

# ÉTUDE DE DANGERS DES DIGUES DE LA LOIRE DE CLASSE B ET C

## *C - Note de principe du modèle de calcul de l'aléa de rupture (CARDigue)*

*Juin 2017*



# RAPPORTS

CETE  
Normandie Centre

LRB

Laboratoire Régional  
de BLOIS

## **DREAL Centre/SLBLB**

### **Études de dangers des digues de classe A de la Loire moyenne**

### **Méthodologie retenue pour le Calcul de l'Aléa Rupture de Digue (CARDigue)**

**Affaire n° 125900**

**V3 - Mars 2013**



MINISTÈRE  
DE L'ÉGALITÉ  
DES TERRITOIRES  
ET DU LOGEMENT

MINISTÈRE  
DE L'ÉCOLOGIE,  
DU DÉVELOPPEMENT  
DURABLE  
ET DE L'ÉNERGIE

Ministère de l'Égalité des territoires et du Logement  
Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie

## Historique des versions du document

Version	Date	Commentaire
0	Juin 2012	Création
1	Décembre 2012	Ajouts, corrections et annexes
2	Décembre 2012	Arbres de défaillances modifiés
3	Mars 2013	Corrections et généralisation aux différents vals

## Affaire suivie par

<b>Edouard DURAND</b> - Laboratoire Régional de BLOIS – Groupe Environnement et Risques – Unité Dignes et Ouvrages Aquatiques
Tél. : 02 54 55 49 30 / Fax : 02 54 55 48 71
Courriel : <a href="mailto:edouard.durand@developpement-durable.gouv.fr">edouard.durand@developpement-durable.gouv.fr</a>

<b>Bastien BRIDOUX</b> - Laboratoire Régional de BLOIS – Groupe Environnement et Risques – Unité Dignes et Ouvrages Aquatiques
Tél. : 02 54 55 48 93 / Fax : 02 54 55 48 71
Courriel : <a href="mailto:bastien.bridoux@developpement-durable.gouv.fr">bastien.bridoux@developpement-durable.gouv.fr</a>

## Référence Internet

<a href="http://www.cete-normandie-centre.developpement-durable.gouv.fr">http://www.cete-normandie-centre.developpement-durable.gouv.fr</a>
---

## Destinataires

DREAL Centre – M. Jean MAURIN et M. A. BOULAY..... 1 ex  
GER – Unité Dignes et Ouvrages Aquatiques..... 1 ex  
Secrétariat..... 1 ex  
Centre de Gestion 4      2013/32

# SOMMAIRE

<b>1 -ARBRES DE DÉFAILLANCE SIMPLIFIÉS.....</b>	<b>5</b>
1.1 -Arbre de défaillance du scénario de rupture par surverse.....	7
1.2 -Arbres de défaillance du scénario de rupture par érosion interne.....	7
1.3 -Arbres de défaillance du scénario de rupture par glissement de talus côté val.....	8
1.4 -Arbres de défaillance du scénario de rupture par érosion externe (affouillement).....	9
1.5 -Arbre de défaillance du scénario de rupture par soulèvement hydraulique.....	10
<b>2 -MÉTHODOLOGIE ADOPTÉE POUR LE CALCUL DE L'ALÉA DE RUPTURE DE DIGUE.....</b>	<b>11</b>
2.1 -Principes généraux et probabilités.....	11
2.1.1 -Introduction et objectifs de la méthodologie.....	11
2.1.2 -Les probabilités définies dans le modèle.....	12
2.1.2.1 - Probabilités d'apparition et de rupture d'un phénomène et Aléa de rupture.....	12
2.1.2.2 - Aléa global de rupture.....	13
2.1.2.3 - Aléa annuel de rupture.....	13
2.1.2.4 - Aléa global annuel de rupture.....	15
2.2 -Phénomène (scénario) de surverse.....	17
2.2.1 - Probabilité d'apparition d'une surverse $P(sa)$ .....	17
2.2.2 - Probabilité de rupture en cas de surverse $P(sr)$ .....	19
2.2.3 - Aléa de rupture par surverse $P(s)$ .....	22
2.3 -Phénomène (scénario) d'érosion interne.....	23
2.3.1 - Probabilité d'apparition d'érosion interne $P(eia)$ .....	24
2.3.2 - Probabilité de rupture en cas d'érosion interne $P(eir)$ .....	31
2.3.3 - Aléa de rupture par érosion interne $P(ei)$ .....	32
2.4 -Phénomène (scénario) de glissement de talus .....	33
2.4.1. Probabilité d'apparition de glissement de talus $P(ga)$ .....	33
2.4.2 - Probabilité de rupture en cas de glissement de talus $P(gr)$ .....	36
2.4.3 - Aléa de rupture par glissement de talus $P(g)$ .....	36
2.5 -Phénomène (scénario) d'érosion externe (affouillement) .....	37
2.5.1 - Probabilité d'apparition d'érosion externe $P(eea)$ .....	37
2.5.2 - Probabilité de rupture en cas d'érosion externe $P(eer)$ .....	39
2.5.3 - Aléa de rupture par érosion externe $P(ee)$ .....	39
2.6 -Phénomène (scénario) de soulèvement de fondation côté val .....	40
2.6.1 - Probabilité d'apparition de soulèvement $P(sha)$ .....	40
2.6.2 - Probabilité de rupture en cas de soulèvement hydraulique $P(shr)$ .....	43
2.6.3 - Aléa de rupture par soulèvement hydraulique $P(sh)$ .....	43

## Liste des figures

Figure 1 : Les 3 profils en travers fonctionnels des digues du val d'Orléans, de Tours et Authion.....	6
Figure 2 : Profil topographique type des digues de Loire présentant les points caractéristiques utilisés dans la méthodologie CARDigue.....	11
Figure 3 : Graphe indiquant le principe retenu dans l'étude de dangers pour la discrétisation de l'espace probabiliste.....	15
Figure 4 : Logigramme de détermination de la probabilité d'apparition de la surverse.....	18
Figure 5 : Logigramme de détermination de la probabilité de rupture de la surverse.....	19
Figure 6 : Schéma de principe pour le calcul du gradient hydraulique de Bligh.....	24
Figure 7 : Coupe type des levées de Loire – Profil Non Renforcé (dessin de Jean Maurin).....	27
Figure 8 : Coupe type des levées de Loire – Profil Renforcé côté Loire (dessin de Jean Maurin).....	27
Figure 9 : Coupe type des levées de Loire – Profil Renforcé côté Val (dessin de Jean Maurin).....	28
Figure 10 : Intervalles sur le critère de Bligh pris en compte pour la probabilité d'apparition de l'érosion interne.....	31
Figure 11 : Schéma de principe d'un glissement de talus sur une digue côté val.....	33
Figure 12 : Schéma de principe de la méthode des tranches et forces en jeu.....	33
Figure 13 : Modèle géotechnique de la digue et cas étudiés de l'étude paramétrique.....	34
Figure 14 : Résultats de l'étude paramétrique : facteur de sécurité F en fonction de la hauteur de charge, dans le cas d'une digue de Loire de pente 1V/2,5H reposant sur une couche de limon.....	35
Figure 15 : Probabilité d'apparition d'un glissement de talus côté val $P(ga)$ en fonction du facteur de sécurité F calculé.....	35
Figure 16 : Probabilité de rupture par glissement côté Loire obtenue par majoration de la probabilité d'apparition de l'érosion interne.....	36
Figure 17 : Probabilité de base d'apparition de l'érosion externe (affouillement) en fonction de la largeur du franc-bord.....	38
Figure 18 : Probabilité de rupture par érosion externe obtenue par majoration de l'aléa de glissement côté cours d'eau.....	39
Figure 19 : Schéma type présentant les variables utilisées dans le calcul du coefficient de sécurité $F_h$ du soulèvement hydraulique (d'après USACE, EM 1110-2-1901).....	40
Figure 20 : Probabilités d'apparition du soulèvement hydraulique en fonction du facteur de sécurité $F_h$ .....	41

## Liste des tableaux

Tableau 1: Correspondance entre probabilité qualitative et quantitative retenue pour l'aléa rupture de digue.....	12
Tableau 2: Discrétisation retenue de l'espace probabiliste en fonction des crues considérées pour la Loire.....	14
Tableau 3: Discrétisation retenue de l'espace probabiliste en fonction des crues considérées pour le Cher.....	14
Tableau 4: Critère pris en compte et probabilités $P(Sa)$ associées à l'apparition de la surverse.....	18
Tableau 5: Coefficients correcteurs appliqués aux coefficients de Bligh brut.....	29
Tableau 6: Poids volumiques et perméabilités par défaut des couches de sols d'assise de la levée.....	42

## 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 des levées du Val considéré* et **annexe n°4**) 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. On identifie également les causes et les effets de ces défaillances dans le but de mettre en évidence des interactions possibles entre composants, 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 d'endiguement, souvent extrêmement complexes de par leur constitution très hétérogène et leur étendue, est encore mal maîtrisée.

Dans la présente *Etude 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, 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, suivi d'un glissement du talus côté fleuve puis 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 et traduits en termes de fonction et composants prépondérants pour chaque profil en travers fonctionnel du système d'endiguement présenté à la figure 1.

Le scénario de rupture initié par des phénomènes karstiques, bien que présent sur certains vals, n'a pas été pris en compte. Il s'agit d'une rupture provoquée par l'ouverture d'un fontis dans une levée. Ce scénario fait l'objet de recherche mais les éléments connus à ce jour ne permettent pas de comprendre totalement ce scénario. Il n'a donc pas été pris en compte dans l'étude de dangers.

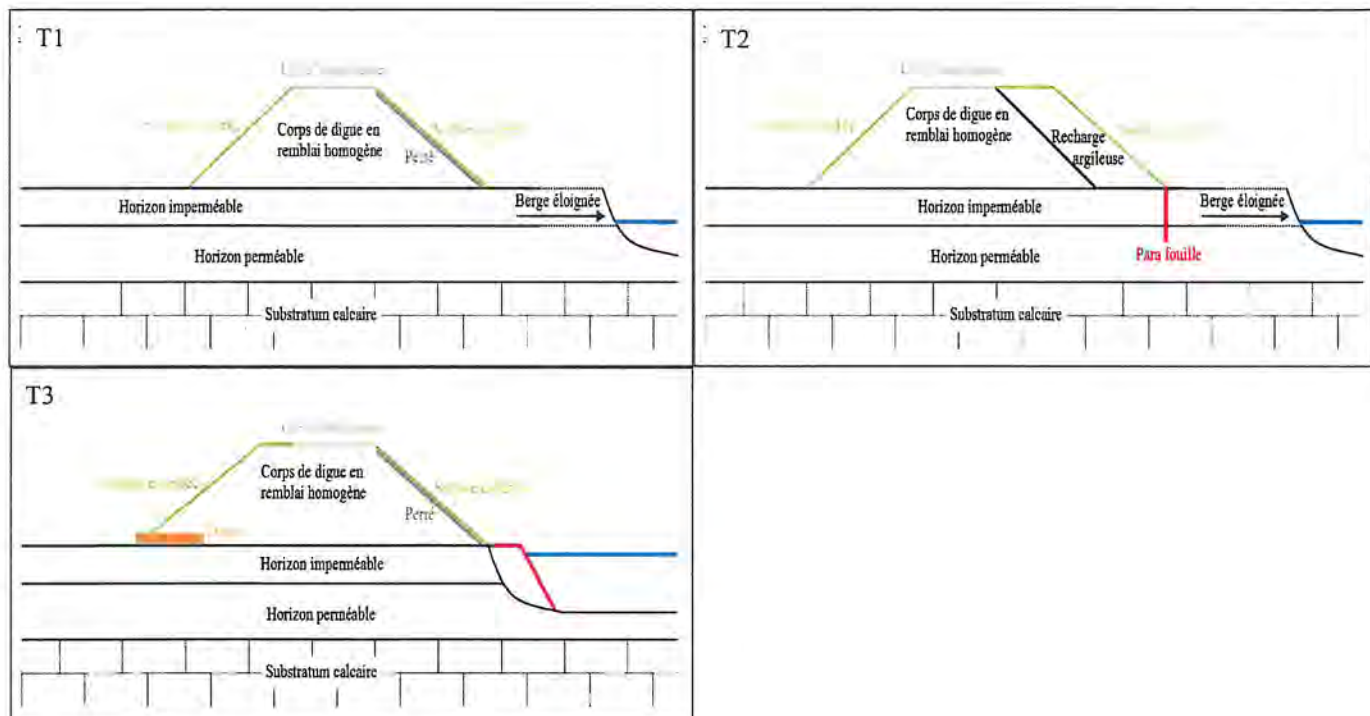
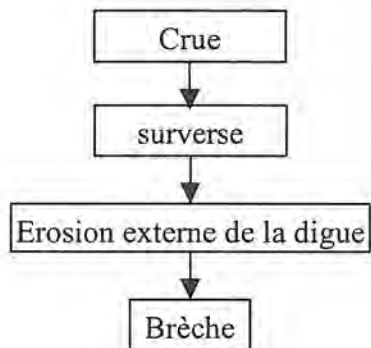


