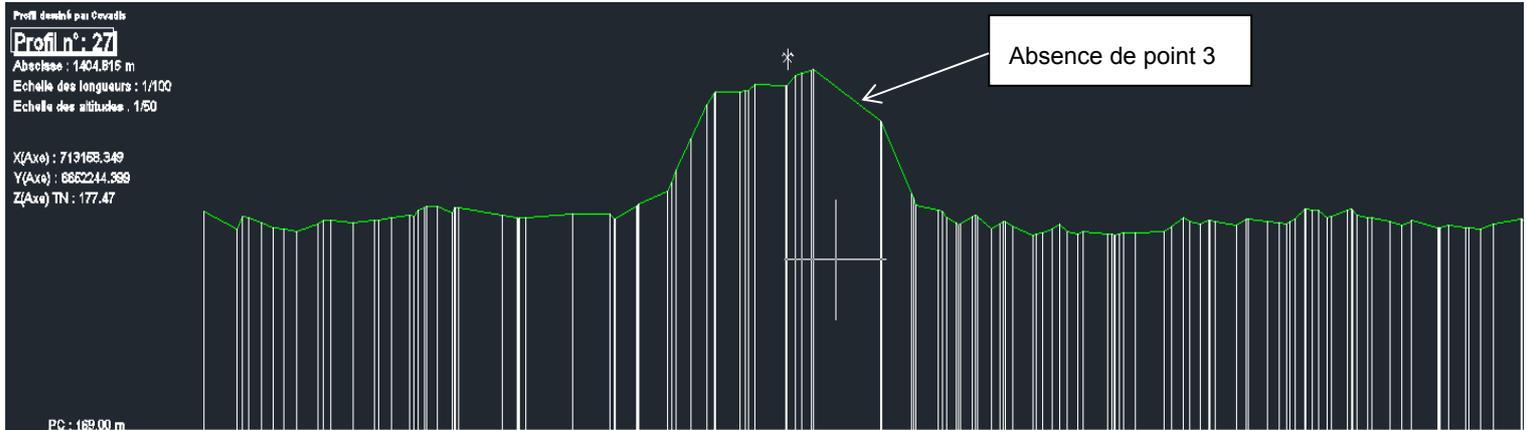


Figure 4: Exemples de profils en travers avec des manques de données importants (profil 27 de la levée de Nevers)

De même, la topographie obtenue par les levés LiDAR est faussée lorsqu'un ouvrage surplombe la digue. En effet, lorsqu'il y a la présence d'un pont par exemple, l'altitude donnée est celle du pont et non celle de la digue.

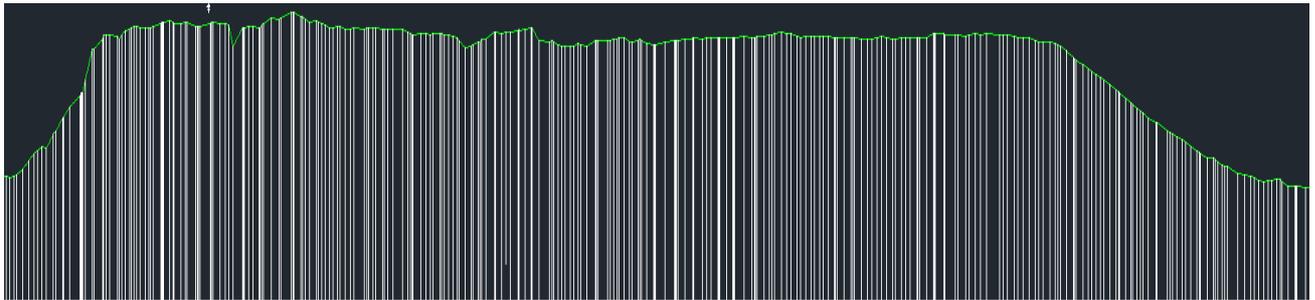


Figure 5: Levé LIDAR du profil 122 faussé par les présences du remblai RFF et d'un tertre à Nevers (58)

Afin de faire figurer tous les points caractéristiques dans la base de données, les données existantes ont été interpolées et croisées avec des données recueillies sur le terrain ainsi qu'avec des données topographiques fournies par la DDT58 (levé topographie plus précis des digues de Nevers).

Il est important que ces données soient le plus exactes possibles puisqu'elles constituent la base de calcul des aléas de rupture des digues.

- Lignes d'eau :

Les lignes d'eau sont issues d'une modélisation hydraulique 2D de la Loire (cf. étude spécifique S2 sur la modélisation hydraulique).

- Désordres :

Ces données sont issues des « Visites Techniques Approfondies » (VTA) menées par EGIS fin 2013. Ces visites de terrain ont permis de répertorier et localiser les éléments déstabilisants (ou stabilisants) de la digue.

Néanmoins, du fait de la végétation présente sur les talus des digues, il n'est pas assuré qu'absolument tous les désordres aient été répertoriés. Des désordres situés dans des zones où l'herbe était relativement haute ou dans des fossés contenant des arbustes imposants ont pu être oubliés.

- Données géologiques :

Ces données ont été obtenues de différentes manières. Tout d'abord, les données déjà répertoriées par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) et la Banque du Sous-Sol ont été utilisées pour avoir une première source de données. Aussi, des données géotechniques et géophysiques obtenues lors d'une précédente étude effectuée par SOGREAH sur ces mêmes levées ont été mises à dispositions par la DDT58.

Cela a permis d'une part de disposer de données permettant de faire un premier test de calcul d'aléas de rupture sous CARDigue, et d'autre part d'avoir une idée grossière des endroits où placer les sondages carottés et les essais au pénétromètre dynamique compris dans la mission géotechnique.

Puis, les résultats des missions géophysiques et géotechniques ont été utilisés pour compléter ces données. Il a été difficile de déterminer les épaisseurs des couches de fondation et notamment celles d'alluvions perméables car les sondages n'étaient souvent pas assez profonds pour atteindre le substratum. Les sondages plus profonds répertoriés par la Banque du Sous-Sol ont toutefois permis de fixer un niveau de substratum marneux utilisé pour la détermination des couches d'alluvions perméables.

2.3 Phénomène (scénario) de surverse

Le phénomène de surverse intervient lorsque le niveau de la Loire en crue dépasse le niveau du sommet de la digue (crête ou banquette). La seule variable suivant les systèmes de protection est le débit pour lequel ce phénomène se produit.

Les coefficients détaillés dans les sous-parties 2.3.1 et 2.3.2 sont les coefficients retenus par la DREAL Centre pour effectuer la modélisation de rupture par surverse pour les levées du val d'Orléans. Ces coefficients sont alors adaptés suite à une étude de sensibilité du modèle (cf. §2.3.3).

2.3.1 Probabilité d'apparition d'une surverse $P(s_a)$

La probabilité d'apparition, pour une crue et un profil donné, est déterminée en comparant le niveau du sommet de la levée et le niveau de la ligne d'eau correspondant au débit de la crue modélisée.

Deux hauteurs caractéristiques sont définies :

- La hauteur de surverse H_s (quand l'eau dépasse le sommet de la digue, hauteur positive sous CARDigue) : différence entre la cote de la ligne d'eau et celle du sommet de la digue ;
- La hauteur de revanche H_r (quand l'eau n'atteint pas le sommet de la digue, hauteur négative sous CARDigue) : différence entre la cote du sommet de la digue et la ligne d'eau.

Le modèle CARDigue utilisé pour cette étude de dangers correspond à sa version 28 dans laquelle il est possible d'introduire plusieurs hauteurs d'influence de banquette. Le calcul sera alors plus précis

puisque la banquette n'a plus une hauteur d'influence unique pour tout le système de protection mais peut être adaptée à chacun des profils. De plus, les calculs sont directement menés depuis le sommet de la digue (crête ou banquette) et non plus en plusieurs étapes comme dans les versions précédentes.

Pour une digue avec banquette en terre simple, aucune surverse ne peut apparaître pour une cote de crue située à moins de 50cm de la cote de crête de digue (probabilité d'apparition nulle).

Une hauteur de sécurité de la revanche, de 50cm permet de tenir compte des incertitudes du modèle hydraulique, des données topographiques et des effets non pris en compte sur la ligne d'eau (vent, embâcle, etc.). Une probabilité d'apparition de surverse est fixée à 0.1 dans ce cas.

Si la hauteur de surverse est comprise dans l'intervalle de la hauteur d'influence de la rehausse (0 à 20cm), alors la probabilité d'apparition de la surverse est de 0.8.

Enfin, lorsque la hauteur de surverse H_s est positive, une apparition certaine de la surverse est prise en compte (critère physique). Dans ce cas, la probabilité d'apparition de surverse a donc été prise égale à 1.

Ces différents cas sont résumés dans le logigramme suivant rentré comme paramètre dans CARDigue.

Deux types de surverse sont possibles dans le cas des digues étudiées :

- Lorsqu'il n'y a pas de banquette, la surverse intervient lorsque le niveau des eaux dépasse le niveau du sommet de la digue. C'est une surverse « réelle ».
- Lorsqu'il y a une banquette, la surverse intervient lorsque le niveau des eaux dépasse la hauteur d'influence de la banquette. Il est considéré qu'à partir d'une certaine charge hydraulique, il y a rupture de la banquette initiée par érosion interne et donc ensuite surverse. C'est une surverse « théorique ». La hauteur d'influence d'une éventuelle rehausse est de 20cm pour une banquette en terre simple, 30 à 80cm pour des murets.

Lorsqu'il y a surverse, l'eau qui passe alors par-dessus la crête de digue, coule dans le val et, en se déversant, érode le talus en entraînant les matériaux constitutifs de la digue. L'érosion s'accélère rapidement avec l'augmentation de la pente du talus érodé jusqu'à aboutir à une rupture totale de la digue. Ce phénomène est freiné par la qualité de l'enherbement du talus et par une faible pente. Au contraire, il est facilité par la concentration ou la perturbation des écoulements sur le talus.

Dans le modèle CARDigue, une digue est sensible à la surverse si elle n'est pas protégée en amont par un système de contrôle des surverses. La probabilité d'apparition de la surverse est influencée par différents paramètres dont la présence d'une rehausse côté Loire (considérée fusible, comme c'est le cas pour les banquettes en terre, ou non) et intègre également une incertitude sur les lignes d'eau et la topographie de la digue (probabilité non nulle si la revanche est comprise entre 0 et 50cm).

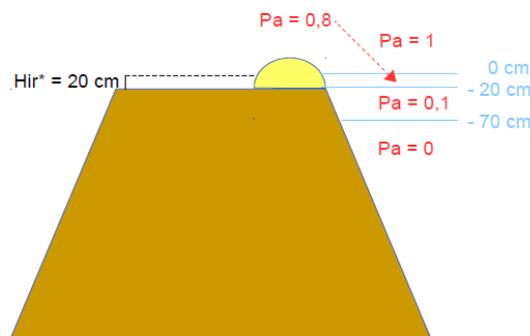
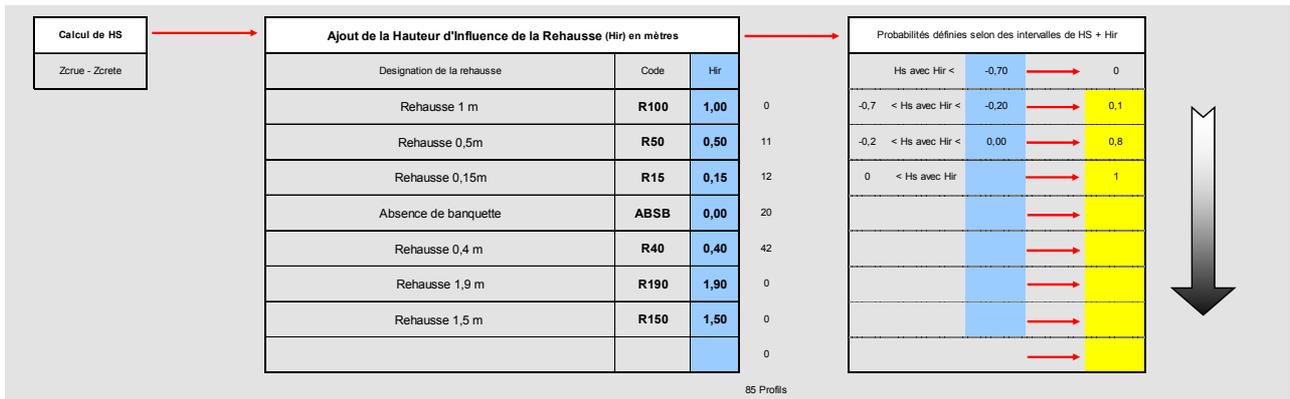


Figure 6 : Logigramme de détermination de la probabilité d'apparition de la surverse

2.3.2 Probabilité de rupture en cas de surverse $P(s_r)$

La probabilité de rupture en cas de surverse $P(S_r)$ dépend d'une part de la hauteur de la lame d'eau surversante et d'autre part de la nature du talus de la digue côté val, de sa pente, de la largeur en crête de la digue et de la présence ou non d'éléments aggravants.

Toutefois, dans cette version de CARDigue, la lame d'eau déversante dépend directement de l'état de la banquette. En effet, il est possible de renseigner la capacité de la banquette à résister ou non à une surverse lors d'une crue. Ainsi, si une banquette est considérée comme n'étant pas résistante à la surverse, la lame d'eau déversante ne sera plus calculée par rapport au sommet de la banquette mais par rapport à la crête. Ceci aura donc pour effet d'augmenter la probabilité de rupture en suivant les paramètres fixés dans la seconde partie du logigramme présenté en figure 7.

Pour la rupture par surverse, il est pris en compte :

- 3 cas où la probabilité brute de rupture est fixe :
 - en cas d'absence de surverse,
 - en cas de présence d'un déversoir,
 - en cas de présence d'une banquette côté val.
- les autres cas où la probabilité brute de rupture peut être modulée par des facteurs aggravants ou stabilisants.

La figure ci-dessous présente le logigramme associé à la probabilité de rupture par surverse.

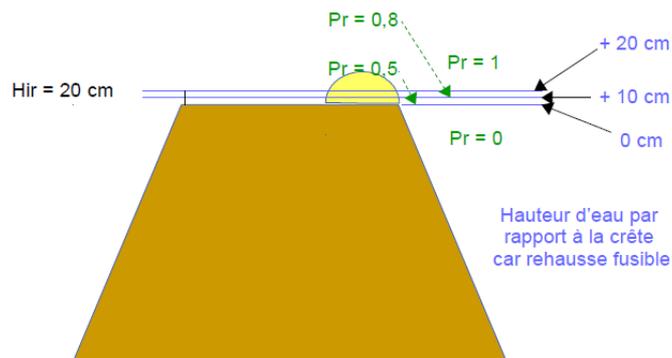
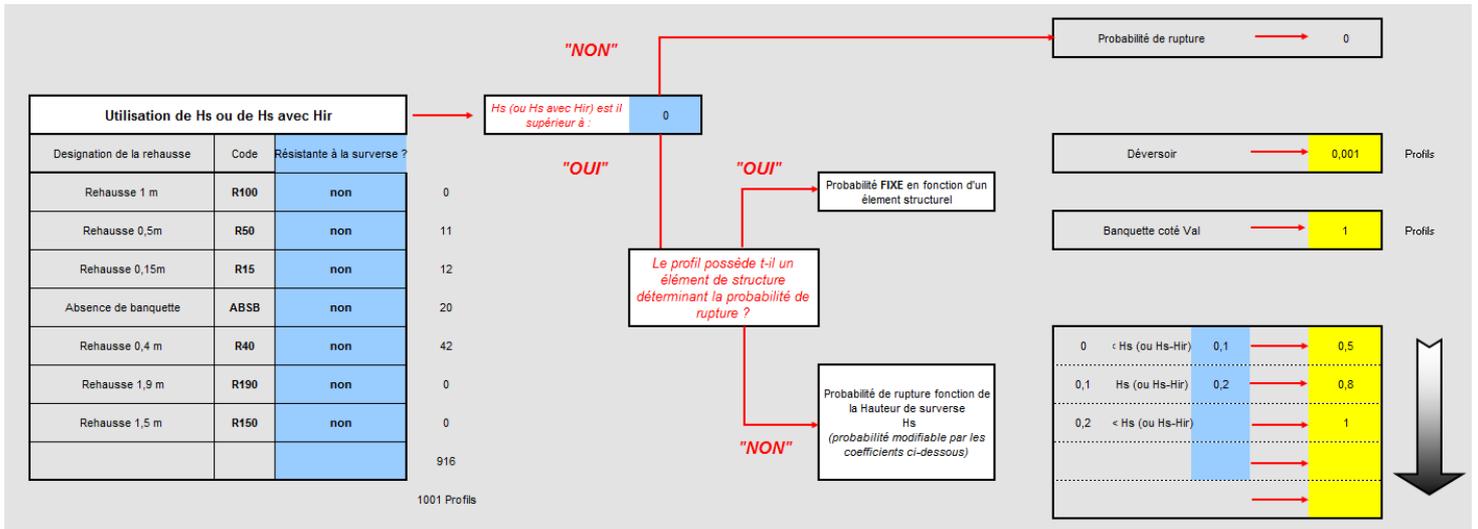


Figure 7 : Logigramme de détermination de la probabilité de rupture de la surverse

Cas de probabilité fixe de rupture par surverse :

Lorsque le niveau de la crue ne dépasse pas le sommet de la digue ($H_s < 0$), la rupture par surverse ne peut pas se produire. Une probabilité nulle est donc retenue.

Remarque : en réalité, il est laissé la possibilité de définir une hauteur de revanche critique en deçà de laquelle la probabilité ne sera plus considérée comme nulle. Cette hauteur est fixée à 0.5m dans le cas des levées du val de Nevers et de Decize et permet de tenir compte des incertitudes liés aux données topographiques, hydrauliques...

La présence d'une banquettes côté val a été considérée comme un facteur aggravant majeur. En effet, si la levée dispose d'une banquettes côté val, les écoulements en cas de surverse sont concentrés dans des barbacanes et cela a pour conséquence l'apparition d'une érosion externe au niveau de l'écoulement qui détruit rapidement la levée. La rupture devient alors inéluctable. Ainsi, la probabilité de rupture en cas de surverse est donc considérée comme certaine et donc $P(S_r)=1$ dans ce cas-là.

De même, en cas de présence d'une zone conçue pour être résistante à la surverse ou de déversoirs, la probabilité de rupture a été considérée comme très improbable avec $P(S_r)=0,001$.

Cas de probabilité modulable de rupture par surverse :

Pour les autres cas, la probabilité brute de rupture par surverse a été déterminée en fonction des classes des hauteurs de surverse suivantes :

Hauteur de surverse	$P_b(S_r)$
$0 < H_s < 0.1 \text{ m}$	0.5
$0.1 < H_s < 0.2 \text{ m}$	0.8
$0.2 \text{ m} < H_s$	1

Il est considéré qu'une surverse d'une lame d'eau déversante de plus de 0,20 mètre ($H_s > 0,20 \text{ m}$) engendre une érosion régressive telle que la brèche est inéluctable à court ou moyen terme. C'est ce qui a été observé lors des crues historiques de la Loire et aucun aménagement sur les levées ne permet de penser qu'il en sera autrement. La probabilité associée à ce cas est donc $P(S_r)=1$.

Facteurs influençant la probabilité de rupture par surverse :

Les facteurs pris en compte sont :

- la largeur en crête de la levée ;
- la pente du talus côté val ;
- la présence d'eau et son épaisseur en pied de talus côté val ;
- la présence d'obstacles à l'écoulement.

La largeur du sommet de la levée joue un rôle important. En effet, plus la levée a une crête étroite, plus l'écoulement déversant a la capacité de prendre une vitesse élevée et inversement. De plus, la levée étant étroite, elle est plus sujette à une érosion rapide jusqu'à l'apparition d'une brèche synonyme de rupture. Il en est tenu compte par l'intermédiaire d'un coefficient C_1 :

Coefficient lié à la largeur de digue en tete (en mètres)				
Intervals de la largeur de digue en mètres	0	< largeur <	20	→ 1
	20	< largeur <	40	→ 0,8
	40	< largeur <	60	→ 0,5
	60	< largeur <	100	→ 0,1
	100	< largeur		→ 0,01

Figure 8 : Tableau recensant les valeurs de C_1

La pente de la levée côté val joue aussi un rôle important puisque, plus elle est importante, plus elle favorise un écoulement déversant rapide et donc un risque d'érosion important et inversement. Il en est tenu compte par le biais d'un coefficient C_2 :

Coefficient lié à la pente du talus coté Val (en degrés)				
Intervalles de la pente du talus en degré	0	< pente <	10	0,5
	10	< pente <	22	0,8
	22	< pente		1

Figure 9 : Tableau recensant les valeurs de C_2

La présence d'eau côté val joue aussi un rôle important car la présence d'un matelas d'eau en pied de levée absorbe l'énergie potentielle due au déversement et limite l'érosion. Il en est tenu compte par le biais d'un coefficient C_3 , fonction de la hauteur du matelas d'eau présent :

Coefficient lié à la présence d'eau coté Val (en mètres)				
Intervalles de hauteur d'eau en mètre	0	< Heau Val <	0,50	0,9
	0,5	< Heau Val <	1,00	0,7
	1	< Heau Val <	2,00	0,5
	2	< Heau Val		0,1

Figure 10 : Tableau recensant les valeurs de C_3

Les obstacles ou défauts sur le talus côté val jouent aussi un rôle dans l'érosion externe. Si la levée est enherbée et bien entretenue mais comprend des obstacles côté val (panneaux, arbustes, etc.), alors la perturbation engendrée par chaque obstacle favorise une érosion externe en aval susceptible de s'aggraver rapidement (ravinement le long de l'obstacle). Le coefficient C_4 permet d'en tenir compte :

Autres facteurs		
Description du facteur	code	coef
Décapage du tapis végétal (ravinelements, passages d'animaux...)	DECAP	1,3
Présence d'obstacle sur le talus Coté Val	OBSV	1,3
Décapage + Obstacle coté Val	DECAP+OBSV	1,5

Figure 11 : Tableau recensant les valeurs de C_4

Dans ces cas, la probabilité de rupture par surverse en cas d'apparition de celle-ci s'écrit :

$$P(S_r) = P_{\text{base}}(S_r) \times C_1 \times C_2 \times C_3 \times C_4 \quad (6)$$

N.B. : Ce mode de calcul peut donner des résultats supérieurs à 1 ; dans ce cas la probabilité est plafonnée à 1.

2.3.3 Aléa de rupture par surverse P(s)

La probabilité que le phénomène de surverse entraîne la rupture de la levée s'écrira :

$$P(s) = P(s_a) \times P(s_r) \quad (7)$$

2.3.4 Etude de sensibilité pour la surverse

Pour chacun des systèmes d'endiguement, une étude de sensibilité du modèle mis en place pour le calcul de l'aléa de rupture par surverse a été menée. Elle a consisté à faire varier les différents paramètres réglables dans l'onglet « Param Surverse » sous CARDigue pour déterminer lesquels sont déterminants et peuvent changer de manière significative les résultats obtenus. Le but est ensuite de pouvoir fixer plus finement ces coefficients.

Le système principal d'endiguement du val de Nevers est particulier puisqu'il possède une banquette, plutôt homogène sur une même levée mais non présente sur chacune des levées composant la ligne de défense principale. Ainsi, la première étude a consisté à regarder l'influence de ces banquettes.

Les calculs comparatifs qui ont été menés sont alors les suivants :

- Calcul avec banquette comparable à ce qui est observé sur le levé LiDAR amélioré :

Ce calcul a montré qu'aucun profil rentré sous CARDigue n'est susceptible d'être sensible au phénomène de surverse (voir figure 12). Il n'est donc pas possible ici de tester les coefficients relatifs au phénomène de surverse.

- Calcul sans prise en compte des banquettes :

Ce second calcul fait apparaître une grosse modification des résultats par rapport au calcul avec prise en compte des banquettes. En effet, près de 34 profils sont maintenant touchés par le phénomène de rupture par surverse pour une crue de temps de retour 500 ans lorsque cette crue intervient (voir figure 12). Ceci n'est pas négligeable, les banquettes peuvent avoir une grande importance et il est donc nécessaire de bien fixer leur hauteur d'influence.