Figure 1 : Les 3 profils en travers fonctionnels des digues du val d'Orléans, de Tours et Authion



## 1.1 - Arbre de défaillance du scénario de rupture par surverse

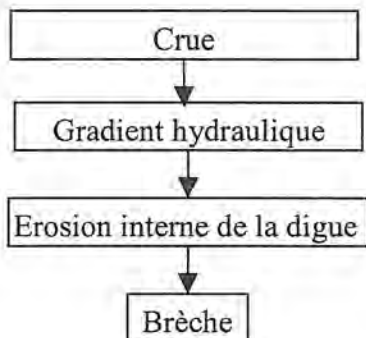
*Pour les trois profils en travers types :*



Fonction	Composants
Résistance à l'érosion externe	- crête de digue - talus côté zone protégée

## 1.2 - Arbres de défaillance du scénario de rupture par érosion interne

*Pour les profils 1 et 3 :*



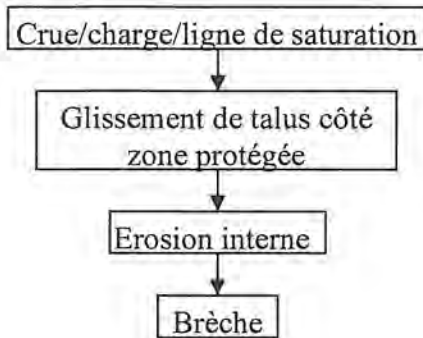
Fonction	Composants
Résistance à l'érosion interne	Tous

*Pour le profil 2 :*

Fonctions	Composants
Étanchéité	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

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



Pour le profil 3 :

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

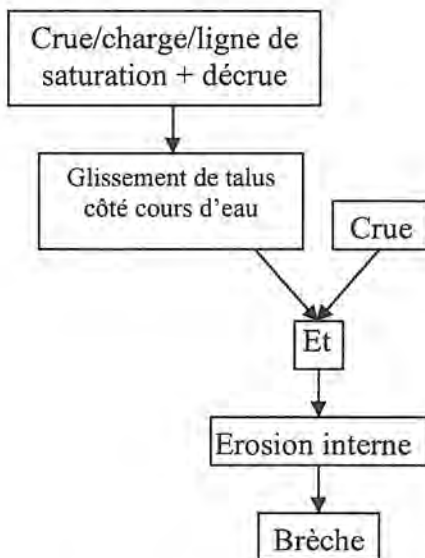
Pour le profil 2 :

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

Pour le profil 1 :

Fonctions	Composants
Stabilité	Tous
Résistance à l'érosion interne	Tous

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



Pour le profil 3 :

Fonctions	Composants
Stabilité	Tous
Résistance à l'érosion interne	Tous

Pour le profil 2 :

Fonctions	Composants
Stabilité	Tous
Résistance à l'érosion interne	Tous

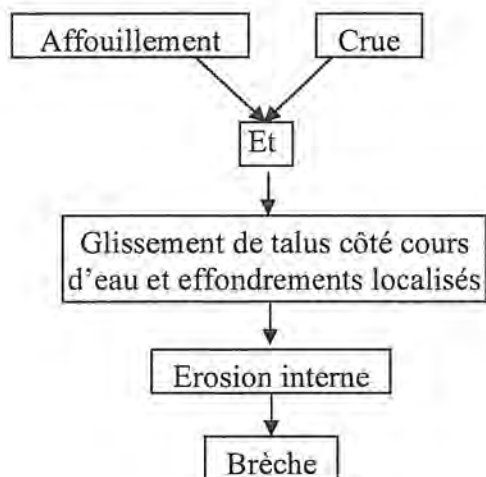
Pour le profil 1 :

Fonctions	Composants
Stabilité	Tous
Résistance à l'érosion interne	Tous

Nota : Dans la méthodologie CarDigue, le scénario 3.b n'est pas considéré directement mais comme mécanisme élémentaire d'un scénario de défaillance de type affouillement décrit ci-après.

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

4 - Rupture par érosion externe avec Glissement puis érosion interne



Pour le profil 3 :

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

Pour le profil 2 :

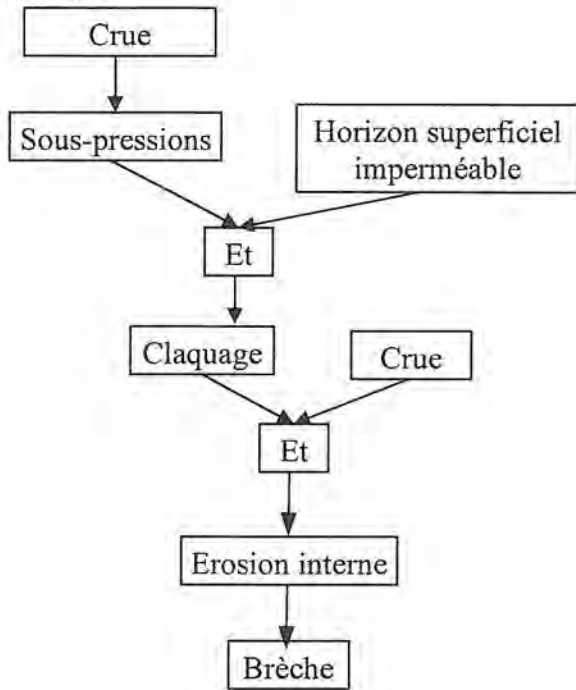
Fonctions	Composants
Résistance à l'érosion externe	Para fouille
Stabilité	Tous
Résistance à l'érosion interne	Tous

Pour le profil 1 :

Fonctions	Composants
Stabilité	Tous
Résistance à l'érosion interne	Tous

## 1.5 - Arbre de défaillance du scénario de rupture par soulèvement hydraulique

### 5 – Rupture par soulèvement hydraulique



Pour le profil 3 :

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

Pour le profil 2 :

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

Pour le profil 1 :

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

## 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 classe A 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. 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 les levées de Tours, cela représente, 1176 tronçons étudiés pour Tours et 1593 pour l'Authion. Les profils topographiques représentatifs de ces tronçons, positionnés en leur milieu, sont établis de manière systématique sur le linéaire du système d'endiguement étudié. Le premier profil se trouve au PR 0.000 (le linéaire associé au premier tronçon est donc de 25 m), le deuxième au PR 0.050 et ainsi de suite.

La figure ci-dessous présente les points définissant la topographie de la digue.

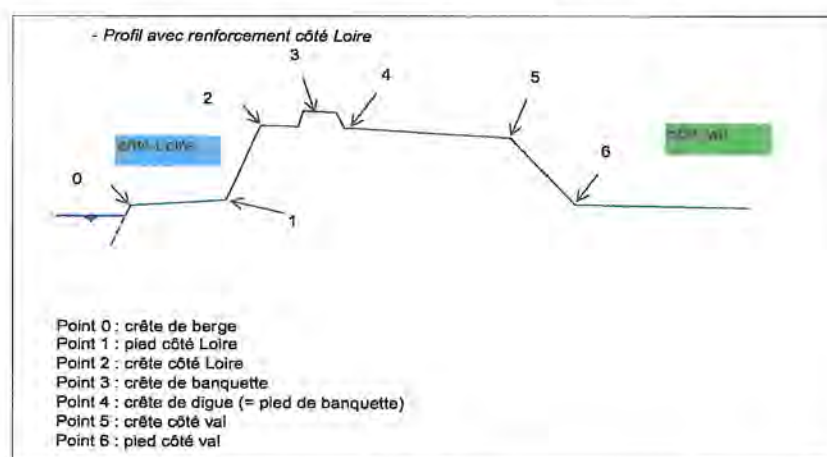


Figure 2 : Profil topographique type des digues de Loire présentant les points caractéristiques utilisés dans la méthodologie CARDigue

Les données nécessaires à l'alimentation du logiciel CARDigue sont de nature très variées (coordonnées X, Y, Z des points de chaque profil, code profil, codification des désordres, des renforcements présents...) et nécessite 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.

Les résultats sont présentés dans l'**annexe n°24** de l'*Etude de dangers du Val considéré* sous la forme :

- d'une fiche par profil en travers
- d'une synthèse cartographique à l'échelle du système d'endiguement du Val

L'utilisation des probabilités nécessite d'affecter à des valeurs qualitatives d'aléas, des valeurs quantitatives de probabilité. Dans le cas de l'étude de dangers des vals de classe A, l'affectation retenue est la suivante :

Tableau 1: Correspondance entre probabilité qualitative et quantitative retenue pour l'aléa rupture de digue

Aléa	Probabilité qualitative	Probabilité quantitative	
Négligeable	Extrêmement peu probable	0.0001	$10^{-4}$
Faible	très improbable	0.001	$10^{-3}$
Moyen	improbable	0.01	$10^{-2}$
Fort	Peu probable	0.1	$10^{-1}$
Très fort	Probable	0.3	$3 \times 10^{-1}$
Certain	sûr	1	1

## 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 danger, 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 s'écrire suivant la formule suivante :

$$(P_{\text{rupture}})_{oi} = [1 - ((1 - P(s)) \times (1 - P(ei)) \times (1 - P(ee)) \times (1 - P(g)) \times (1 - P(sh)))] \quad (2)$$

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 (ce qui est appuyé par l'étude des brèches historiques cf. Annexe 18 de l'Étude de dangers), le phénomène de glissement de talus nécessite de l'érosion interne pour aboutir à une rupture. De même l'érosion externe du pied de levée (affouillement) devra mobiliser le glissement de talus côté rivière et 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 d'endiguement, 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 que ladite crue soit dépassée. Ainsi :

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

Dans le cadre de cette étude de danger, 7 situations hydrauliques issues de la modélisation hydraulique 1D de la Loire, ont été utilisées (cf. rapport LR Blois « Modélisation hydraulique unidimensionnelle de la Loire au droit du Val », présenté en annexe 6 de l'Etude de Dangers du Val correspondant). De même pour le Cher où 4 situations hydrauliques ont été prises en compte. Afin de déterminer des probabilités annuelles de ruptures confondues, nous avons choisi, d'affecter à chaque crue un intervalle de l'espace probabiliste. Le choix retenu pour ces intervalles est présenté dans le tableau ci-dessous :

Tableau 2: Discrétisation retenue de l'espace probabiliste en fonction des crues considérées pour la Loire

Crues Qi considérées	Représentative de la crue Qa à la crue Qb		Probabilité annuelle qu'une crue comprise entre Qa et Qb soit dépassée $P(Q_i) = 1/a-1/b$
	Qa	Qb	
Q50	Q30	Q60	0.0166667
Q70	Q60	Q90	0.0055556
Q100	Q90	Q135	0.0037037
Q170	Q135	Q190	0.0021442
Q200	Q190	Q315	0.0020886
Q500	Q315	Q800	0.0019246
Q1000	Q800	Qinfini	0.0012500

Nota : le choix des limites des intervalles a été fait arbitrairement de manière à ce que la probabilité annuelle de chaque intervalle soit décroissante avec la période de retour de la crue considérée.