		Surverse							
		50	70	100	170	200	500	1000	--
0	$P \leq 0,001$	85	85	85	84	62	51	0	0
0,001	$< P < 0,01$	0	0	0	0	2	0	0	0
0,01	$< P < 0,05$	0	0	0	1	7	1	0	0
0,05	$< P < 0,2$	0	0	0	0	7	5	0	0
0,2	$< P < 0,8$	0	0	0	0	5	10	0	0
0,8	$< P < 0,99$	0	0	0	0	2	7	0	0
0,99	$< P < 1$	0	0	0	0	0	11	0	0
Situation d'origine avec hauteur influence non nulle									
hauteur influence = 0		85	85	85	84	62	51	0	0
	pas d'évo	pas d'évo	pas d'évo	pas d'évo	pas d'évo	-2 profils	pas d'évo	pas d'évo	pas d'évo
	pas d'évo	pas d'évo	pas d'évo	pas d'évo	-1 profils	2	-1 profils	pas d'évo	pas d'évo
	pas d'évo	pas d'évo	pas d'évo	pas d'évo	pas d'évo	-7 profils	2	-3 profils	pas d'évo
	pas d'évo	pas d'évo	pas d'évo	pas d'évo	+1 profils	10	+1 profils	pas d'évo	pas d'évo
	pas d'évo	pas d'évo	pas d'évo	pas d'évo	pas d'évo	4	+2 profils	8	+1 profils
	pas d'évo	pas d'évo	pas d'évo	pas d'évo	pas d'évo	5	+5 profils	13	+2 profils
	pas d'évo	pas d'évo	pas d'évo	pas d'évo	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo

Figure 12 : répartition des profils par classe de probabilité avec ou sans hauteur d'influence

- Test pour la définition de la hauteur d'influence de la banquette pour la levée de Sermoise 1^{ère} section

Afin de définir au mieux la hauteur d'influence de la banquette pour la levée de Sermoise 1^{ère} section, des tests ont été fait sur le phénomène « érosion interne », correspondant au phénomène prépondérant dans le calcul des probabilités de rupture (hors surverse).

Pour cela, différentes hauteurs de banquettes ont été testées sous CARdigues, en prenant comme géométrie de digue la géométrie de la banquette.

Un coefficient améliorant est attribué au coefficient de Bligh pour le perré côté Loire, perré liaisonné en bon état.

Topo		Géométrie	Hydraulique : côtes de crue				
Z5	Z6	Largeur Digue en pied	Z50	Z70	Z100	Z170	Z200
0,30	0,00	3,40	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30
0,40	0,00	3,40	0,13	0,20	0,27	0,33	0,40
0,50	0,00	3,40	0,17	0,25	0,33	0,42	0,50
0,60	0,00	3,40	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60
0,80	0,00	3,40	0,27	0,40	0,53	0,67	0,80
0,90	0,00	3,40	0,30	0,45	0,60	0,75	0,90
1,00	0,00	3,40	0,33	0,67	0,67	0,83	1,00
1,50	0,00	3,40	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50
1,60	0,00	3,40	0,53	1,07	1,07	1,33	1,60
1,90	0,00	3,40	0,63	0,95	1,27	1,58	1,90

Autres Facteurs améliorants à porter sur Bligh		
Description du facteur	Code	coef
perré L	PERL	1,5

Figure 13 : Données d'entrée pour le calcul de rupture de la banquette par érosion interne

Topo	P(ei-a) x P(ei-r)					Probab annuelles	
	50	70	100	170	200	probab annuelles	%
Z5							
0,30	0,00003	0,00003	0,00003	0,00003	0,00003	0,0000009	0,00009
0,40	0,00003	0,00003	0,00003	0,00003	0,00003	0,0000009	0,00009
0,50	0,00003	0,00003	0,00003	0,00003	0,00003	0,0000009	0,00009
0,60	0,00003	0,00003	0,00003	0,00003	0,00003	0,0000009	0,00009
0,80	0,00003	0,00003	0,00003	0,0003	0,003	7,01053E-06	0,00070105
0,90	0,00003	0,00003	0,00003	0,003	0,006	1,65895E-05	0,00165895
1,00	0,00003	0,0003	0,0003	0,003	0,03	6,56053E-05	0,00656053
1,50	0,003	0,06	0,285	0,297	0,297	0,00264	0,264
1,60	0,003	0,285	0,285	0,297	0,297	0,00389	0,389
1,90	0,03	0,24	0,297	0,297	0,3	0,004149123	0,41491228
							10
							1
							0,5
							0,2
							0,1
							0,01

Figure 14 : Résultats aléa de rupture par érosion interne

Pour une hauteur de banquette inférieure ou égale à 0.9m (les six premiers cas testés), les probabilités évènementielles de rupture par érosion interne sont inférieures à 1% (seuil de négligeabilité fixé) pour toute crue ne dépassant pas la crête de banquette.

On fixe donc la hauteur d'influence de la banquette pour la levée de Sermoise 1^{ère} section à 0,90m.

Ainsi, le niveau de protection de la levée de Sermoise 1^{ère} section est :

- compris entre Q200 et Q500 juste en amont de l'A77 (point bas),
- supérieur à Q1000 en aval de l'A77 sur un linéaire de 300m environ,
- compris entre Q500 et Q1000 sur le restant du linéaire (1250ml au total).

Pour les autres levées du val de Nevers présentant des banquettes (de hauteur maximale 1m), il est retenu une hauteur d'influence de la banquette de 20cm.

Ensuite, il est possible de regarder l'influence des autres paramètres dans le calcul d'aléa de rupture. Pour cela il faut que la surverse intervienne. L'étude a donc été menée sans considérer les banquettes.

■ Largeur de la levée :

Il est difficile de tester seulement l'influence des coefficients liés à la largeur en crête de la digue car celui-ci est associé aux autres coefficients (pente de talus côté val, désordres). Toutefois, le profil 29 sur les levées de Nevers présente la particularité d'avoir une pente forte (donc un coefficient C_2 de 1) et de ne pas posséder de désordre particulier. L'étude a alors consisté à faire varier le coefficient lié à sa catégorie de largeur de digue en crête et regarder l'influence sur la probabilité de rupture par

surverse, l'aléa événementiel de rupture par surverse et l'aléa annuel de rupture par surverse. Le test a été réalisé pour la catégorie de largeur 0-20, car la plupart des profils de digues ont une largeur en crête inférieure à 20m.

Les résultats montrent que ce coefficient peut faire varier du simple au double l'aléa annuel de rupture par surverse. Toutefois cet aléa est relativement faible (de l'ordre de 0.1%) et est couplé aux coefficients C_2 et C_4 . La variation de résultats dus à ce coefficient sera moindre.

Une étude similaire a été menée pour l'intervalle de largeur de digue en crête de 20-40 m ; les résultats sont semblables à ceux obtenus ci-dessus.

Etant donné que la plupart des profils de digues ont une largeur en crête inférieure à 20m, il a été envisagé de diviser la catégorie 0-20m en deux sous-catégories. Cependant, compte tenu de la faible influence de ce coefficient sur l'ensemble des calculs, les catégories initiales sont maintenues.

Ainsi les coefficients liés à la largeur de digue en crête sont les suivants :

Coefficient lié à la largeur de digue en tete (en mètres)				
Intervals de la largeur de digue en mètres	0	< largeur <	20	→ 1
	20	< largeur <	40	→ 0,8
	40	< largeur <	60	→ 0,5
	60	< largeur <	100	→ 0,1
	100	< largeur		→ 0,01

Figure 15 : Coefficient lié à la largeur de digue en crête

■ Pente du talus côté val

La très grande majorité des profils ont une pente de talus côté val supérieure à 10°. Ainsi, les coefficients par défaut affectés à ces profils sont compris entre 0.8 et 1. Il n'est pas très utile de les changer, par contre il peut être utile de diviser les paliers. Toutefois, comme pour le coefficient précédent lié à la largeur en crête de la levée, cette division en sous-catégories a une influence très faible sur les résultats. Les valeurs prises par défaut (c'est-à-dire ceux utilisés par la DREAL Centre pour l'Etude de Dangers des digues de Loire du val d'Orléans) sont donc maintenues pour ce coefficient C_3 .

Coefficient lié à la pente du talus coté Val (en degrés)				
Intervals de la pente du talus en degré	0	< pente <	10	→ 0,5
	10	< pente <	22	→ 0,8
	22	< pente		→ 1
				→ 1

Figure 16 : Coefficient lié à la pente du talus côté val

■ Désordres

Comme pour les autres coefficients directeurs, il est compliqué de ne mesurer que l'influence de la présence d'un obstacle en pied de talus côté val. Toutefois, le profil 23 des levées de Nevers possède une pente de talus forte et une largeur de digue en crête faible ($C_1=C_2=1$) donc il est possible de mesurer l'influence du désordre noté OBSV. Le test a alors consisté à faire varier le coefficient associé. Ce coefficient n'a pas une grande influence sur l'aléa événementiel.

L'étude des crues historiques ont apporté des éléments complémentaires permettant de fixer au mieux le coefficient. En effet, lors de la crue de 1866, il y a eu des infiltrations d'eau à travers la banquettes sur la levée de Sermoise et de l'eau a ruisselé sur la route et le long du talus côté val. Cependant, aux endroits où cela s'est produit la digue n'a pas rompu. Le coefficient ne doit donc pas être trop important, au risque de trop dégradé le profil et s'écarter des conditions réelles. Au-delà de 1.5, les probabilités de rupture sont quasi-certaines. **Nous choisissons donc un coefficient de 1.3 pour un désordre seul.**

Pour la combinaison des deux désordres DECAP + OBSV, le coefficient doit être supérieur à 1.3. Il a été remarqué que prendre ce coefficient supérieur ou égal à 1.5 n'a plus d'influence. Il a donc été choisi de garder le **coefficient par défaut de 1.5.**

■ Eau côté val :

Un coefficient a été fixé pour tenir compte de l'eau potentiellement présente dans le val. Ici, il n'y a pas d'inondations par remous et donc pas d'eau dans le val. Aucune étude de sensibilité n'a donc été effectuée sur ce paramètre.

2.4 Phénomène (scénario) d'érosion interne

Dans l'usage courant, le terme érosion interne est utilisé pour parler d'un phénomène de détachement et migration de particules d'un sol sous l'effet d'un écoulement qui se produit à l'intérieur d'un massif de sol.

Pour une digue, le phénomène d'érosion interne intervient lorsque l'eau est capable de traverser le squelette granulaire constituant la digue ou sa fondation avec suffisamment de vitesse pour que l'énergie ainsi créée permette d'entraîner ou d'arracher certaines particules constitutives du sol traversé.

La sensibilité des sols à l'érosion interne dépend de nombreux facteurs comme la plasticité de ce sol, la distribution de ses particules, sa cohésion...

Ainsi, il est défini 4 mécanismes possibles d'initiation de l'érosion interne :

- L'érosion interne de conduit qui se produit dans les fissures des sols généralement plastiques (à dominante argileuse), mais parfois dans les sols fins non saturés du fait d'écoulements concentrés ;
- L'érosion régressive qui se produit dans les sols non plastiques lorsque le gradient hydraulique en pied de digue côté val est suffisant pour entraîner les particules du sol à travers un conduit qui se forme de l'aval vers l'amont de la digue. Cette érosion a lieu principalement dans la fondation de l'ouvrage mais peut se produire dans l'ouvrage ;

- L'érosion de contact qui se produit à l'interface de deux sols de nature granulométrique différente. Les écoulements dans les sols plus grossiers et parallèles à l'interface, entraînent les plus petites particules du sol le plus fin ;
- La suffusion qui est l'entraînement des particules fines d'un sol à travers son squelette granulaire plus grossier sous l'effet d'un écoulement interne. Il peut se produire dans les sols granulaires non plastiques et mal gradués.

Pour une digue de protection contre les inondations, la suffusion et l'érosion de contact conduisent très rarement à la rupture d'un ouvrage. Elles produisent à long terme des tassements qui seront alors détectés par les services gestionnaires.

L'érosion de conduit se développe à la faveur de fractures dans les sols argileux ou de conduits existants comme ceux réalisés par les animaux fouisseurs, par la végétation au niveau des racines ou encore du fait d'ouvrages traversant présents dans la digue (canalisations, conduites...). La présence de ces facteurs aggravant a été prise en compte dans le modèle mais l'érosion de conduit n'a pas été étudiée en tant que telle car il n'y a pas à ce jour de méthode simple pour caractériser cette érosion.

Dans le cadre des études de dangers du val de Nevers, l'érosion interne prise en compte dans le modèle est l'érosion régressive se produisant à la base des levées. Ce phénomène est également communément appelé "renard hydraulique". L'érosion interne est directement liée à la capacité qu'aura l'eau pendant la crue de traverser la digue et d'entraîner les matériaux.

La probabilité d'apparition d'une érosion régressive est fonction du gradient hydraulique présent en pied côté val. Elle sera donc liée à la charge hydraulique amont, à la forme de la digue (largeur en pied) et aux caractéristiques des matériaux qui la composent. Cependant il n'a pas été tenu compte du temps d'exposition de la digue à la crue et donc aucun coefficient correcteur n'a été rentré pour représenter ce temps-là.

La probabilité de rupture quant à elle est liée à la capacité qu'a l'infiltration de produire un renard hydraulique puis de créer une brèche. S'agissant d'un mécanisme progressif, il a été tenu compte du système de surveillance et d'intervention existant en cas de crue.

Les coefficients détaillés dans les sous-parties 2.4.1 et 2.4.2 sont les coefficients retenus par la DREAL Centre pour effectuer la modélisation de rupture par érosion interne pour les levées du val d'Orléans. Seuls les intervalles de coefficient de Bligh ont été modifiés pour apporter plus de précision. Ces coefficients sont alors adaptés suite à une étude de sensibilité du modèle (cf. §2.4.3).

2.4.1 Probabilité d'apparition d'érosion interne $P(e_{ia})$

Le phénomène d'érosion interne implique la circulation d'eau à l'intérieur du corps de la digue ou dans sa fondation. Cette circulation d'eau est générée par la différence de potentiel hydraulique entre les deux côtés de la digue.



Figure 17 : Schéma de principe pour le calcul du gradient hydraulique de la formule de Bligh

La méthode utilisée pour déterminer la probabilité d'apparition du phénomène d'érosion interne est une adaptation de la méthode de Bligh basée sur le calcul d'un gradient moyen i , ratio de la perte de charge hydraulique H (différence entre le niveau d'eau côté amont et celui côté aval) de la digue avec la largeur L de celle-ci à sa base (Voir figure 11).

$$i = \frac{\Delta H}{L} \quad (8)$$

$$c = \frac{1}{i} = \frac{L}{\Delta H} \quad (9)$$

Cette méthode très simpliste permet de déterminer **un coefficient de Bligh brut « c »** à l'aide de la formule (9) en se basant sur les données géométriques de la digue obtenues d'après le levé topographique LiDAR réalisé en 2009 (Loire Bourguignonne) et étudié en détail, et sur les lignes d'eau des modélisations hydrauliques 2D. **Ce coefficient de Bligh est ensuite corrigé par des coefficients correcteurs** prenant en compte le profil type de la levée (cinq profils type ont été définis) et les singularités présentes dans la digue (maisons encastrées, terriers, végétation ligneuse et arbustive, canalisation, écran étanche) : on obtient le **critère de Bligh « corrigé »**.

2.4.1.1 Facteurs aggravants ou améliorants et coefficients correcteurs

Les coefficients correcteurs ont été déterminés par une méthode de comparaison des structures de la digue mise au point pour l'étude de dangers de la levée d'Orléans réalisée par la DREAL Centre en 2013. Elle est basée sur la loi de Darcy.

Les levées du val de Nevers, Sermoise et Challuy comptent 2 profils en travers types, présentés ci-dessous. Ils sont issus des constatations faites lors des études géotechniques menées sur les digues de Loire du val de Nevers.

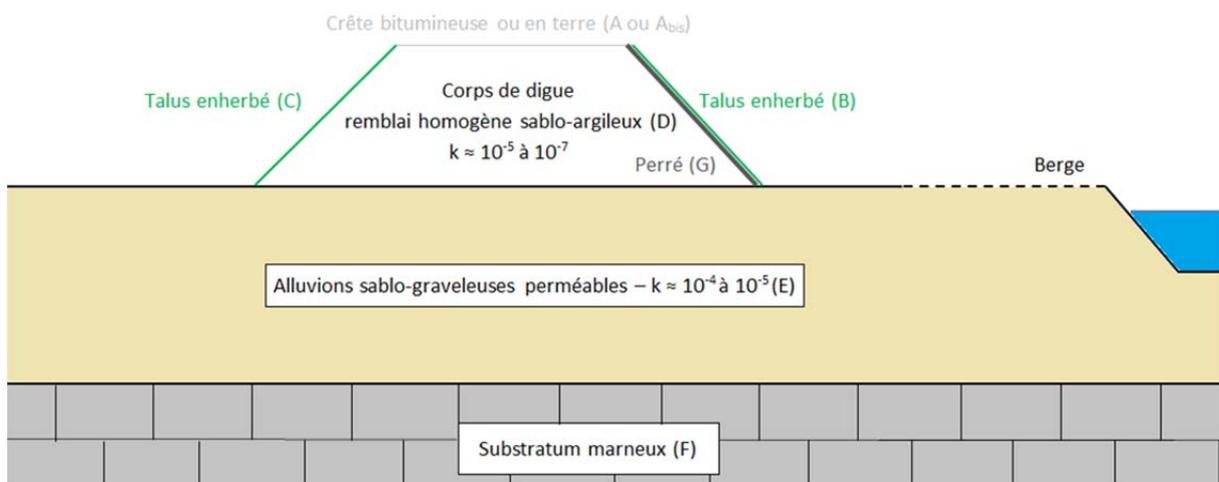


Figure 18 : Profil non renforcé sans assise imperméable et sans recharge (F1)

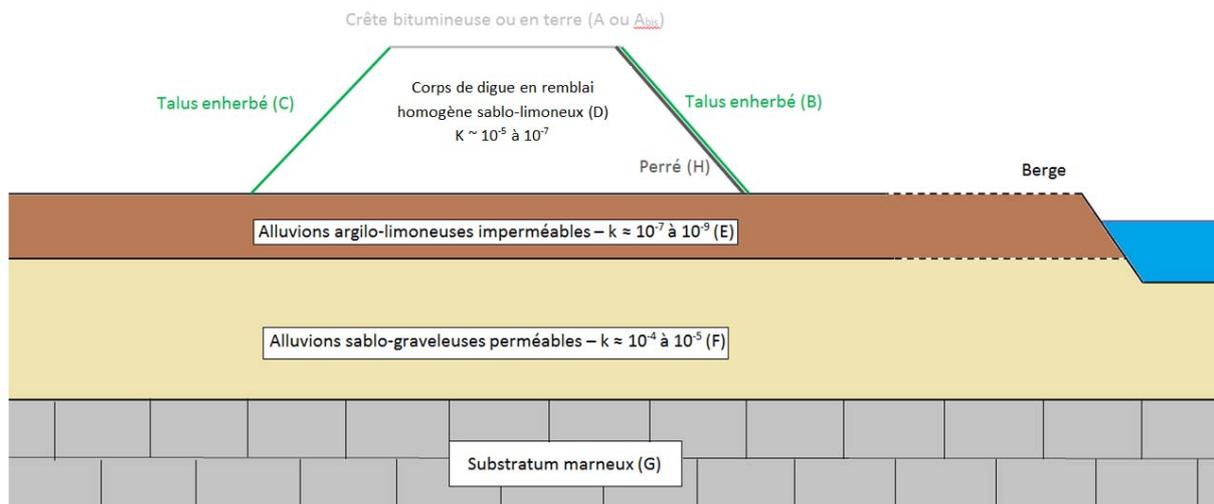


Figure 19 : Profil non renforcé avec assise imperméable et sans recharge (F1)

L'appartenance à l'un des 2 profils type présentés ci-dessus est une donnée fournie directement par le gestionnaire ou issue de l'analyse des données de recensement sur les confortements des digues de Loire et des données topographiques (LiDAR).

La présence « d'anomalies » listées dans la figure ci-dessous est issue des constats faits dans le cadre des Visites Techniques Approfondies (VTA), de l'exploitation des résultats des campagnes géophysiques et géotechniques (pour la présence ou non de couche d'assise imperméable et son épaisseur) et des données sur les renforcements.

Tableau 3 : Coefficients correcteurs appliqués aux coefficients de Bligh brut

Coefficients (multiplication) de Bligh dus au type de profil						
			Digue non renforcée	Digue renforcée coté Loire	Digue renforcée coté Val	
Facteurs modifiant le critère de Bligh		Code	F 1	F 2	F 3	
Anomalies	Profil de base	F	1	1	1	
	Présence de Maison encastrée Cote Val	BatV	0,95	0,95	1	
	Présence de Maison encastrée Coté Loire	BatL	0,95	1	0,95	
	Présence de Maison encastrée des deux cotés	Bat2	0,9	1	1	
	Présence de canalisation en position haute	CanH	0,69	0,67	0,73	
	Présence de canalisation en position moyenne	CanM	0,31	0,36	0,4	
	Présence de canalisation en position basse	CanB	0,19	0,27	0,19	
	Présence de terriers non traversants en position haute	TerH	0,95	0,95	0,95	
	Présence de terriers non traversants en position moyenne	TerM	0,95	0,95	0,95	
	Présence de terriers non traversants en position basse	TerB	0,71	0,94	0,86	
	Présence de terriers traversants	TT	0	0	0	
	Végétation ligneuse isolée	VLI	0,95	0,95	0,95	
	Végétation ligneuse clairsemée	VLC	0,68	0,9	0,89	
	Végétation ligneuse généralisée	VLG	0,34	0,6	0,65	
	Présence d'horizon argilo-limoneux en couche d'assise de la digue	AbsLimor	0,56	0,8	0,78	
	Paroi étanche	PET	10000	10000	10000	

Les cas particuliers sont calculés par multiplication du coefficient de « Bligh brut » lié à chaque profil type par un coefficient correcteur. Ces coefficients sont inférieurs à 1 s'il s'agit d'une anomalie et supérieurs à 1 s'il s'agit d'une amélioration vis à vis de l'apparition de l'érosion interne.

Précision sur les canalisations :

Les canalisations traversant la levée sont des ouvrages déstabilisants. En effet, la discontinuité de matériau à l'interface entre la canalisation et le remblai de la levée peut créer des chemins préférentiels d'écoulement et ainsi favoriser l'érosion interne.

La présence de canalisation traversante sur un tronçon est issue du recensement VTA, de l'étude spécifique S5 sur les ouvrages inclus et s'il existe, d'un repérage X, Y et Z (relevé topographique GPS) de ces canalisations. Si le relevé en altimétrie est absent, un choix sur la position (haute, moyenne ou basse) de la canalisation dans la digue est à faire par l'opérateur. Il y a 3 choix disponibles :

- position haute : 1 m sous la crête de digue
- position moyenne : à mi-hauteur de la digue
- position basse : au niveau du pied de digue

Dans la méthodologie, la présence d'une canalisation n'a d'influence qu'à partir d'une certaine charge hydraulique au-dessus de la canalisation. Pour les levées du val de Nevers, il a été retenu 0,5 m.

Précision sur les types de végétations :

La présence, sur la levée, de végétation ligneuse (arbres), actuelle ou ancienne (notamment dans la deuxième moitié du XXe siècle), est intégrée par le biais d'un coefficient correcteur aggravant. Cette situation implique l'existence de racines dans le corps de la digue et/ou dans sa fondation, capables de créer un réseau ramifié de micro/macro canalisations susceptibles de provoquer l'initiation de l'érosion interne.

Trois types de végétation ligneuse ont été considérés :

- végétation isolée ;
- végétation clairsemée ;
- végétation généralisée.

Précisions sur les terriers d'animaux fouisseurs :

Les terriers agissent de la même façon que les canalisations en créant des chemins préférentiels d'écoulement favorisant l'érosion interne de la levée.

La présence de terrier d'animaux fouisseurs dans la digue est intégrée aux calculs en prenant deux cas de figure :

- La présence de terriers non traversant d'animaux fouisseurs considérés de petite dimension (terrier de lapin par exemple) est prise en compte par réduction de la formule de Bligh de 10 à 30% en fonction du type de levée.
- La présence de terriers d'animaux traversant la levée est considérée comme une situation entraînant immédiatement une infiltration au travers de la digue et une apparition inéluctable dès que le niveau de la Loire atteint le niveau du terrier.

Comme pour les canalisations, une position haute, moyenne ou basse est à renseigner pour les terriers.

Autres précisions :

La présence de maison ou de bâtiment encastré dans la levée est intégrée dans le calcul en considérant que la digue s'interrompt à l'aplomb de la façade du bâtiment et correspond à un coefficient correcteur compris entre 0.8 et 1 suivant le profil de la levée.

Ainsi un coefficient général C_1 qui est la combinaison de tous les désordres énoncé ci-dessus est défini.