Pour le Cher, compte tenu des difficultés de calage entre les débits et les périodes de retour des crues, le choix a été fait d'associer les débits à des plages de période de retour, selon le tableau ci-dessous :

Tableau 3: Discrétisation retenue de l'espace probabiliste en fonction des crues considérées pour le Cher

Débits considérés (m³/s)	Représentative de la crue Qa à la crue Qb		Probabilité annuelle qu'une crue comprise entre Qa et Qb soit dépassée $P(Q_i) = 1/a-1/b$
	Qa	Qb	
1000	Q30	Q70	0,0190476
1200	Q70	Q170	0,0084034
1500	Q170	Q500	0,0038824
1700	Q500	Qinfini	0,0020000



Pour la digue du canal, dans le Val de Tours, les situations hydrauliques dépendant des probabilités de rupture des systèmes d'endiguement côté Loire et côté Cher, il n'a pas été calculé une probabilité annuelle 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 :

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

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

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

La figure ci-dessous illustre la discrétisation effectuée pour le système d'endiguement côté Loire. Sur ce graphique, l'aire hachurée en noire représente l'aléa annuel de rupture associé à la crue Q500.

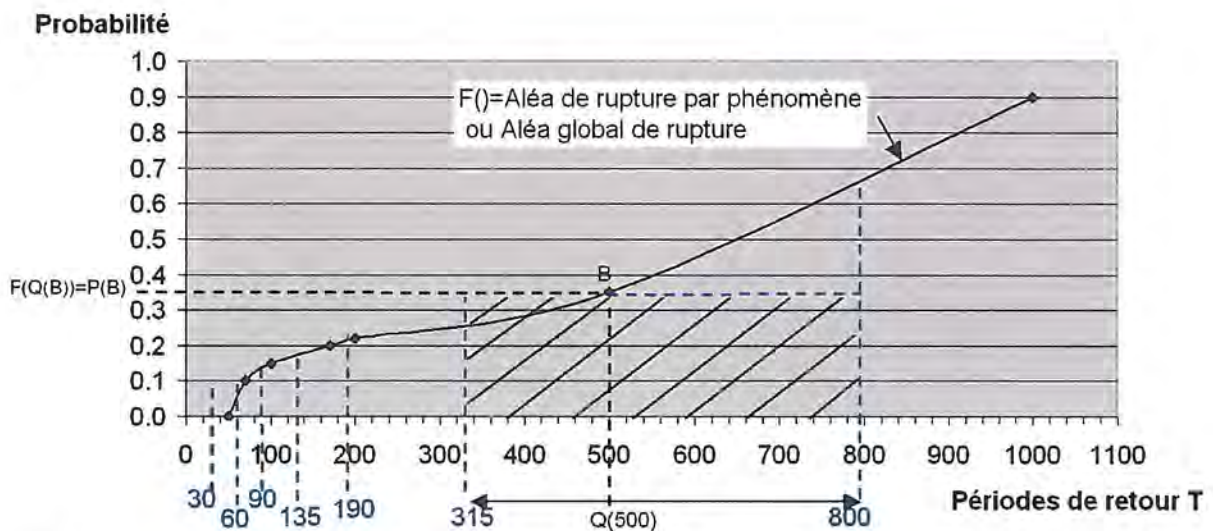


Figure 3 : Graphe indiquant le principe retenu dans l'étude de dangers pour la discrétisation de l'espace probabiliste

#### 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 :

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

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

Remarque :

Sur le graphe de la figure 2, l'aléa annuel global représente la somme des aires hachurées propres à chaque crue considérée, avec  $F()$  représentant l'aléa global de rupture.

Les paragraphes ci-après présentent, pour chaque scénario de rupture, les hypothèses faites, les critères pris en compte ainsi que leurs justifications pour le calcul des probabilités associées.

## 2.2 - Phénomène (scénario) de surverse

Le phénomène de surverse intervient lorsque le niveau de la ligne d'eau en crue dépasse le niveau du sommet de la digue. Sur la Loire, ce phénomène est inéluctable, aucune levée n'est suffisamment haute pour être à l'abri d'un événement rare, exceptionnelle ou encore extrême (selon la dénomination CFBR 2010). La seule variable suivant les systèmes d'endiguement est le débit pour lequel ce phénomène se produit.

### 2.2.1 - Probabilité d'apparition d'une surverse $P(sa)$

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

Nous avons considéré deux hauteurs caractéristiques :

- **la hauteur de surverse  $H_s$**  (quand l'eau dépasse la crête de digue\*): 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 la crête de digue\*): différence entre la cote du sommet de la digue et la ligne d'eau

\* Dans le modèle CARDigue, la crête de digue est le point 4 présenté sur la figure 1.

Lorsque la hauteur de revanche  $H_r$  est supérieure à 0,5 m, nous avons considéré qu'aucune surverse ne pouvait subvenir.

Entre  $0,0 \text{ m} < H_r < 0,5 \text{ m}$ , compte tenu des incertitudes du modèle hydraulique, des données topographiques et des effets non pris en compte sur la ligne d'eau (vent, embâcle, etc.), nous avons considéré la surverse possible mais peu probable.

Les études sur les brèches historiques des levées d'Orléans, Tours et de l'Authion ont démontré que les banquettes construites en crête côté Loire après la crue de 1846 n'ont pas apporté de plus-value sur la résistance à la surverse des levées. Lors des crues de 1856 et 1866 les levées ont rompu avec une charge de l'ordre de 20 cm au-dessus de la crête de digue hors banquette, quelle que soit la situation, avec ou sans banquette.

Les banquettes côté Loire sont donc prises en compte dans l'apparition de la surverse uniquement jusqu'à une certaine hauteur appelée hauteur d'influence de la banquette et notée  $H_{ib}$ . La présence de banquette côté Loire aura donc un impact sur la probabilité d'apparition d'une surverse si la hauteur de surverse est inférieure à la hauteur d'influence de la banquette  $H_{ib}$  retenue (soit 0,20 mètre) pour l'EdD des vals de classe A.

La figure ci-dessous présente le logigramme appliquée pour déterminer la probabilité d'apparition de la surverse.

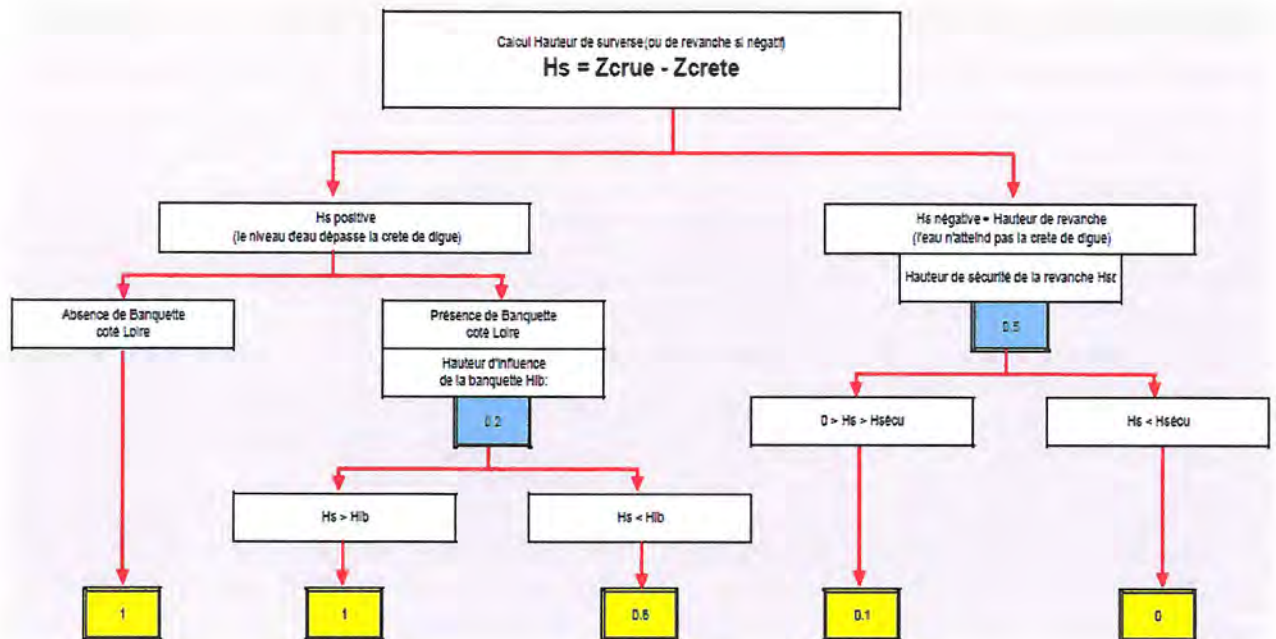


Figure 4 : Logigramme de détermination de la probabilité d'apparition de la surverse

Lorsque Hs est :

- comprise entre 0 et 0,20 mètre,  $[0.00 \text{ m} < Hs < 0.20 \text{ m}]$  et présence de banquette, la probabilité de surverse devient probable,  $P(Sa)=0,8$
- supérieure à 0,00 mètre,  $[Hs > 0.00 \text{ m}]$  en l'absence de banquette, la probabilité est considérée comme certaine,  $P(Sa)=1$
- supérieure à 0,20 mètre,  $[Hs > 0.20 \text{ m}]$  quelque soit la situation la probabilité est considérée comme certaine,  $P(Sa)=1$ .

Tableau 4: Critère pris en compte et probabilités  $P(Sa)$  associées à l'apparition de la surverse

Hauteur de surverse $\Delta h = Z_{crue} - Z_{crite}$	Conditions	$P(Sa)$	Observations
$H_r > 0.50 \text{ m}$	Toutes	0	Aucune surverse
$0.50 \text{ m} > H_r > 0.00 \text{ m}$	Toutes	0.1	Possibilité de perturbations et erreurs de modélisation
$0.00 \text{ m} < H_s < 0.20 \text{ m}$ avec banquette	Avec banquette	0.8	
$0.00 \text{ m} < H_s < 0.20 \text{ m}$ sans banquette	Sans banquette	1	
$0.20 \text{ m} < H_s$	Toutes	1	

## 2.2.2 - Probabilité de rupture en cas de surverse P(s<sub>r</sub>)

La probabilité de rupture en cas de surverse P(S<sub>r</sub>) 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.

Pour la rupture par surverse, nous avons considéré :

- 3 cas où la probabilité brute de rupture sera fixe, quelque soit la présence ou non d'éléments aggravants ou stabilisants :
  - en cas d'absence de surverse,
  - en cas de présence d'un déversoir
  - en cas de présence de banquettes 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.