2.4.1.2 Probabilité d'apparition selon les coefficients de Bligh « corrigé »

Les probabilités d'apparition de l'érosion interne sont définies par intervalles du critère de Bligh. L'attribution des probabilités résulte d'une étude paramétrique effectuée par la DREAL et analysée dans le cadre de cette étude de dangers.

L'étude paramétrique présente les échelles de Bligh du val d'Orléans, puis celle d'Authion et enfin des échelles pessimiste, optimiste et médiane construites à partir de l'échelle d'Authion. Cette étude permet de définir une nouvelle étendue des coefficients de Bligh, selon 2 objectifs principaux :

1. Ramener le seuil de négligeabilité de 15% à 1% ;
2. Définir une zone de pivot centrée sur le coefficient de Bligh des digues du XIXème siècle (de 4-5). La défaillance principale de ces digues était la surverse, néanmoins des infiltrations étaient notables mais plus difficilement quantifiables. La probabilité d'apparition de l'érosion interne est donc proche de 1 (0,8 environ).

En ce qui concerne les levées du val de Nevers, l'échelle de Bligh se rapproche davantage de celle proposée pour le val d'Authion. Ceci prend compte des nouveaux objectifs cités ci-dessus et de la nature des matériaux constituant une grande partie des digues (sable argileux) et leur fondation (argile et sable).

L'échelle de probabilité retenue permettant d'établir les probabilités d'apparition du phénomène d'érosion interne est la suivante :

Probabilités d'apparition définies selon des intervalles de valeurs du critère de Bligh $c=L/\Delta H$			
Intervalles du critère de Bligh			Proba
l'eau n'atteint pas la cote du pied de digue coté Val			0
0	< Bligh <	2	1
2	< Bligh <	3	0,99
3	< Bligh <	3,5	0,95
3,5	< Bligh <	4	0,8
4	< Bligh <	4,5	0,5
4,5	< Bligh <	5	0,2
5	< Bligh <	5,5	0,1
5,5	< Bligh <	6	0,02
6	< Bligh <	7	0,01
7	< Bligh <	8	0,001
8	< Bligh		0,0001

Figure 20 : Intervalles sur le critère de Bligh par défaut pris en compte pour la probabilité d'apparition de l'érosion interne

Pour pouvoir déterminer la probabilité d'apparition d'érosion interne $P(ei_a)$ il faut d'abord déterminer le coefficient de Bligh « corrigé ». Ceci est fait de la manière suivante :

$$c_{\text{corrigé}} = c_{\text{brut}} * F_j * \prod_{\text{désordres},j} C_{\text{désordres},j} \quad \text{où } j \in [1;3] \quad (10)$$

Combinaison des coefficients correcteurs associés à chaque désordre

Où F_j représente le coefficient de base pour chaque profil type sous CARDigue (il vaut 1).

Ensuite la probabilité d'apparition d'érosion interne est déterminée à partir du tableau situé en figure 20 avec le coefficient de Bligh « corrigé ».

2.4.2 Probabilité de rupture en cas d'érosion interne $P(e_i)$

Dans la version V28 de CARDigue, la probabilité de rupture en cas d'apparition du phénomène d'érosion interne est prise par défaut égale à 1. Cela signifie que pour le profil de base, à partir du moment où le phénomène apparaît, la rupture est jugée certaine par défaut.

Cependant, la probabilité de rupture en cas d'apparition d'érosion interne peut être influencée par :

- la présence de renforcements en pied côté val (dispositifs de drainage, perré, mur de soutènement) ;
- la capacité d'intervention du gestionnaire pour stopper le phénomène pendant la durée de la crue à l'aide de moyens adaptés ;
- la présence de terriers ou de canalisations traversant.

Des coefficients réducteurs sont alors utilisés pour tenir compte des éléments de structures de l'ouvrage et des actions qui peuvent être menées par le gestionnaire en cas de crue. Les éléments pris en compte sont listés ci-après.

Structure de la levée (coefficient C_1) :

Renforcements en pied côté Val (facteur)		
Type de renforcement	Code	coef
Tapis drainant	TADR	0,1
Fossé d'évacuation	EVAC	0,5
Mur de soutènement	MURV	0,3

Figure 21 : Coefficients correcteurs reflétant la présence d'un renforcement en pied côté val

L'identification de ces éléments structurels de l'ouvrage est fournie par le gestionnaire, issue des données sur les renforcements des digues de Loire ou tirée des appréciations VTA. Des renforcements supplémentaires (perré, perré dégradé) ont été ajoutés afin de mieux correspondre à ce qui est présent pour les levées du val de Nevers.

Gestion de l'ouvrage en crue (coefficient C_2) :

Action du gestionnaire en épisode de Crue (facteur)		
Action du gestionnaire	Code	coef
Absence de surveillance et/ou organisation non adaptée	ASONA	1
Surveillance mais organisation non adaptée	SONA	0,9
Surveillance et Organisation Adaptée	SOA	0,5
Surveillance et Organisation Adaptée et Renforcée	SOAR	0,1

Figure 22 : Coefficients correcteurs reflétant l'action du gestionnaire en temps de crue

Ces coefficients sont fournis par le gestionnaire.

Présence d'ouvrages traversant (coefficient C_3) :

La présence d'un défaut localisé tel que les canalisations ou les terriers d'animaux fouisseurs traversant est prise en compte par l'adjonction d'un coefficient C_3 qui a été pris égal à 1.

La probabilité de rupture $P(ei_r)$ de la digue par érosion interne est obtenue par la formule suivante :

$$P(ei_r) = 1 \times C_1 \times C_2 \times C_3 \quad (10)$$

2.4.3 Aléa de rupture par érosion interne $P(ei)$

La probabilité que l'érosion interne entraîne la rupture la levée s'écrit :

$$P(ei) = P(ei_a) \times P(ei_r) \quad (11)$$

2.4.4 Etude de sensibilité pour l'érosion interne

Aucune étude de sensibilité n'a été menée sur ce phénomène. Les coefficients sont fixés suite aux résultats de l'étude paramétrique réalisée par la DREAL Centre (cf. chapitre 2.4.1.2).

2.4.4.1 Apparition

Il est essentiel de déterminer avec précisions les paramètres servant de base de calcul. Cette base de calcul s'articule autour du coefficient de Bligh. A chaque intervalle de coefficient de Bligh est attribuée une valeur de probabilité fixe (s'il est utilisé la méthode par intervalles). Il est essentiel de bien fixer ces intervalles et ces probabilités pour avoir un calcul cohérent par la suite.

Pour les raisons expliquées précédemment (2.4.1.2), les intervalles de Bligh sont fixés de la manière suivante :

Probabilités d'apparition définies selon des intervalles de valeurs du critère de Bligh $c=L/\Delta H$			
Intervalles du critère de Bligh			Proba
l'eau n'atteint pas la cote du pied de digue coté Val			0
0	< Bligh <	2	→ 1
2	< Bligh <	3	→ 0,99
3	< Bligh <	3,5	→ 0,95
3,5	< Bligh <	4	→ 0,8
4	< Bligh <	4,5	→ 0,5
4,5	< Bligh <	5	→ 0,2
5	< Bligh <	5,5	→ 0,1
5,5	< Bligh <	6	→ 0,02
6	< Bligh <	7	→ 0,01
7	< Bligh <	8	→ 0,001
8	< Bligh		→ 0,0001
			→

Figure 23 : Intervalles de coefficients de Bligh « corrigés » retenus

Concernant les nombreux coefficients correcteurs relatant des désordres présents sur les digues, une évolution existe entre les coefficients initiaux utilisés pour l'EdD du val d'Orléans et les coefficients utilisés pour l'EdD du val d'Authion. Les résultats se montrent moins pessimistes pour les désordres liés à la végétation et un peu moins pessimistes en ce qui concerne les canalisations et les terriers.

Sur les levées du val de Nevers, les éléments suivants sont à prendre en compte pour la définition des coefficients correcteurs :

- La végétation est présente sur de nombreux profils, principalement sous forme d'alignements en crête de digue.

- Les coefficients associés aux canalisations (en position moyenne ou basse notamment) sont très faibles. Ainsi, lorsqu'une canalisation est présente, cela revient presque à considérer que l'apparition d'érosion interne est inévitable. Ce coefficient prend l'ascendant sur les autres en cas de combinaison de plusieurs désordres.
- Les coefficients liés aux terriers restent relativement proches de la valeur 1 pour les levées du val de Nevers, qui comptent un nombre réduit de terriers, souvent isolés. Les terriers non observables compte tenu d'une végétation ligneuse généralisée seront pris en compte par son coefficient dégradant.

Les points cités ci-dessus couplés aux calculs effectués par la DREAL permettent de fixer les coefficients correcteurs suivants :

Tableau 4 : Coefficients correcteurs au coefficient de Bligh

Coefficients (multiplication) de Bligh dus au type de profil						
			Digue non renforcée	Digue renforcée coté Loire	Digue renforcée coté Val	
Facteurs modifiant le critère de Bligh		Code	F 1	F 2	F 3	
Anomalies	Profil de base	F	1	1	1	
	Présence de Maison encastrée Cote Val	BatV	0,95	0,95	1	
	Présence de Maison encastrée Coté Loire	BatL	0,95	1	0,95	
	Présence de Maison encastrée des deux cotés	Bat2	0,9	1	1	
	Présence de canalisation en position haute	CanH	0,69	0,67	0,73	
	Présence de canalisation en position moyenne	CanM	0,31	0,36	0,4	
	Présence de canalisation en position basse	CanB	0,19	0,27	0,19	
	Présence de terriers non traversants en position haute	TerH	0,95	0,95	0,95	
	Présence de terriers non traversants en position moyenne	TerM	0,95	0,95	0,95	
	Présence de terriers non traversants en position basse	TerB	0,71	0,94	0,86	
	Présence de terriers traversants	TT	0	0	0	
	Végétation ligneuse isolée	VLI	0,95	0,95	0,95	
	Végétation ligneuse clairsemée	VLC	0,68	0,9	0,89	
	Végétation ligneuse généralisée	VLG	0,34	0,6	0,65	
	Présence d'horizon argilo-limoneux en couche d'assise de la digue	AbsLimor	0,56	0,8	0,78	
Paroi étanche	PET	10000	10000	10000		

2.4.4.2 Rupture

Par défaut il a été choisi de considérer que la présence d'une canalisation ou d'un terrier traversant entraîne forcément la rupture de la digue par érosion interne lorsque celle-ci apparaît. Ceci n'a pas été modifié.

Les coefficients correcteurs liés aux renforcements en pied côté val ont été fixés arbitrairement. Dans le cadre des Études de Dangers des digues domaniales du val de Nevers, les coefficients sont les suivants :

Renforcements en pied côté Val (facteur)		
Type de renforcement	Code	coef
Tapis drainant	TADR	0,1
Fossé d'évacuation	EVAC	0,5
Mur de soutènement	MURV	0,3

Figure 24 : Coefficients liés aux renforcements en pied côté val

Enfin, le dernier coefficient correspond à la capacité du gestionnaire de répondre activement et rapidement pour endiguer l'action de la crue. Celui-ci est normalement fixé par le gestionnaire donc il n'y a pas eu d'étude de sensibilité spéciale faite sur ce coefficient. Seulement ce coefficient concerne tous les profils de digues étudiés et sert de base pour le calcul de probabilité de rupture par érosion interne, il est donc important de bien le définir. Les coefficients retenus seront ceux pris par défaut par la DREAL Centre pour son Etude de Dangers.

Action du gestionnaire en épisode de Crue (facteur)		
Action du gestionnaire	Code	coef
Absence de surveillance et/ou organisation non adaptée	ASONA	1
Surveillance mais organisation non adaptée	SONA	0,9
Surveillance et Organisation Adaptée	SOA	0,5
Surveillance et Organisation Adaptée et Renforcée	SOAR	0,1

Figure 25 : Coefficient lié à l'action du gestionnaire

2.5 Phénomène (scénario) de glissement de talus

Les glissements de talus apparaissent lorsqu'un déséquilibre intervient entre les forces (ou moments) motrices et les forces (ou moments) stabilisatrices présentes dans un massif de sol. Pour les digues, les principales forces en jeu sont le poids des terres, l'action de l'eau (interne et externe) et les forces de résistance au cisaillement gouvernées par la cohésion et l'angle de frottement interne des sols.