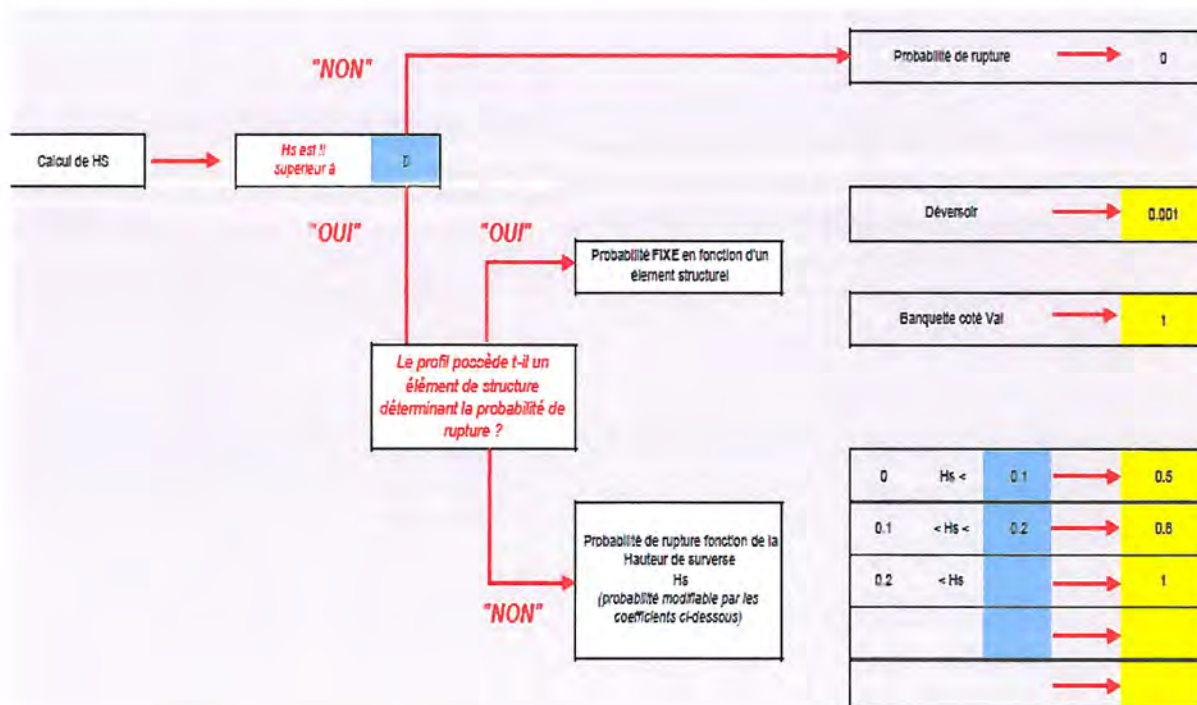


Figure 5 : Logigramme de détermination de la probabilité de rupture de la surverse

Cas de probabilité fixe de rupture par surverse :

Lorsque le niveau de la crue ne dépasse pas la crête de digue ( $H_s < 0$ ), nous avons considéré que la rupture par surverse ne pouvait pas se produire. Une probabilité  $P(Sr)=0$  a donc été retenue.

Remarque : en réalité, il est laissée la possibilité de définir une hauteur de revanche critique en deçà de laquelle la probabilité ne sera plus considérée comme nulle.

La présence de banquettes côté val a été considérée comme un facteur aggravant majeur. En effet, si la levée dispose d'une banquette côté val, les écoulements en cas de surverse sont concentrés dans des barbicanes et l'effet de cette concentration est 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,  $P(Sr)=1$  en cas de présence de banquettes en crête de digue côté val.

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  $P(Sr)=0,001$ .

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 $\Delta h = Z_{crue} - Z_{crête}$	$P_b(Sr)$
$0 < H_s < 0.10$ m	0.5
$0 < H_s < 0.20$ m	0.8
$0.20$ m $< H_s$	1

Nous avons considéré qu'une surverse étendue de plus de 0,20 mètre de hauteur ( $H_s > 0,20$  m) allait engendrer 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 nous permet de penser qu'il en sera autrement. La probabilité associée à ce cas est donc  $P(Sr)=1$

Facteurs influençant la probabilité de rupture par surverse :

Les facteurs pris en compte sont :

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

La largeur du sommet de la levée joue un rôle important, il en est tenu compte par le biais d'un coefficient  $C_1$  :

Largeur en tête de la levée	Coefficient $C_1$
$0 \text{ m} < L < 30 \text{ m}$	1
$30 \text{ m} < L < 40 \text{ m}$	0.8
$40 \text{ m} < L < 50 \text{ m}$	0.5
$50 \text{ m} < L < 100 \text{ m}$	0.1
$100 \text{ m} < L$	0.01

La pente de la levée côté val joue aussi un rôle important, il en est tenu compte par le biais d'un coefficient  $C_2$  :

Pente du talus côté val	Coefficient $C_2$
$0^\circ < L < 10^\circ$	0.5
$10^\circ < L < 22^\circ$	0.8
$22^\circ < L$	0.1

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 et limite d'érosion ; il en est tenu compte par le biais d'un coefficient  $C_3$ , fonction de la hauteur du matelas d'eau présent.

Ce cas survient dans le val d'Orléans lors des inondation par remous de la partie aval du Val:

Hauteur d'eau en pied côté val	Coefficient $C_3$
$0^\circ < h_{\text{eau val}} < 0,5^\circ$	0.9
$0,5^\circ < h_{\text{eau val}} < 1,0^\circ$	0.7
$1,0^\circ < h_{\text{eau val}} < 2,0^\circ$	0.5
$2,0^\circ < h_{\text{eau val}}$	0,1

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. Le coefficient  $C_4$  permet d'en tenir compte (voir tableau en dessous).

Facteurs aggravants sur le talus côté val	Coefficient $C_4$
Décapage du tapis végétal	1.3
Présence d'obstacle	1.3
Décapage et présence d'obstacle	1.5

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

$$P(S_r) = P_b(S_r) \times C_1 \times C_2 \times C_3 \times C_4 \quad (6)$$

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

### 2.2.3 - Aléa de rupture par surverse P(s)

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

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



## 2.3 - 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, la communauté scientifique (ICOLD 2012) considère actuellement 4 mécanismes 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 différentes. Les écoulements dans les sols plus grossiers et parallèles à l'interface, entraînant 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 lutte 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 traversants présents dans la digue. La présence de ces facteurs aggravants 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 méthodes simples pour caractériser cette érosion.

Dans le cadre des études de dangers des digues de classe A, 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. S'agissant de digue de lutte contre les inondations, le caractère transitoire de la crue est un facteur très important. Nous avons voulu en tenir compte en pondérant les gradients moyens classiquement utilisés (coefficient de Bligh) à l'aide de coefficients correcteurs tenant compte du temps d'exposition de la digue à la crue (fonction du limnigramme de la crue considérée).

La probabilité de rupture quant à elle sera liée à la capacité qu'aura 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.

### 2.3.1 - Probabilité d'apparition d'érosion interne $P(ei_a)$

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.

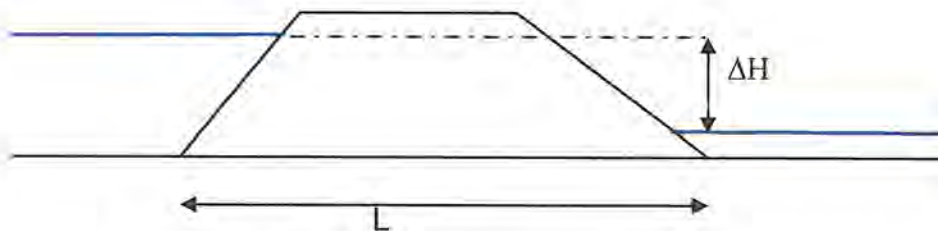


Figure 6 : Schéma de principe pour le calcul du gradient hydraulique de Bligh

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  $\Delta H$  (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 ci-dessus).

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

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

Cette méthode très simpliste permet de déterminer un coefficient de Bligh brut à l'aide de la formule (9) en se basant sur les données géométriques de la digue obtenues d'après le levé topographique Lidar réalisés en 2002-2003 et sur les lignes d'eau des modélisations hydrauliques 1D.

Ce coefficient de Bligh est ensuite corrigé par des coefficients prenant en compte le profil type de la levée (trois profils type ont été définis), le temps de mise en charge de la digue lors de la crue et de singularités présentes dans la digue (maisons encastrées, terriers, végétation, canalisation, écran étanche).

Ces coefficients correcteurs ont été déterminés par une méthode de comparaison des structures de la digue mise au point pour cette étude de dangers (Maurin, 2011). Elle est basée sur la loi de Darcy et est présentée dans l'encart ci-dessous.

**Méthode de comparaison des structures de la digue**

Les circulations d'eau dans les sols saturés sont régies par la Loi de Darcy qui s'écrit :

$$Q = K S \frac{\Delta h}{d}$$

Formule dans laquelle :

*K* est la perméabilité du sol (m/s)

*S* est la section de sol considéré (m<sup>2</sup>)

$\Delta h$  est la différence de hauteur d'eau entre l'amont et l'aval de la digue (m)

*d* est la distance entre le point d'entrée et le point de sortie de l'eau (m)

La valeur  $\Delta h / d$  se nomme gradient hydraulique (sans dimension)

La vitesse de déplacement de l'eau dans le sol s'écrira :

$$V = \frac{Q}{S} = K \frac{\Delta h}{d}$$

Formule dans laquelle : *V* est la vitesse moyenne de l'eau au travers de la surface *S* (m/s)

La distance *L* que parcourt l'eau dans un laps de temps *t* dans un matériau poreux de perméabilité *K* va donc s'écrire :

$$L = t V = t \frac{K \Delta h}{d}$$

Formule dans laquelle : *L* est la distance parcourue par l'eau (m) et *t* est le laps de temps considéré (s)

Dans le cas d'une digue de protection contre les inondations,  $\Delta h$  est une fonction du temps *t* puisque le régime est non permanent. Cette fonction en un point donnée de la digue est le limnigramme de la crue qui dépasse en altitude ce point. Le temps d'application de la charge hydraulique débute en un instant *t*<sub>0</sub> et se termine en un temps *t*<sub>1</sub>. Le temps *t*<sub>0</sub> correspond au début d'immersion du point considéré et le temps *t*<sub>1</sub> correspond à sa fin d'immersion.

La formule s'écrit donc ainsi :

$$L = \int_{t_0}^{t_1} K \frac{\Delta h(t)}{d} dt$$

Pour avoir un renard hydraulique il faut que l'eau soit capable de trouver un chemin par lequel elle sera capable de traverser la digue ou sa fondation. Pour ce faire, elle traverse un ou plusieurs horizons de sol, qui ont chacun des caractéristiques différentes et notamment une perméabilité propre. Pour un ouvrage donné et une crue donnée (caractérisée par un limnigramme), il est donc possible avec la formule ci-dessus de déterminer une longueur critique  $L_{cri}$  représentant la distance parcourue par l'eau pendant la durée de la crue ( $t_1-t_0$ ) dans un sol de perméabilité  $K$ .

$$L = \int_{t_0}^{t_1} K \frac{\Delta h(t)}{d} dt$$

La valeur donnée par la formule est déterminée par le limnigramme de la crue. Sur la Loire, nous avons considéré le limnigramme de crue modélisée Q500 au Bec d'Allier et nous avons fait une intégration numérique pour obtenir une fonction de  $H_{max}$  (hauteur de charge maximale entre le pied de digue et le niveau au plus haut de la crue) . Cette valeur, pour la Loire, a pu être intégrée graphiquement

Pour un profil de digue déterminé, en fonction des couches de sols présentes et des éléments influençant le parcours de l'eau (canalisation, terriers, maisons encastrées, écran étanches...), il est possible de calculer la longueur  $L$  représentant le chemin de l'eau le plus probable, à travers les différentes couches de sols.

Le ratio  $L/L_{cri}$  est représentatif de la capacité de l'ouvrage à résister à une apparition de l'érosion interne. Ce ratio est toutefois une valeur très optimiste d'une sécurité, par contre, il permet de comparer les différents profils de digues, éventuellement la performance d'une réparation ou la pénalisation d'une défaillance ou d'un cas particulier.

La comparaison avec les valeurs des coefficients de Bligh brut et les rapport  $L/L_{crit}$  obtenus avec cette méthode a permis d'établir les coefficients correcteurs appliqués dans le modèle CARDigues.

Cette méthode ne permet pas de donner un coefficient de sécurité sur la résistance de la digue car cela supposerait de connaître parfaitement les perméabilités rencontrées dans chacun des horizons de sol sur le chemin de l'eau. Or si la perméabilité d'un matériau peut être connue en laboratoire ou in situ avec des essais spécifiques, on est loin de connaître l'ensemble des perméabilités et notamment celles de contact et celles des anomalies (racines, canalisations, ouvrages inclus, fissures de déstabilisation dans le sol, etc.). La perméabilité est couramment susceptible de varier d'une puissance de 10.

Les trois profils en travers type considérés dans ces calculs sont précisés ci-dessous. Ils sont issus des constatations faites lors des nombreuses études géotechniques et des renforcements généralisés mis en œuvre depuis les années 1970.

Coupe type de la levée, non renforcée

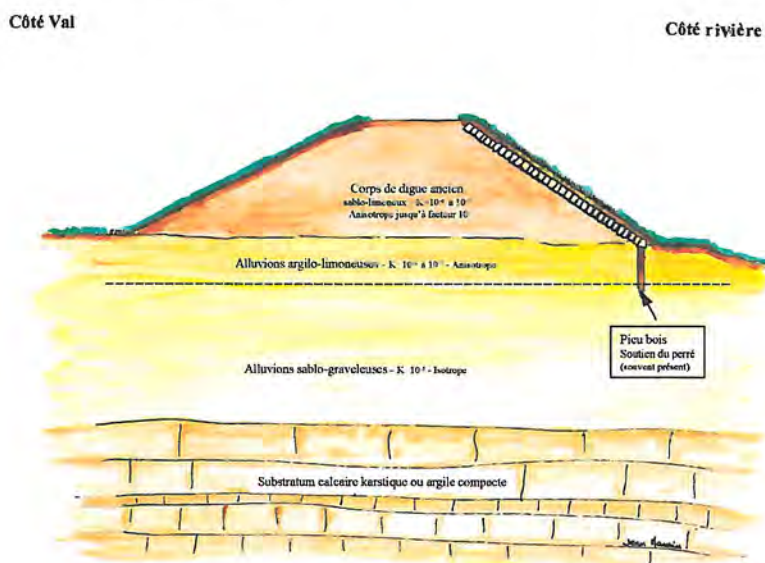


Figure 7 : Coupe type des levées de Loire – Profil Non Renforcé (dessin de Jean Maurin)

Coupe type de la levée, renforcée côté rivière

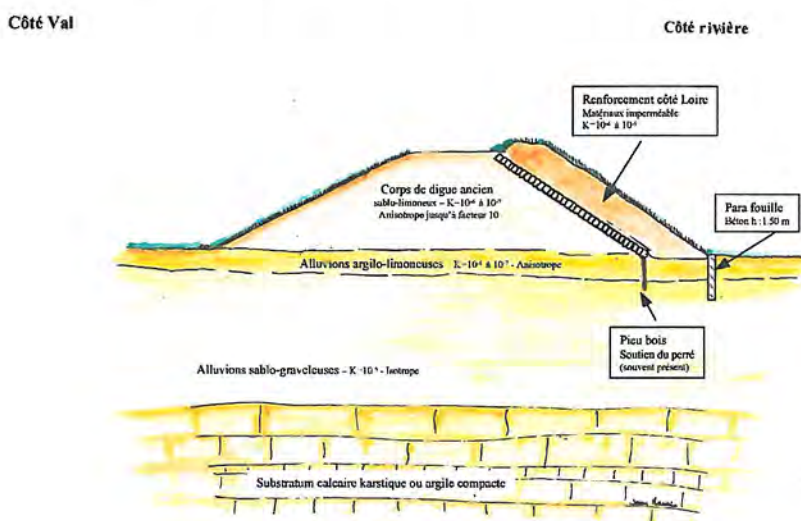


Figure 8 : Coupe type des levées de Loire – Profil Renforcé côté cours d'eau (dessin de Jean Maurin)

**Coupe type de la levée en contact, renforcée en pied et côté val**

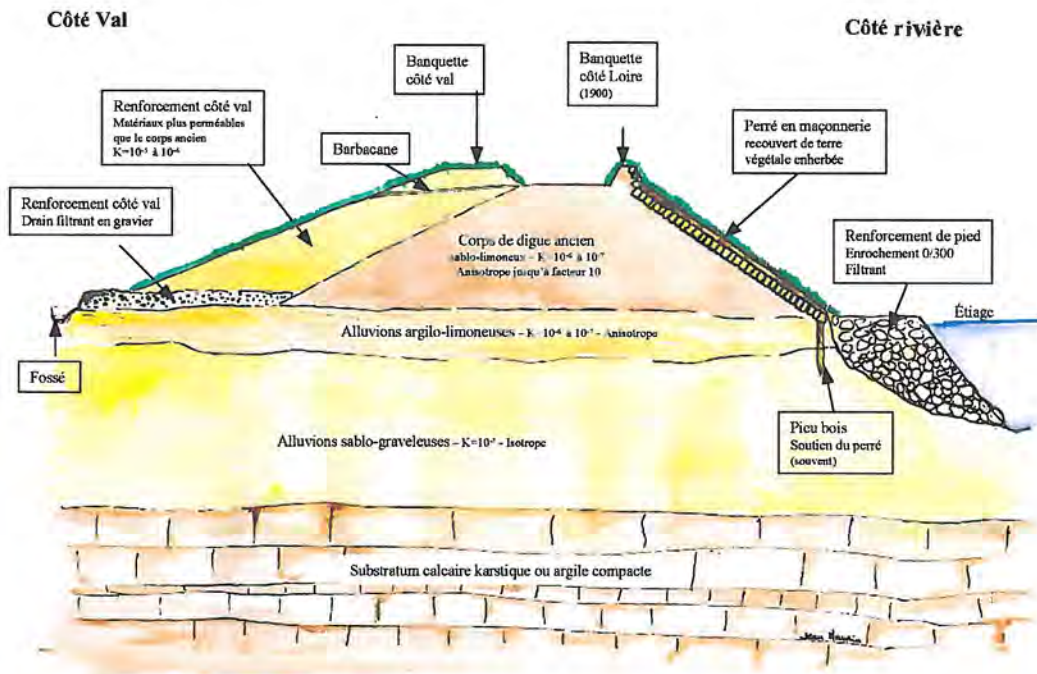


Figure 9 : Coupe type des levées de Loire – Profil Renforcé côté Val (dessin de Jean Maurin)

L'appartenance à l'un des 3 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.

La présence « d'anomalies » listées dans le tableau 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 des données sur les renforcements (en ce qui concerne la présence d'écran étanche).

Tableau 5: Coefficients correcteurs appliqués aux coefficients de Bligh brut

Facteurs modifiant le coefficient de Bligh brut	coefficients		
	F1 : Digue non renforcée	F2 : Digue renforcée côté Loire	F3 : Digue renforcée côté Val
Profil de base	1	1	1
Présence de Maison encastrée Côté Val	0.8	1	1
Présence de Maison encastrée Côté Loire	0.8	1	1
Présence de Maison encastrée des deux cotés	0.8	1	1
Présence de terriers non traversant - position haute	0.08	0.09	0.15
Présence de terriers non traversant - position moyenne	0.07	0.09	0.1
Présence de terriers non traversant - position basse	0.06	0.08	0.09
Présence de terriers non traversant	0.70	0.90	0.90
Présence de terriers traversant	0	0	0
Végétation ligneuse isolée	0.6	0.8	0.8
Végétation ligneuse clairsemée	0.4	0.6	0.65
Végétation ligneuse généralisée	0	0.2	0.2
Absence d'horizon argilo-limoneux en couche d'assise	0.78	0.78	0.78
Présence d'une paroi étanche	10000	10000	10000

Les cas particuliers sont calculés par multiplication d'un coefficient correcteur du coefficient de « Bligh brut » lié à chaque profil type. Ces coefficients sont inférieurs à 1 s'il s'agit d'une anomalie (facteur aggravant) et supérieur à 1 s'il s'agit d'une amélioration vis à vis de l'apparition de l'érosion interne. En l'occurrence la seule amélioration rencontrée sur les levées de classe A est la présence d'une paroi étanche.

#### Précision sur les canalisations :

La présence de canalisation traversante sur un tronçon est issue du recensement et s'il existe, d'un repérage X, Y et Z 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 vals de classe A, nous avons 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 XX<sup>e</sup> siècle) est intégrée par un coefficient correcteur. 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.

Nous avons considéré que les racines de l'arbre forment une zone de forte perméabilité globale de  $10^{-2}$  m/s avec une emprise de 15 mètres de diamètre et qu'elle est en communication avec la couche d'alluvions de perméabilité de  $10^{-5}$  m/s, quel que soit le côté de la digue où se situe la végétation. Trois types de végétation ligneuse ont été considérées :

- **végétation isolée**
- **végétation clairsemée**
- **végétation généralisée**

#### Précisions sur les terriers d'animaux fouisseurs :

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.

#### Précisions sur les brèches :

La présence d'ancienne brèche est prise en compte d'une façon globale car la présence de réparations anciennes est difficilement décelable. Le nombre de brèches de 1846, 1856 et 1866 sur l'ensemble des levées de la Loire est de l'ordre de 400 avec une longueur moyenne de brèche de l'ordre de 400 m qui représente une longueur de 160 km sur 520 km de digue soit 30% du linéaire pour le seul XIX<sup>e</sup> siècle alors qu'on sait que les crues destructrices du XVIII<sup>e</sup> siècle ont été au nombre de 7 et que les siècles précédents ont été aussi destructeurs.

La probabilité de se situer dans une ancienne brèche ou à proximité est donc très forte.

Notons que la présence d'ancienne brèche sur un profil est localement prise en compte par des hauteurs supérieures de la levée du fait de la présence des anciennes fosses d'érosion qui constituent des dépressions dans le val.



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.

D'autres facteurs favorisant l'apparition de l'érosion interne peuvent être intégrés. Ainsi, une fuite repérée lors de visite d'inspection traduit une apparition certaine d'un écoulement interne.

Sur la base de ces calculs du coefficient de Bligh et compte tenu de la nature des matériaux constituant la plus grande partie des digues des vals de classe A (sable fin silteux) et leur fondation (limons), des gradients critiques  $i_c$  ou coefficient  $c$  définis par Bligh en fonction de la nature des sols, nous avons considéré l'échelle de probabilité suivante pour établir des probabilités d'apparition du phénomène d'érosion interne :

Intervalles du critère de Bligh		Proba
l'eau n'atteint pas la cote du pied de digue coté Val		0
0 < Bligh < 6	→	1
6 < Bligh < 7	→	0.7
7 < Bligh < 8	→	0.3
8 < Bligh < 9	→	0.1
9 < Bligh	→	0.01

Figure 10 : Intervalles sur le critère de Bligh pris en compte pour la probabilité d'apparition de l'érosion interne

### 2.3.2 - Probabilité de rupture en cas d'érosion interne P(ei.)

Dans notre méthodologie, 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, nous avons considéré que la probabilité de rupture en cas d'apparition d'érosion interne pouvait être influencée par :

- la présence de dispositifs de drainage et/ou de filtres
- 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 traversants ou de canalisations traversantes.