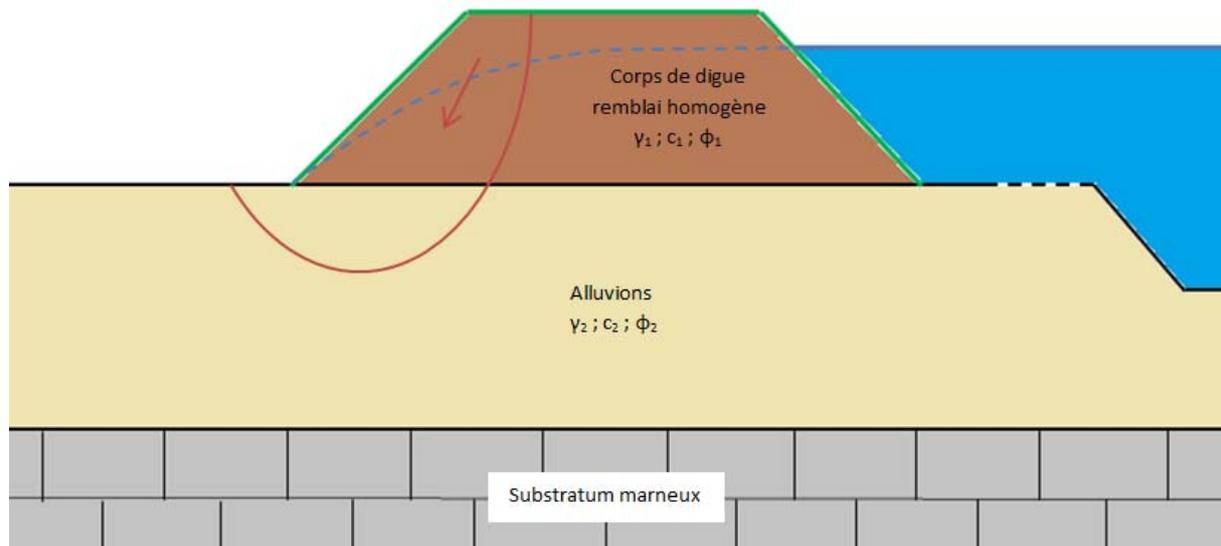


Figure 26 : Schéma de principe d'un glissement de talus sur une digue côté val

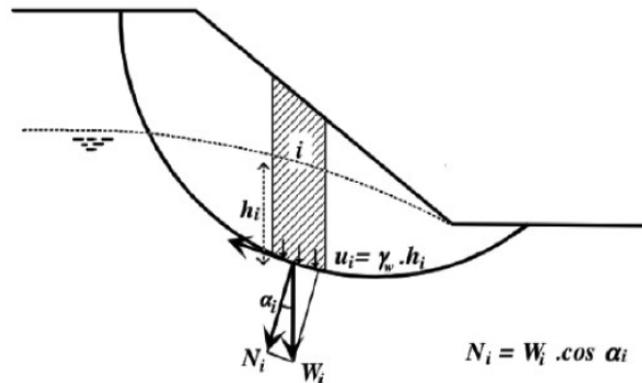
Dans le cadre des études de dangers des digues de la Loire moyenne, les glissements pris en compte sont des glissements de type circulaire.

Concernant le scénario de rupture de digue par glissement, seul le glissement côté val (zone protégée) a été pris en compte. Le glissement de talus côté Loire intervient dans le scénario initié par une érosion externe (affouillement) du pied de digue (voir section suivante).

Les coefficients détaillés dans les sous-parties 2.5.1 et 2.5.2 sont les coefficients retenus par la DREAL Centre pour effectuer la modélisation de rupture par glissement de talus côté zone protégée pour les levées du val d'Orléans. Ces coefficients sont alors adaptés suite à une étude de sensibilité du modèle (cf. §2.5.3).

2.5.1 Probabilité d'apparition de glissement de talus $P(g_a)$

La possibilité d'apparition de glissement de talus en période de crue est basée sur le calcul d'un facteur de sécurité F calculé par la méthode des tranches pour le talus côté zone protégée et en considérant une rupture de type circulaire.



h_i : hauteur de nappe par rapport à la base de la tranche i

W_i : poids de la tranche i

α_i : angle de la normale à la tranche i par rapport à la verticale

u_i : pression interstitielle appliquée sur la base de la tranche i

Figure 27 : Schéma de principe de la méthode des tranches et forces en jeu

Les probabilités d'apparition sont ensuite définies en fonction d'intervalles de ce coefficient de sécurité F . Plus F est grand plus la possibilité d'apparition est faible et inversement.

Afin de disposer d'un facteur de sécurité pour chaque profil, en tenant compte des caractéristiques topographiques, géologiques et géotechniques au droit de ces profils, des hypothèses simplificatrices ont été prises en compte et une étude paramétrique a permis de disposer de fonction reliant le facteur de sécurité F à la hauteur de charge considérée. Cette étude a été réalisée par le Laboratoire Régional d'Angers. Les coefficients et équations déterminées lors de cette étude sont pris comme base pour les calculs de glissement. Ces éléments sont déjà rentrés dans CARDigue.

Pour pouvoir déterminer le facteur de sécurité F pour chaque profil le modèle fait appel aux données géométriques (hauteur de la digue, pente des talus), qui sont issues des données topographiques, et aux données géologiques (nature et épaisseur des couches d'assise), qui sont issues d'une étude des données existantes (Banque du Sous-Sol, données existantes - étude SOGREAH et reconnaissances complémentaires, cf. S06).

Ainsi, pour chaque profil et chaque crue considérée, un facteur de sécurité F a été déterminé.

La probabilité d'apparition de glissement de talus $P(g_a)$ est évaluée en fonction du facteur de sécurité F . Les valeurs associées sont les suivantes :

Probabilité de glissement en fonction de F					
Facteur de sécurité F	0	< F <	1	→	1
	1	< F <	1,1	→	0,7
	1,1	< F <	1,3	→	0,3
	1,3	< F <	1,5	→	0,1
	1,5	< F		→	0,01
Probabilité en cas Maison, Murs Hauteur ou Pente faible				→	0

Figure 28 : Probabilité d'apparition d'un glissement de talus côté val $P(g_a)$ en fonction du facteur de sécurité F calculé

La présence de certains types de renforcements en pied coté val (enrochements) peut améliorer le facteur F . Par exemple, si le profil dispose de renforcement de pied, le facteur F calculé sera majoré par un coefficient de 1,2.

Les profils avec des maisons encastrées ou des murs de soutènement ou de quai sont traités sans calculer le facteur F . Pour tenir compte du soutien qu'apportent ces structures au talus de digue, une valeur de probabilité d'apparition fixe (prise égale à 0) est directement utilisée. Il en est de même pour les digues de faibles hauteurs ou les talus de faible pente, cas pour lesquels il est considéré que l'apparition d'un glissement ne peut pas survenir. Une probabilité fixe nulle est alors définie.

2.5.2 Probabilité de rupture en cas de glissement de talus $P(g_r)$

Le glissement correspond à une déstabilisation du talus. Ce phénomène n'entraîne pas directement la rupture d'une digue, mais en modifiant sa géométrie (diminution de la largeur de digue notamment), un glissement entraîne un risque accru de rupture par érosion interne.

Pour chaque profil, la probabilité de rupture par glissement de talus $P(g_r)$ est donc établie à partir des probabilités calculées pour l'aléa d'érosion interne de ce profil, majoré pour tenir compte de l'apparition d'un glissement.

Cette majoration des probabilités de l'aléa d'érosion interne peut se faire selon deux possibilités dans la méthodologie CARDigue :

- soit par surclassement de la probabilité associée à l'apparition de l'érosion interne $P(e_{i_a})$ selon le tableau présenté ci-dessous.

Probabilités qualitatives	Proba "érosion interne" P(ei _a)		P (g _r)
quasi-nulle	-- P ≤ 0,001	→	0,0010000
négligeable	0,001 < P ≤ 0,01	→	0,0100000
moyenne	0,01 < P ≤ 0,2	→	0,2000000
forte	0,2 < P ≤ 0,8	→	0,8000000
très forte	0,8 < P ≤ 0,99	→	0,9900000
quasi certaine	0,99 < P < 1	→	1

Figure 29 : Probabilité de rupture par glissement côté Loire obtenue par surclassement de la probabilité d'apparition de l'érosion interne

- soit par l'intermédiaire d'un coefficient multiplicateur fixe C₁ de la probabilité associée à l'aléa de l'érosion interne P(ei).

2.5.3 Aléa de rupture par glissement de talus P(g_r)

L'aléa de rupture de digue par glissement de talus s'écrit :

$$P(g) = P(g_a) \times P(g_r) \quad (12)$$

2.5.4 Etude de sensibilité pour le glissement de talus côté val

Une étude de sensibilité du modèle mis en place pour le calcul de l'aléa de rupture par glissement de talus côté zone protégée a été menée. Elle a consisté à faire varier les différents paramètres réglables dans l'onglet « Param Glissement » sous CARDigue pour déterminer lesquels sont déterminants et peuvent changer de manière significative les résultats obtenus. Le but est ensuite de pouvoir fixer plus finement ces coefficients.

Cette étude a été menée en différenciant les parties apparition et rupture du phénomène d'érosion interne mais en ne différenciant pas les systèmes d'endiguement (même paramétrage pour les deux systèmes).

2.5.4.1 Apparition

Comme présenté précédemment (cf §2.5.1), la probabilité d'apparition de glissement de talus côté zone protégée est déterminée à partir d'intervalles de facteur de sécurité F. La détermination de ces intervalles de F a été effectuée par le Laboratoire Régional d'Angers pour les levées de Loire à partir d'une étude réalisée sur le logiciel TALREN.

Les résultats issus de cette modélisation n'ont pas été soumis à une étude de sensibilité et ont été repris pour effectuer les calculs d'aléas de rupture des digues du val de Nevers.

2.5.4.2 Rupture

Pour calculer la probabilité de rupture par glissement de talus côté zone protégée il y a deux méthodes (cf. §2.5.2) qui ont été comparées. Les résultats sont alors les suivants :

			Glissement							
			50	70	100	170	200	500		
0 0,001 0,01 0,05 0,2 0,8 0,99 P ≤ < P < < P < < P < < P < < P < < P < 0,001 0,01 0,05 0,2 0,8 0,99 1	Situation d'origine coeff 1,1		85	85	83	81	77	62		
			0	0	1	3	3	13		
			0	0	1	1	3	3		
			0	0	0	0	2	6		
			0	0	0	0	0	1		
			0	0	0	0	0	0		
3 (Situation actuelle)			85	85	82	78	74	58		
			0	0	2	6	5	12		
			0	0	1	1	2	5		
			0	0	0	0	4	5		
			0	0	0	0	0	4		
			0	0	0	0	0	0		
coeff 2			85	85	82	78	74	58		
			0	0	2	6	5	13		
			0	0	1	1	4	7		
			0	0	0	0	2	2		
			0	0	0	0	0	4		
			0	0	0	0	0	1		
coeff 1.15			85	85	83	80	74	61		
			0	0	1	4	6	11		
			0	0	0	1	3	6		
			0	0	0	0	2	6		
			0	0	0	0	0	1		
			0	0	0	0	0	0		
surclassement			85	85	83	81	76	60		
			0	0	1	2	2	6		
			0	0	0	1	5	11		
			0	0	1	1	2	7		
			0	0	0	0	0	1		
			0	0	0	0	0	0		

Figure 30 : Comparaison des méthodes de calcul pour la probabilité événementielle de rupture par glissement de talus côté val

Pour le coefficient fixe de 1.1 par défaut choisi par la DREAL Centre pour son Etude de Dangers des levées du val d'Orléans, il n'y a très peu de différence avec la méthode de surclassement.

Toutefois, dès que le coefficient fixe est pris supérieur à 1.1 il y a des changements de résultats plus importants. Cet effet est plafonné (en termes de catégorisation de probabilités) pour des coefficients supérieurs à 2. Cependant, ceci est à nuancer concernant l'aléa annuel de rupture par glissement de talus côté val puisqu'il faut encore multiplier cette probabilité événementielle par la probabilité d'occurrence de la crue.

La méthode choisie pour calculer l'aléa de rupture par glissement de talus côté val est celle qui consiste à multiplier l'aléa de l'érosion interne par un coefficient fixe de 1.1.

2.6 Phénomène (scénario) d'érosion externe (affouillement)

L'érosion externe par le fleuve est possible sur les levées de Loire à deux niveaux :

- Au niveau du talus côté Loire ;
- Au niveau du pied de levée côté Loire lorsque celui-ci est en contact avec le lit vif de la Loire.