Des coefficients réducteurs (du coefficient par défaut de 1) sont donc utilisés pour tenir compte des éléments de structures de l'ouvrage et des actions qui pourront être menées par le gestionnaire en cas de crue. Les éléments pris en compte sont listés ci-après.

- Structure de la levée :

- Présence d'un drain filtrant (tapis drainant) :  $C_1 = 0.1$
- Présence d'une recharge aval (urgent)  $C_1 = \text{à déterminer}$
- Présence d'un puits drainant  $C_1 = \text{à déterminer}$

L'identification de ces éléments structurels de l'ouvrage est fournie par le gestionnaire ou issue des données sur les renforcements des digues de Loire.

- Gestion de l'ouvrage en crue :

- Absence de surveillance et/ou organisation non adaptée  $C_2 = 1$
- Surveillance mais organisation non adaptée  $C_2 = 0.9$
- Surveillance et organisation adaptée  $C_2 = 0.5$
- Surveillance et organisation renforcée  $C_2 = 0.1$

Ces coefficients sont issus de l'analyse du chapitre 4 de l'étude de dangers relatif à la gestion de la sécurité.

Présence d'ouvrages traversants :

La présence d'un défaut localisé tel que les canalisations ou les terriers d'animaux fouisseurs traversants, est prise en compte par l'adjonction d'un coefficient  $C_3$ . Pour les vals de classe A, ce coefficient 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 :

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

### 2.3.3 - Aléa de rupture par érosion interne $P(ei)$

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

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

## 2.4 - 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.

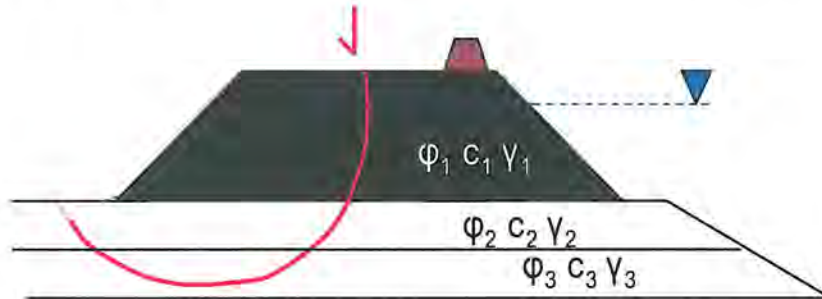


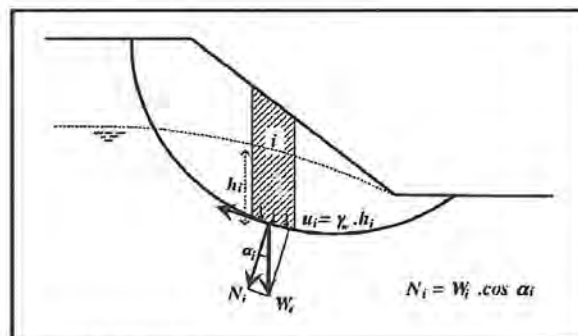
Figure 11 : Schéma de principe d'un glissement de talus sur une digue côté val

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).

### 2.4.1. 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, selon la méthode de Bishop en considérant une rupture de type circulaire.



$W_i$  : poids de la tranche  $i$   
 $\alpha_i$  : angle de la normale à la base de la tranche  $i$  avec la verticale  
 $u_i$  : pression interstitielle à la base de la tranche

Figure 12 : 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.

Afin de disposer d'un facteur de sécurité pour chaque profil du val, en tenant compte des caractéristiques topographiques, géologiques et géotechniques au droit de ces profils, des hypothèses simplificatrices ont été prises en comptes et une étude paramétrique a permis de disposer de fonctions reliant le facteur de sécurité F à la hauteur de charge considérée.

L'étude paramétrique a été établie uniquement pour les digues de Loire par le LR d'Angers dans le cadre des études de dangers. Cette étude est présentée en annexe B du présent rapport. Elle a été menée aux États Limites Ultimes selon les recommandations établies en juin 2010 par le CFBR (CFBR, 2010). Les jeux de facteurs partiels utilisés sont ceux des situations exceptionnelles de crue (pondération de 1,1 de C' et  $\tan\phi'$  et coefficient de modèle  $\gamma_d=1,2$ )

Compte tenu des nombreuses observations et études sur les digues de la Loire moyenne (cf. recensement des données géotechniques et géophysiques en annexe A), cette étude considère une digue en limon sablo-argileux, reposant sur une couche de limon, de sable ou d'argile comme illustrée sur la figure ci-dessous.

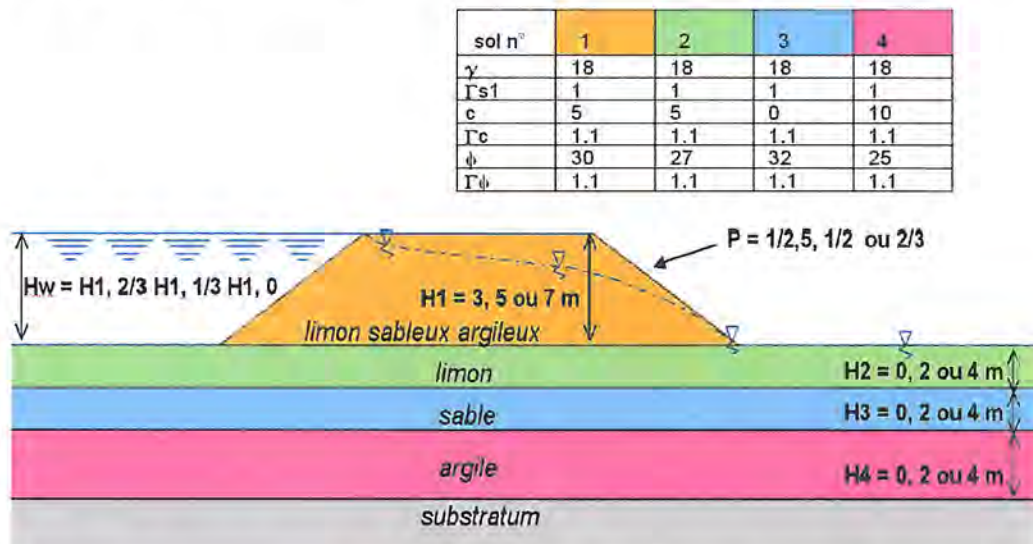


Figure 13 : Modèle géotechnique de la digue et cas étudiés de l'étude paramétrique

Les paramètres de l'étude ont été :

- la pente des talus : 1V/2,5H ou 1V/2H ou 2V/3H
- la hauteur H1 de la digue : 3m, 5m ou 7m
- la nature de la couche d'assise : sable, limon ou substratum
- la hauteur d'eau à l'amont : H1, 2/3H1, 1/3H1 ou 0

Ainsi, pour chaque combinaison des paramètres ci-dessus, un facteur de sécurité F a été déterminé. Un exemple de résultat est présenté ci-dessous.

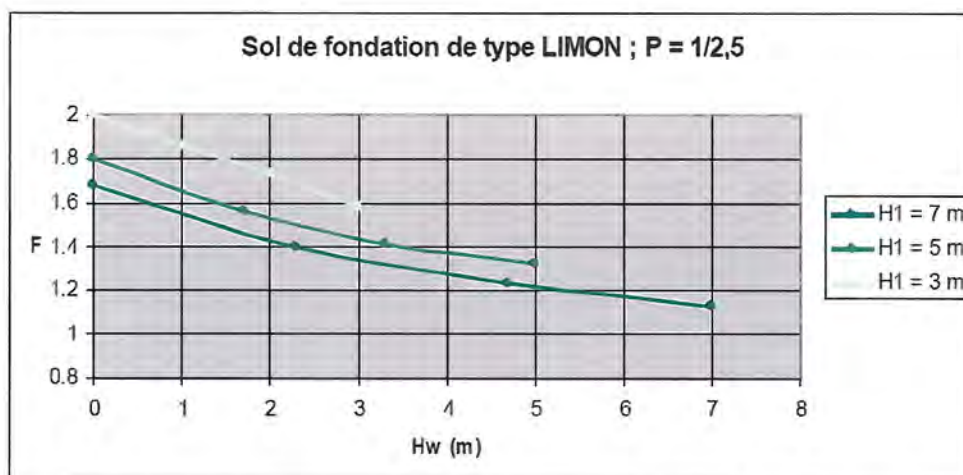


Figure 14 : Résultats de l'étude paramétrique : facteur de sécurité F en fonction de la hauteur de charge, dans le cas d'une digue de Loire de pente 1V/2,5H reposant sur une couche de limon

Les équations de différentes courbes de résultats ont ensuite été obtenues et entrées dans le modèle CARDigue ce qui permet, pour chaque profil rattaché à un cas d'étude, de renvoyer le coefficient de sécurité en fonction du niveau de crue considéré.

Pour le rattachement des profils au cas étudiés, les données géométriques (hauteur H1 de la digue, pente des talus) sont issues des données topographiques et les données géologiques (nature et épaisseur des couches d'assise) sont issues d'une modélisation effectuée sur tout le linéaire de digue, en fonction des données de sondages existantes (voir section sur le soulèvement hydraulique et l'annexe C).

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 15 : 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 côté Val améliore le facteur F. Pour prendre en compte ce fait, si le profil dispose de renforcement de pied de type chemin en enrochements, 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 seront traités sans calculer le facteur F. Pour tenir compte du soutien qu'apportent ces structures au talus de digue, on utilise directement une valeur de probabilité d'apparition fixe (souvent très faible et prise égale à 0 pour les digues de classe A). Il en est de même pour les digues de faibles hauteurs ou les talus de faible pente, nous avons considéré que l'apparition d'un glissement ne pouvait pas survenir et avons affecté une probabilité fixe nulle.

### 2.4.2 - 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 érosion interne de ce profil, que l'on majore 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 l'intermédiaire d'un coefficient multiplicateur fixe C1 de la probabilité associée à l'aléa de l'érosion interne  $P(e_i)$
- soit par surclassement de la probabilité associée à l'apparition de l'érosion interne  $P(e_{i_a})$  selon le tableau présenté ci-dessous.

Risque	Probabilités qualitatives	Proba "érosion interne" $P(e_{i_a})$	$P(g_r)$
Nul	quasi-nulle	0 < P < 0.0001	0.0001
Négligeable	extrêmement peu probable	0.0001 < P < 0.001	0.001
Faible	peu probable	0.001 < P < 0.01	0.01
Moyen	improbable	0.01 < P < 0.1	0.1
Fort	peu probable	0.1 < P < 0.3	0.3
Très fort	probable	0.3 < P < 1	1
Certain	Sûr	P = 1	1

Figure 16 : Probabilité de rupture par glissement côté Loire obtenue par majoration de la probabilité d'apparition de l'érosion interne

Pour les digues de classe A, nous avons retenu un coefficient fixe C1 de 1,1.

### 2.4.3 - Aléa de rupture par glissement de talus $P(g)$

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

$$P(g) = P(g_a) \times P(g_r) \tag{12}$$

## 2.5 - Phénomène (scénario) d'érosion externe (affouillement)

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

- au niveau du talus côté cours d'eau ;
- au niveau du pied de levée côté cours d'eau lorsque celui-ci est en contact avec le lit vif de la Loire.

L'érosion externe du talus côté fleuve a été négligée car les levées de Loire sont protégées par un parement en maçonnerie de pierres sèches recouverts par 20 cm de terre végétale sur laquelle pousse une herbe rase.

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.

Le lit de la Loire s'est enfoncé de 1 à 2 mètres sous l'effet des prélèvements intensifs des alluvions de Loire qui se sont poursuivis jusqu'au début des années 1990.

La fondation de la levée n'étant plus 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.

### 2.5.1 - 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 ci-dessous.

		Probabilité "de base"	
Largeur du franc-bord	0	Largeur du Franc-bord <	5 → 0.01
	5	< Largeur du Franc-bord <	10 → 0.001
	10	< Largeur du Franc-bord	→ 0
			→
			→

Figure 17 : 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 C1, C2 et C3 relatifs à la présence de facteurs s'opposant à l'érosion externe, l'aggravant ou encore pour tenir compte de la durée de la crue.

Les facteurs C1 qui auront tendance à réduire la probabilité de base seront les suivants :

Facteurs améliorant la situation	Coefficients C <sub>1</sub>	
Présence de palplanches en pied de levée	10 <sup>-4</sup>	0.0001
Présence d'enrochement en pied de levée	10 <sup>-3</sup>	0.001
Présence de fascines en technique végétale en pied de levée	10 <sup>-1</sup>	0.1
Présence de para-fouille en pied de levée	10 <sup>-3</sup>	0.001

Les facteurs C2 qui auront tendance à augmenter la probabilité de base seront les suivants :

Facteurs aggravant la situation	Coefficients C <sub>2</sub>
Présence d'une fosse côté Loire	50
Présence d'érosion en pied de levée	20
Présence d'un obstacle ou point dur en pied de levée	50
Présence simultanée d'érosion et d'obstacle	60

Les facteurs C3 associés à la durée de chaque crue n'ont pas été déterminés dans le cadre des études de dangers des digues de classe A. Ces facteurs sont donc à ce jour pris égaux à 1.

La probabilité d'apparition P(ee<sub>a</sub>) de l'érosion externe est obtenue par la formule suivante :

$$P(ei_r) = (\text{Probabilité de base}) \times C_1 \times C_2 \times C_3 \tag{13}$$



### 2.5.2 - Probabilité de rupture en cas d'érosion externe P(ee<sub>r</sub>)

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 puis une rupture par érosion interne.

La probabilité de rupture "par érosion externe" est donc rattachée à l'aléa de rupture par glissement côté cours d'eau. Pour déterminer le risque de rupture dû à une érosion externe, on prend donc les probabilités d'apparition de glissement calculées côté cours d'eau et de rupture par glissement, puis on les majore pour tenir compte de la déstabilisation du pied de digue.

Nota : La probabilité d'apparition de glissement côté cours d'eau 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. On obtient ainsi un aléa de glissement spécifique au côté cours d'eau.

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

- soit par l'intermédiaire d'un coefficient multiplicateur fixe C4 de la probabilité associée à l'aléa de l'érosion de glissement côté fleuve P(g<sub>Loire</sub>)
- soit par surclassement de l'aléa glissement de talus côté fleuve selon le tableau présenté ci-dessous.

Risque	Probabilités qualitatives	P "glissement Loire"	P (ree)
Nul	quasi-nulle	0 < P < 0.0001	0.0001
Négligeable	extrêmement peu probable	0.0001 < P < 0.001	0.001
Faible	très improbable	0.001 < P < 0.01	0.01
Moyen	improbable	0.01 < P < 0.1	0.1
Fort	peu probable	0.1 < P < 0.3	0.3
Très fort	probable	0.3 < P < 1	1
Certain	Sûr	P = 1	1

Figure 18: Probabilité de rupture par érosion externe obtenue par majoration de l'aléa de glissement côté cours d'eau

Pour les vals de classe A, la majoration par un coefficient fixe C4 égal à 4 a été retenue. La probabilité de rupture en cas d'érosion externe est donc exprimée par :

$$P(ee_r) = 4 \times P(g_{Loire}) \tag{14}$$

### 2.5.3 - Aléa de rupture par érosion externe P(ee)

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

$$P(ee) = P(ee_a) \times P(ee_r) \tag{15}$$

## 2.6 - Phénomène (scénario) de soulèvement de fondation côté val

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.

### 2.6.1 - Probabilité d'apparition de soulèvement $P(sh_a)$

La probabilité d'apparition de soulèvement est appréciée par le calcul d'un facteur de sécurité  $F_h$  selon la méthodologie employée par l'USACE (EM 1110-2-1901, 1986) pour l'étude et le contrôle des écoulements internes dans les barrages.

Cette méthodologie permet de définir, sur la base de données « simple », 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 définie sur le schéma ci-dessous.

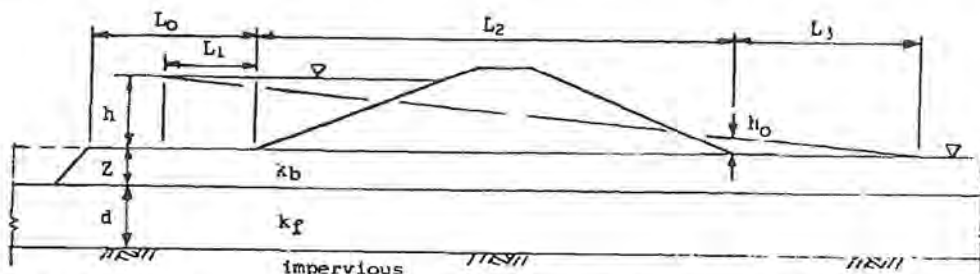


Figure 19 : Schéma type présentant les variables utilisées dans le calcul du coefficient de sécurité  $F_h$  du soulèvement hydraulique (d'après USACE, EM 1110-2-1901)

Les termes suivants sont utilisés :

- la couche imperméable a une épaisseur  $z$ , un poids volumique déjaugé  $\gamma_{sub}$  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 :

$$L_1 = \sqrt{(k_f/k_{bR}) Z_{bR} d}$$

- $L_2$  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 :

$$L_3 = \sqrt{(k_f/k_{bL}) Z_{bL} d}$$

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

$$h_0 = \frac{hL_3}{L_1 + L_2 + L_3}$$

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 :

$$h_c = \frac{Z_{bL} \gamma_{sub}}{\gamma_w} \qquad F_h = \frac{h_c}{h_0}$$

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

Probabilités d'apparition en fonction du facteur de sécurité $F_h$			
$F_h$	pas de limon OU pas d'alluvions OU pas d'eau		→ 0
	0.00001	$F_h < 1.1$	→ 0.8
	1.1	$< F_h < 1.3$	→ 0.3
	1.3	$< F_h < 1.5$	→ 0.1
	1.5	$< F_h < 2$	→ 0.01
	2	$< F_h$	→ 0.001

Figure 20 : Probabilités d'apparition du soulèvement hydraulique en fonction du facteur de sécurité  $F_h$

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. recensement des données de l'annexe A), nous avons retenu les caractéristiques suivantes pour les différentes couches de sols :

Tableau 6: Poids volumiques et perméabilités par défaut des couches de sols d'assise de la levée

Nature des sols	$\gamma_h$ (kN/m <sup>3</sup> )	Perméabilité (m/s)
Argile	19	1.00E-09
Limon	18	1.00E-07
Sable	16	1.00E-05
Sable et grave	16	1.00E-04

Concernant la détermination des épaisseurs de chaque couche au droit de chaque profil, nous nous sommes basés :

- sur une exploitation des sondages disponibles (issus des études des LRPC et de la Banques du Sol et du Sous-sol) implantés dans une bande de 200 m de part et d'autre de la polygone matérialisant la digue. Nous avons déterminé pour chaque sondage la cote du toit et du mur de la couche de limon (ou argile) et de la couche de sable (ou sable et grave)
- sur une interpolation (sous SIG) de ces cotes entre les sondages interprétés
- sur un croisement (sous SIG) de la cote du pied de digue et des cotes interpolées afin d'en déduire les épaisseurs de chaque couches.

La méthodologie et les résultats de cette interpolation figure en annexe C du présent rapport.

Pour des raisons de précisions des données géologiques en sondage, il n'a pas été possible de préciser pour chaque profil la nature de la couche d'assise (« limon » ou « argile ») ou de la couche perméable (« sable » ou « sable et grave »). Par défaut, nous avons donc considéré une couche de limon et une couche de sable.

### 2.6.2 - Probabilité de rupture en cas de soulèvement hydraulique P(sh<sub>r</sub>)

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 on recalcule donc la probabilité d'apparition de l'érosion interne, que l'on majore pour tenir compte de la déstabilisation (claquage) de l'horizon imperméable.

Cette majoration est obtenue en appliquant un coefficient multiplicateur C1 sur le critère de Bligh brut déterminé pour l'apparition de l'érosion interne. Nous obtenons ainsi une probabilité majorée d'apparition de l'érosion interne P(ei<sub>a bis</sub>). La probabilité de rupture P(ei<sub>r</sub>) elle, est celle calculée dans le scénario d'érosion interne.

Pour les digues de classe A, nous avons retenu un coefficient C1=0,5.

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

$$P(\text{sh}_r) = P(\text{ei}_{a \text{ bis}}) \times P(\text{ei}_r) \quad (16)$$

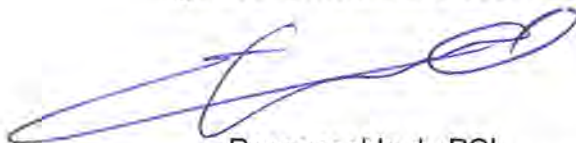
### 2.6.3 - Aléa de rupture par soulèvement hydraulique P(sh)