Il a été remarqué que la très grande majorité des talus côté fleuve des levées de Loire sont protégées par un parement en maçonnerie de pierres sèches recouvert par de la terre végétale sur laquelle pousse de l'herbe rase. Ainsi il a été considéré que l'érosion externe au niveau du talus côté Loire ne pouvait intervenir et il a donc été négligé dans la modélisation sous CARDigue.

Ainsi, seule l'érosion des pieds de levée a été prise en compte. Le phénomène appelé érosion externe dans la méthodologie CARDigue est donc en réalité un scénario de rupture initié par un affouillement de pied de digue côté fleuve.

La fondation de la levée n'étant pas toujours protégée face à l'érosion du fleuve en crue, des affouillements sous la levée (des terrains alluvionnaires sableux) importants peuvent apparaître et entraîner un glissement localisé du talus côté Loire conjugués à des effondrements successifs de la levée.

Pendant un épisode de crue, le phénomène d'érosion externe (affouillement) à lui seul ne peut pas provoquer la rupture totale de la levée mais initie un glissement de talus côté Loire qui, réduisant la largeur de la levée, augmentera le risque d'érosion interne.

Les coefficients détaillés dans les sous-parties 2.6.1 et 2.6.2 sont les coefficients retenus par la DREAL Centre pour effectuer la modélisation de rupture par érosion externe pour les levées du val d'Orléans. Toutefois, des facteurs aggravants ont été rajoutés par rapport à ce qui a été retenu pour l'Etude de Dangers du val d'Orléans. Ces coefficients sont alors adaptés suite à une étude de sensibilité du modèle (cf. §2.6.3).

2.6.1 Probabilité d'apparition d'érosion externe $P(ee_a)$

La probabilité d'apparition de l'érosion externe est évaluée en fonction de la largeur du franc bord et de la présence ou non de facteurs améliorant ou aggravant.

Le franc bord est la portion du lit majeur située entre le lit mineur et la levée. Les terrains qui le constituent protègent le pied de digue de l'érosion fluviale. Plus le franc bord est large moins la probabilité d'apparition d'affouillement est grande.

L'association des probabilités de base en fonction de la largeur du franc bord est établie selon le tableau présenté page suivante.

		Probabilité "de base"	
Largeur du franc-bord	0 < Largeur du franc-bord < 5	5	0,01
	5 < Largeur du franc-bord < 10	10	0,001
	10 < Largeur du franc-bord		0

Figure 31 : Probabilité de base d'apparition de l'érosion externe (affouillement) en fonction de la largeur du franc-bord

Cette probabilité de base est ensuite pondérée par des coefficients C_1 , C_2 et C_3 relatifs à la présence de facteurs s'opposant à l'érosion externe, l'aggravant ou encore un coefficient pour tenir compte de la durée de la crue.

Les éléments qui peuvent permettre d'éviter l'érosion externe en pied de talus côté Loire sont principalement des renforcements par des perrés ou murs.

Des facteurs C_1 arbitraires, qui auront tendance à réduire la probabilité de base, ont alors été fixés et sont les suivants :

Renforcement du pied de digue côté Loire		
Nature de renforcement	Code	coef.
Perré	PER	1E-04
Enrochements	ENR	0,001
Mur de soutènement	MUR	1E-05
Parafouille	PARA	0,001

Figure 32 : Coefficients C_1 symbolisant les éléments s'opposant à l'érosion externe

Les facteurs aggravants sont majoritairement dominés par le déchaussement de maçonneries pour le val de Nevers. Toutefois, des coefficients C_2 complémentaires ont été fixés. Ces coefficients qui auront tendance à augmenter la probabilité de base sont les suivants :

Facteurs aggravants		
Nature du facteur aggravant	Code	coef.
Fosse en pied de digue Loire	FOL	50
Erosion du pied de digue (autre que celle du fleuve)	ERD	20
Déchaussement de maçonneries en pied	DEC	30
Obstacle, Point dur en pied de digue	OBSL	50
Erosion et obstacle	BSL+ER	60
Erosion Loire	ErL	40

Figure 33 : Coefficients C_2 symbolisant les facteurs aggravants de l'érosion externe

Les facteurs C_3 associés à la durée de chaque crue n'ont pas été déterminés dans le cadre de l'étude de dangers des digues domaniales de la Loire du val de Nevers. Ces facteurs sont donc à ce jour pris égaux à 1.

La probabilité d'apparition $P(ee_a)$ de l'érosion externe est donc obtenue par la formule suivante :

$$P(ee_a) = P_{base}(ee_a) \times C_1 \times C_2 \times C_3 \quad (13)$$

2.6.2 Probabilité de rupture en cas d'érosion externe $P(ee_r)$

L'érosion externe (affouillement) correspond à une déstabilisation du pied de digue. Comme rappelé ci-dessus, ce phénomène n'entraîne pas directement la rupture d'une digue, mais provoque un glissement de talus côté Loire puis une rupture par érosion interne.

La probabilité de rupture « par érosion externe » est donc rattachée à l'aléa de rupture par glissement côté Loire. Pour déterminer le risque de rupture dû à une érosion externe, les probabilités d'apparition de glissement calculées côté Loire et de rupture par glissement sont prises en compte, puis majorées pour tenir compte de la déstabilisation du pied de digue.

Nota : La probabilité d'apparition de glissement côté Loire est calculée spécifiquement pour caractériser la probabilité de rupture par érosion externe. La probabilité de rupture par glissement est celle précédemment définie pour le scénario de glissement. Un aléa de glissement spécifique au côté Loire est alors obtenu.

La majoration des probabilités de l'aléa glissement côté Loire peut se faire selon deux possibilités dans la méthodologie CARDigue :

- soit par surclassement de l'aléa de glissement de talus côté Loire selon le tableau présenté ci-dessous

Probabilités qualitatives	P "glissement Loire"		P (ree)
quasi-nulle	-- $P \leq 0,001$	→	0,0010000
négligeable	$0,001 < P \leq 0,01$	→	0,0100000
moyenne	$0,01 < P \leq 0,2$	→	0,2000000
forte	$0,2 < P \leq 0,8$	→	0,8000000
très forte	$0,8 < P \leq 0,99$	→	1,0000000
quasi certaine	$0,99 < P < 1$	→	1

Figure 34 : Probabilité événementielle de rupture par érosion externe obtenue par surclassement de l'aléa de glissement côté Loire

- soit par l'intermédiaire d'un coefficient multiplicateur fixe C_4 de la probabilité associée à l'aléa de rupture par glissement côté Loire $P(g_{Loire})$

2.6.3 Aléa de rupture par érosion externe P(ee)

L'aléa de rupture de la levée par érosion externe (affouillement) s'écrira :

$$P(ee) = P(ee_a) \times P(ee_r) \quad (14)$$

2.6.4 Etude de sensibilité pour l'érosion externe

Une étude de sensibilité du modèle mis en place pour le calcul de l'aléa de rupture par érosion externe a été menée. Elle a consisté à faire varier les différents paramètres réglables dans l'onglet « Param Erosion externe » sous CARDigue pour déterminer lesquels sont déterminants et peuvent changer de manière significative les résultats obtenus. Le but est ensuite de pouvoir fixer plus finement ces coefficients.

Cette étude a été menée en différenciant les parties apparition et rupture du phénomène d'érosion interne mais en ne différenciant pas les systèmes d'endiguement (même paramétrage pour les deux systèmes).

2.6.4.1 Apparition

Pour ce phénomène, il n'a pas été fait d'étude de sensibilité spécifique pour les probabilités de bases définies dans le tableau situé en figure 30. Toutefois, on peut noter que la rupture par érosion externe est très rare. Pour que cela se produise il faudrait que la levée se situe en contact avec le lit vif de la Loire, que la pente du fleuve soit importante et que d'autres facteurs naturels aggravants soient présents.

De plus, les levées possèdent soit un perré soit un mur de soutènement sur le talus côté Loire et surtout en pied. La probabilité de base est donc encore diminuée.

Aussi, des facteurs aggravants sont présents mais de façon très minoritaire. Leur influence n'a donc pas été déterminée.

En conclusion, les levées étudiées ont quelques profils susceptibles de subir l'érosion externe (notamment dans la zone en courbe de la levée de la Blanchisserie à Nevers). Toutefois, ce phénomène est nettement moins important que les autres (notamment surverse et érosion interne). Il a donc été décidé de ne pas changer les coefficients par défaut pris par la DREAL Centre pour son Etude de Dangers des levées du val d'Orléans.

2.6.4.2 Rupture

Pour la rupture, il est possible de choisir entre deux méthodes. Il a alors été décidé de tester ces deux méthodes. Voici les résultats de ce test :

		Erosion externe								
		--	50	70	100	170	200	500		
0	$P \leq 0,001$	0	85	--	85	85	85	85	85	
0,001	$< P < 0,01$	0	0	--	0	0	0	0	0	
0,01	$< P < 0,05$	0	0	--	0	0	0	0	0	
0,05	$< P < 0,2$	0	0	--	0	0	0	0	0	
0,2	$< P < 0,8$	0	0	--	0	0	0	0	0	
0,8	$< P < 0,99$	0	0	--	0	0	0	0	0	
0,99	$< P < 1$	0	0	--	0	0	0	0	0	
		-50 profils								
400 (Situation actuelle)	0	pas d'évo	85	pas d'évo	85	pas d'évo	85	pas d'évo	85	pas d'évo
	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo
	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo
	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo
	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo
	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo
	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo
coeff 40	0	pas d'évo	85	pas d'évo	85	pas d'évo	85	pas d'évo	85	pas d'évo
	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo
	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo
	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo
	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo
	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo
	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo
coeff 4	0	pas d'évo	85	pas d'évo	85	pas d'évo	85	pas d'évo	85	pas d'évo
	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo
	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo
	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo
	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo
	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo
	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo	0	pas d'évo

Figure 35 : Comparaison des méthodes de calcul des probabilités de rupture par érosion externe

Aucune différence n'est remarquée entre les différentes méthodes. En effet, ces coefficients sont couplés à ceux d'apparition ; or ceux-ci sont très faibles donc ils prennent le pas sur le calcul de l'aléa de rupture par érosion externe.

Il a été alors décidé de retenir la méthode de multiplication de l'aléa de rupture par glissement côté Loire par un coefficient fixe de 4.
Toutefois, cela revient finalement à considérer que la rupture par érosion externe ne peut avoir lieu pour les levées du val de Nevers.

2.7 Phénomène (scénario) de soulèvement hydraulique

Le risque d'apparition d'un soulèvement hydraulique de la fondation côté val est un mécanisme qui est lié à la configuration géologique du sol de fondation de la levée.

Pour qu'il y ait soulèvement hydraulique, il est nécessaire que la digue repose sur un horizon de sol imperméable d'épaisseur limitée, reposant lui-même sur un horizon perméable (aquifère) en liaison directe avec la rivière.

Le phénomène se produit lorsque la contrainte exercée par la pression de l'eau à la base de la couche imperméable dépasse la contrainte liée au poids propre de cet horizon imperméable. La couche de sol imperméable peut être soulevée et les déformations engendrées provoquent alors la fissuration ou le claquage de la couche, entraînant l'apparition d'un écoulement. L'érosion interne de la fondation de la levée devient alors possible. La rupture intervient donc par érosion interne.

Les coefficients détaillés dans les sous-parties 2.7.1 et 2.7.2 sont les coefficients retenus par la DREAL Centre pour effectuer la modélisation de rupture par soulèvement hydraulique pour les levées du val d'Orléans. Ces coefficients sont alors adaptés suite à une étude de sensibilité du modèle (cf. §2.7.3).

2.7.1 Probabilité d'apparition de soulèvement $P(sh_a)$

La probabilité d'apparition de soulèvement hydraulique est appréciée par le calcul d'un facteur de sécurité F_h . La méthode de calcul de ce facteur est détaillée dans CARDigue.

Cette méthodologie permet de définir, sur la base de données « simples », un facteur de sécurité vis à vis du soulèvement hydraulique. Elle est conservatrice dans le cas d'une application aux digues car la saturation de la digue est considérée acquise ainsi que l'établissement d'un régime d'écoulement permanent.

Ce facteur est fonction de nombreuses variables définies sur le schéma ci-dessous.

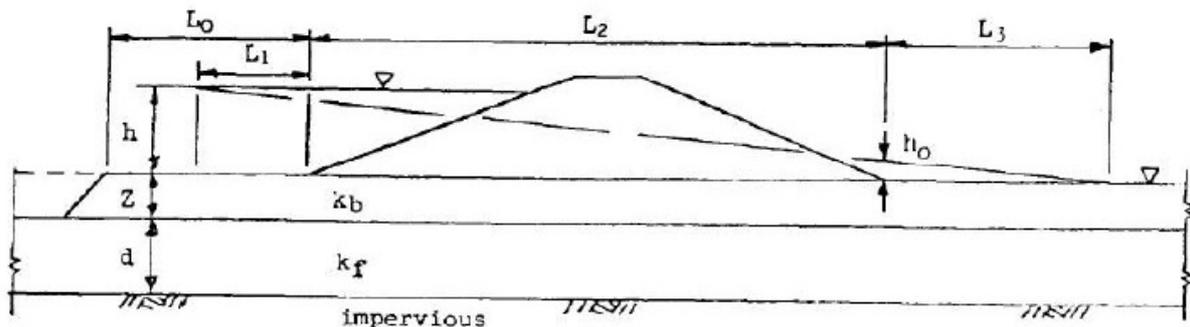


Figure 36 : Schéma type présentant les variables utilisées dans le calcul du coefficient de sécurité F_h du soulèvement hydraulique

Les termes suivants sont utilisés :

- la couche imperméable a une épaisseur z , un poids volumique déjaugé γ_{sub} et une perméabilité k_b
- la couche perméable (aquifère) a une épaisseur d et une perméabilité k_f
- h est la charge amont, fonction de la crue prise en compte
- L_0 est la longueur du franc-bord
- L_1 est la longueur effective du franc-bord. Elle est définie par :

$$L_1 = \sqrt{\left(\frac{k_f}{k_{bfb}}\right) * z_{bfb} * d}$$

- L_2 est la largeur en pied de la digue, déterminée selon chaque profil.
- L_3 est la longueur effective de la couche imperméable en pied côté val. Elle est définie par :

$$L_3 = \sqrt{\left(\frac{k_f}{k_{bv}}\right) * z_{bv} * d}$$

- h_0 est la charge aval de l'aquifère au niveau du pied aval de la digue. Elle est définie par :

$$h_0 = \frac{h * L_3}{L_1 + L_2 + L_3}$$

La détermination de ces paramètres permet de calculer la charge hydraulique critique de l'aquifère h_c en pied côté val et d'en déduire le facteur de sécurité au soulèvement hydraulique F_h tels que :

$$h_c = \frac{z_{bv} * \gamma_{sub}}{\gamma_w} \qquad F_h = \frac{h_c}{h_0}$$

La probabilité d'apparition du soulèvement hydraulique $P(sh_a)$ est ensuite définie en fonction d'intervalles de F_h , comme défini dans la figure ci-dessous.

Probabilités d'apparition en fonction du facteur de sécurité F_h			
	pas de limon OU pas d'alluvions OU pas d'eau	→	0
Fsh	0,000001 < Fsh < 1,1	→	0,8
	1,1 < Fsh < 1,3	→	0,3
	1,3 < Fsh < 1,5	→	0,1
	1,5 < Fsh < 2	→	0,01
	2 < Fsh	→	0,001

Figure 37 : Probabilités d'apparition du soulèvement hydraulique en fonction de F_h

Plus F_h est grand, plus le risque d'apparition d'un soulèvement hydraulique est faible. S'il n'existe pas d'horizon imperméable en surface la probabilité d'apparition est nulle. Cette configuration est traitée dans le scénario d'érosion interne.

Précisions sur la détermination des données géologiques nécessaires à la méthodologie CARDigue :

Pour la détermination, au droit de chaque profil, du facteur de sécurité F_h décrit ci-dessus, il a été nécessaire de déterminer, pour chaque profil :

- la présence ou non d'assise imperméable (type limon ou argile), son épaisseur, le poids volumique et sa perméabilité
- la présence ou non de couche alluvionnaire sableuse, son épaisseur, son poids volumique et sa perméabilité

Compte tenu des reconnaissances géotechniques réalisées au droit des levées de Loire (cf. cartes en annexe 3.1), nous avons retenu les caractéristiques suivantes pour les différentes couches de sols :

Nature des sols	γ_h (kN/m ³)	Perméabilité (m/s)
Argile	19	1.10^{-9}
Limon	18	1.10^{-7}
Sable	16	1.10^{-5}
Sable et grave	16	1.10^{-4}

Tableau 5 : Caractéristiques physiques par défaut des couches de sols d'assise de la levée

Concernant la détermination des épaisseurs de chaque couche au droit de chaque profil, nous nous sommes basés sur une exploitation des sondages disponibles (issus d'une étude SOGREAH datant de 2002 et de la Banques du Sol et du Sous-sol) implantés à proximité de la digue. Nous avons aussi utilisé les résultats des missions géophysiques et géotechniques ordonnées pour cette Etude de Dangers.

2.7.2 Probabilité de rupture en cas de soulèvement hydraulique $P(sh_r)$

Le soulèvement hydraulique de la fondation côté val correspond à la suppression de l'étanchéité garantie par l'horizon imperméable. Ce phénomène n'entraîne pas directement la rupture d'une digue, mais augmente la probabilité d'apparition et de rupture par érosion interne. La probabilité de rupture « par soulèvement hydraulique de la fondation côté val » est donc rattachée à l'aléa de rupture par érosion interne.

Pour déterminer le risque de rupture dû à ce phénomène, la probabilité d'apparition de l'érosion interne est donc recalculée puis majorée pour tenir compte de la déstabilisation (claquage) de l'horizon imperméable.

Cette majoration est obtenue en appliquant un coefficient multiplicateur C_1 sur le critère de Bligh brut déterminé pour l'apparition de l'érosion interne. Une probabilité majorée d'apparition de l'érosion interne $P(ei_{a,bis})$ est alors obtenue. La probabilité de rupture $P(ei_r)$ est celle calculée dans le scénario d'érosion interne.

Pour les digues domaniales de la Loire du val d'Orléans, un coefficient $C_1=0,8$ avait été retenu.

La probabilité de rupture en cas de soulèvement hydraulique de la fondation côté val est donc calculée :

$$P(sh_r) = P(ei_{a,bis}) \times P(ei_r) \quad (15)$$

2.7.3 Aléa de rupture par soulèvement hydraulique $P(sh)$

La probabilité que le soulèvement hydraulique de la fondation côté val entraîne la rupture de la levée s'écrit :

$$P(sh) = P(sh_a) \times P(sh_r) \quad (16)$$

2.7.4 Etude de sensibilité pour le soulèvement hydraulique

Une étude de sensibilité du modèle mis en place pour le calcul de l'aléa de rupture par soulèvement hydraulique a été menée. Elle a consisté à faire varier les différents paramètres réglables dans l'onglet « Param-Soul Hydrau » sous CARDigue pour déterminer lesquels sont déterminants et peuvent changer de manière significative les résultats obtenus. Le but est ensuite de pouvoir fixer plus finement ces coefficients.

Cette étude a été menée en différenciant les parties apparition et rupture du phénomène d'érosion interne mais en ne différenciant pas les systèmes d'endiguement (même paramétrage pour les deux systèmes).

2.7.4.1 Apparition

La probabilité d'apparition de ce phénomène est déterminée par intervalle de coefficient de sécurité F_h dont la méthode de calcul a été détaillée précédemment (cf §2.7.2). Les digues de Nevers présentent une structure et une composition proches des digues d'Orléans et de Tours, les valeurs par défaut des probabilités d'apparition par intervalle de coefficient de sécurité ne sont donc pas modifiées.

2.7.4.2 Rupture

Le phénomène de soulèvement hydraulique entraîne une apparition plus probable de l'érosion interne et joue donc directement sur le coefficient de Bligh à l'aide d'un coefficient correcteur fixe inférieur à 1.

L'étude à consister à faire varier ce coefficient afin de déterminer son influence sur les résultats. L'étude donne alors les résultats suivant :

		Soulèvement hydraulique							
		50	70	100	170	200	500		
0 $P \leq$ 0,001 0,001 $< P <$ 0,01 0,01 $< P <$ 0,05 0,05 $< P <$ 0,2 0,2 $< P <$ 0,8 0,8 $< P <$ 0,99 0,99 $< P <$ 1	Situation d'origine coeff 0,8	85 0 0 0 0 0 0	85 0 0 0 0 0 0	85 0 0 0 0 0 0	85 0 0 0 0 0 0	80 4 1 0 0 0 0	68 9 5 3 0 0 0		
	coeff 0.7 (Situation actuelle)	85 pas d'évo 0 pas d'évo 0 pas d'évo 0 pas d'évo 0 pas d'évo 0 pas d'évo 0 pas d'évo	85 pas d'évo 0 pas d'évo 0 pas d'évo 0 pas d'évo 0 pas d'évo 0 pas d'évo 0 pas d'évo	84 -1 profils 1 +1 profils 0 pas d'évo 0 pas d'évo 0 pas d'évo 0 pas d'évo 0 pas d'évo	83 -2 profils 2 +2 profils 0 pas d'évo 0 pas d'évo 0 pas d'évo 0 pas d'évo 0 pas d'évo	75 -5 profils 7 +3 profils 2 +1 profils 1 +1 profils 0 pas d'évo 0 pas d'évo 0 pas d'évo	64 -4 profils 6 -3 profils 8 +3 profils 6 +3 profils 1 +1 profils 0 pas d'évo 0 pas d'évo		
		coeff 0.5	85 pas d'évo 0 pas d'évo 0 pas d'évo 0 pas d'évo 0 pas d'évo 0 pas d'évo 0 pas d'évo	85 pas d'évo 0 pas d'évo 0 pas d'évo 0 pas d'évo 0 pas d'évo 0 pas d'évo 0 pas d'évo	75 -10 profils 8 +9 profils 1 +1 profils 1 +1 profils 0 pas d'évo 0 pas d'évo 0 pas d'évo	73 -12 profils 7 +7 profils 2 +2 profils 3 +3 profils 0 pas d'évo 0 pas d'évo 0 pas d'évo	67 -13 profils 6 +2 profils 3 +2 profils 7 +7 profils 2 +2 profils 0 pas d'évo 0 pas d'évo	59 -9 profils 6 -3 profils 3 -2 profils 7 +4 profils 10 +10 profils 0 pas d'évo 0 pas d'évo	
			coeff 0.2	84 -1 profils 1 +1 profils 0 pas d'évo 0 pas d'évo 0 pas d'évo 0 pas d'évo 0 pas d'évo	79 -6 profils 4 +4 profils 1 +1 profils 0 pas d'évo 0 pas d'évo 0 pas d'évo 0 pas d'évo	62 -23 profils 14 +14 profils 3 +3 profils 3 +3 profils 0 pas d'évo 0 pas d'évo 0 pas d'évo	58 -27 profils 15 +15 profils 4 +4 profils 4 +4 profils 0 pas d'évo 0 pas d'évo 0 pas d'évo	57 -23 profils 7 +3 profils 1 pas d'évo 10 +10 profils 10 +10 profils 0 pas d'évo 0 pas d'évo	53 -15 profils 4 -5 profils 2 -3 profils 5 +2 profils 21 +21 profils 0 pas d'évo 0 pas d'évo

Figure 38 : Test sur le calcul d'aléa de rupture par soulèvement hydraulique

Ce test montre que changer le coefficient fixe de correction sur le coefficient de Bligh peut faire fortement varier les résultats. Plus le coefficient est faible (proche de 0), plus les résultats sont dégradés (voir tableau ci-dessus). Le phénomène de soulèvement hydraulique étant plutôt rare, il convient de fixer un coefficient réaliste, c'est-à-dire qui ne dégrade pas l'ensemble des profils. Nous choisissons donc un coefficient compris entre 0.7 et 0.9.

Il est donc choisi de maintenir le coefficient de 0,8, coefficient fixé par défaut dans le cadre de l'Étude de dangers des digues d'Orléans.

3. Annexes : Cartes de localisation des sondages géotechniques

Les cartes suivantes donnent l'implantation des sondages géotechniques issus des campagnes suivantes :

- Banque du sous-sol,
- Etude SOGREAH (2012),
- Investigations Hydrogéotechnique (2015).



- Crete_Nevers**
- Profils_en_travers**
- Sondages_Sogreah2002**
- Pelle mécanique (10)
 - Pénétromètre dynamique (5)
 - Sondage carotté (6)
- Sondages_Hydrogeotechnique2015**
- Sondages Carottés (1)
 - Pénétromètres (2)
 - Tarières (et essais PANDA sur T2) (3)
- Sondages_BanqueSousSol**
-

Emplacements des sondages géotechniques - Nevers