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

$$P(\text{sh}) = P(\text{sh}_a) \times P(\text{sh}_r) \quad (17)$$

Rédigé par

Édouard DURAND  
Ingénieur Divisionnaire des TPE



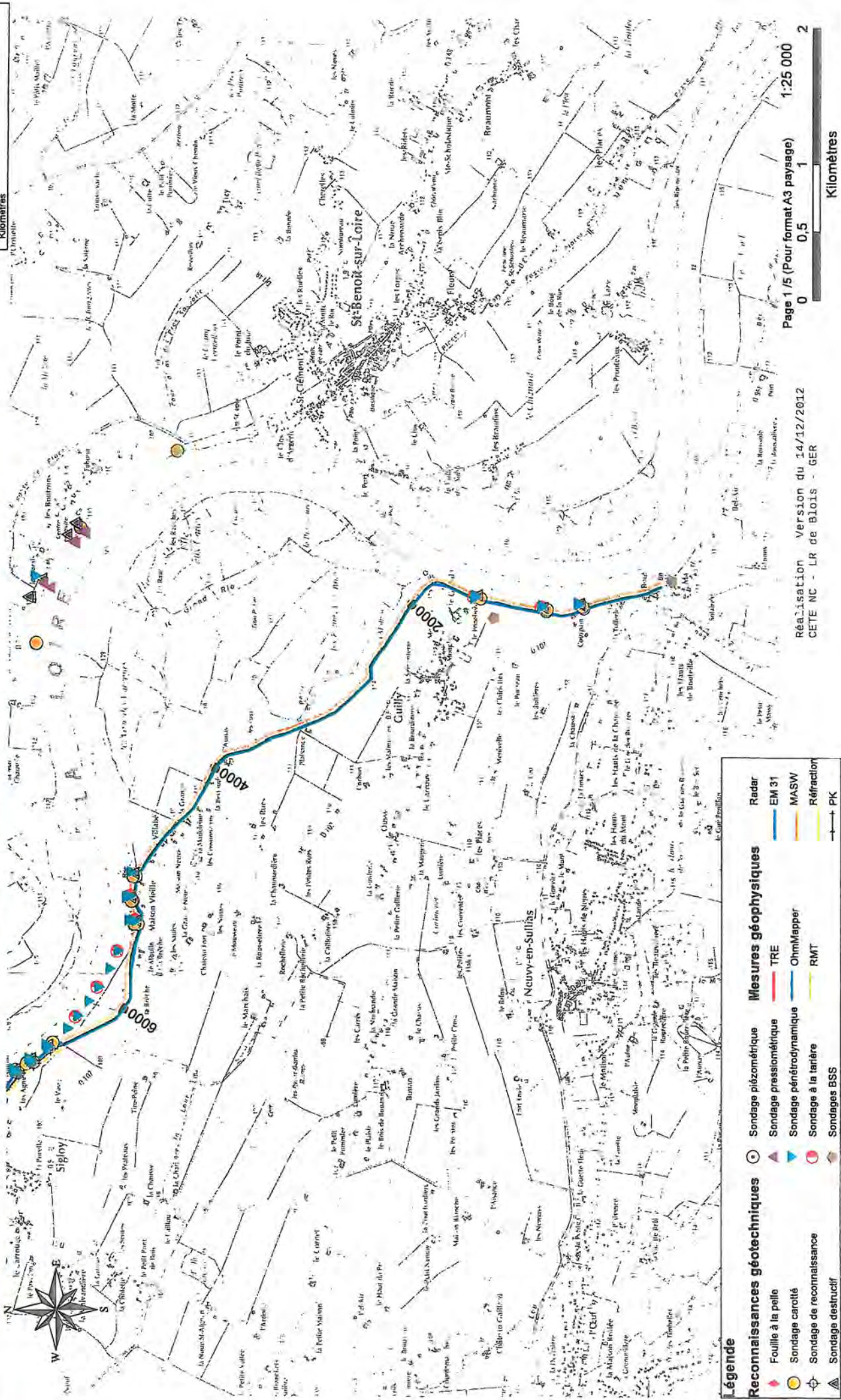
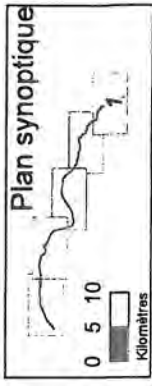
Responsable du PCI  
"Connaissance des ouvrages hydrauliques  
et de la morphodynamique fluviale"

## **Annexe A**

### **Exemple de recensement des données géophysiques et géotechniques du Val**

# Etude de DANGERS-Val d'Orléans

Localisation des données géotechniques et géophysiques



**Légende**

	<b>Reconnaitssances géotechniques</b>		<b>Mesures géophysiques</b>		<b>Radar</b>
	Fouille à la pelle		Sondage piézométrique		EM 31
	Sondage carotté		Sondage pressiométrique		TRE
	Sondage de reconnaissance		Sondage pénétrodynamique		MASW
	Sondages destructif		Sondage à la tarière		Réfraction
			Sondages BSS		PK

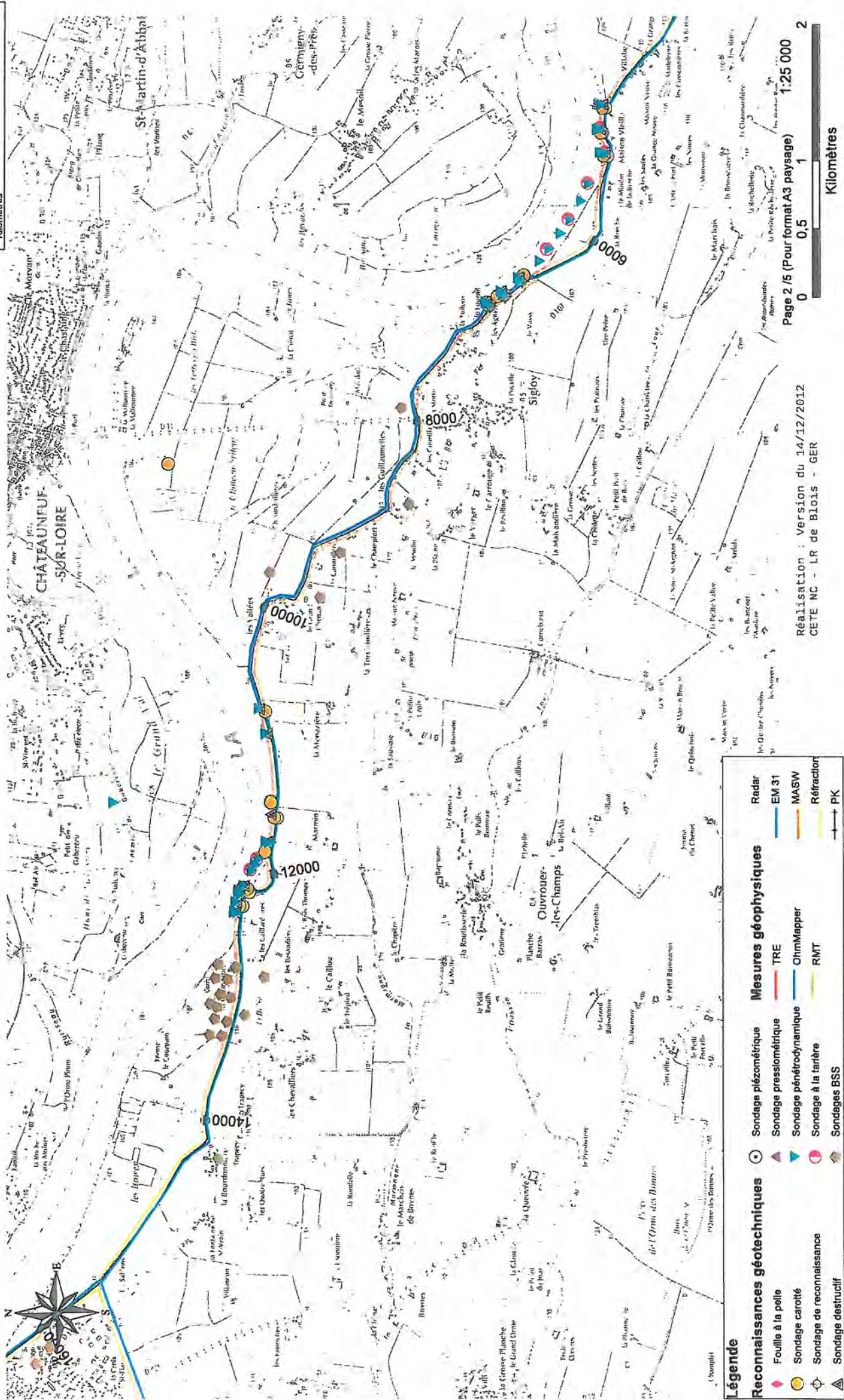
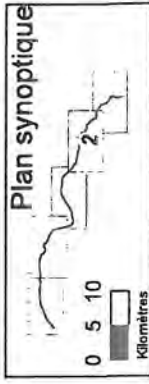
Page 1 / 5 (Pour format A3 paysage) 1:25 000  
0 0,5 1 Kilomètres

Réalisation Version du 14/12/2012  
CETE NC - LR de Blois - GER

ATTENTION : pour une meilleure lisibilité, la position des sondages géotechniques peut être potentiellement décalée

# Etude de DANGERS- Val d'Orléans

Localisation des données géotechniques et géophysiques

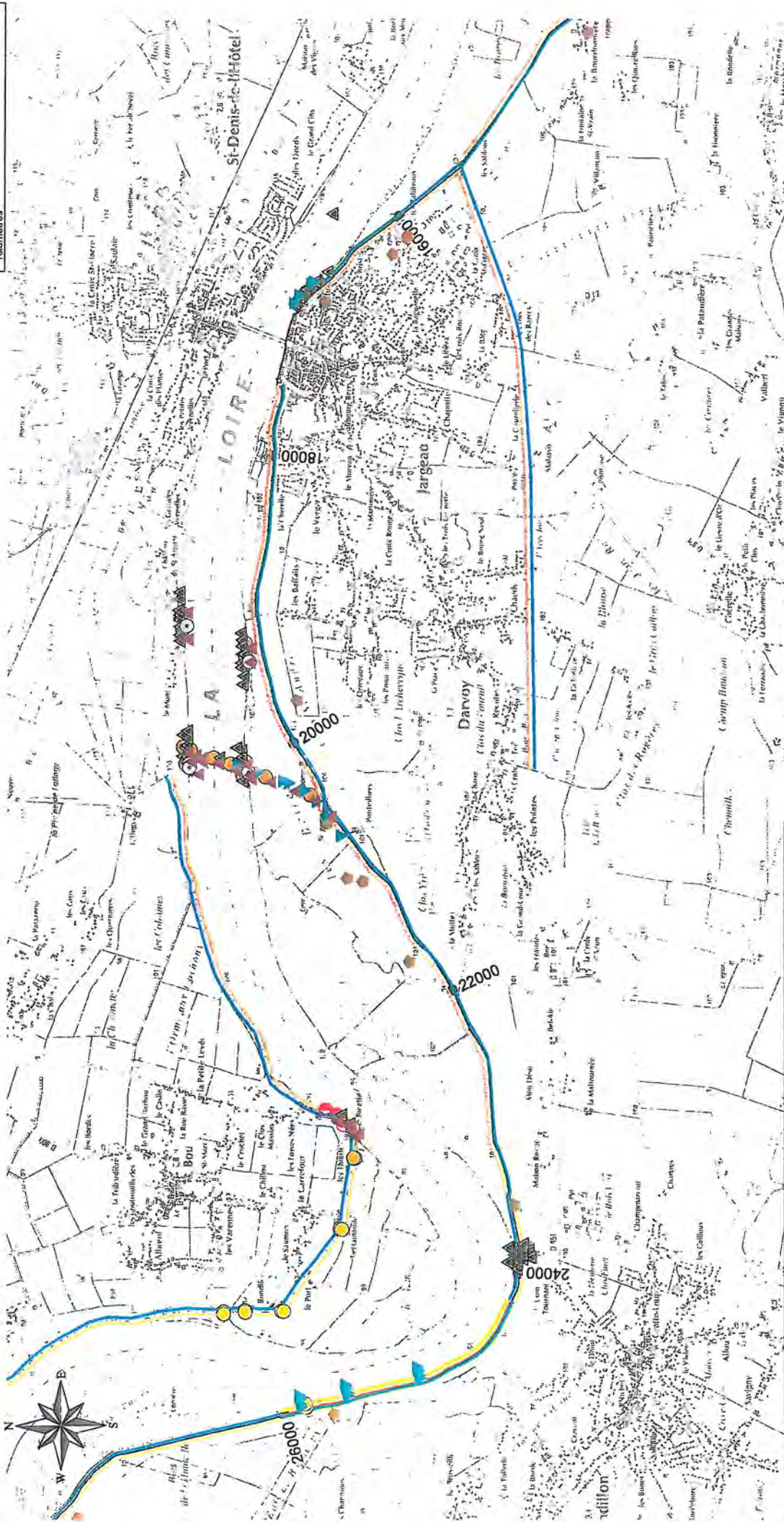
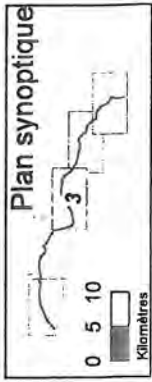


ATTENTION : pour une meilleure lisibilité, la position des sondages géotechniques peut être potentiellement décalée



# Etude de DANGERS-Val d'Orléans

Localisation des données géotechniques et géophysiques



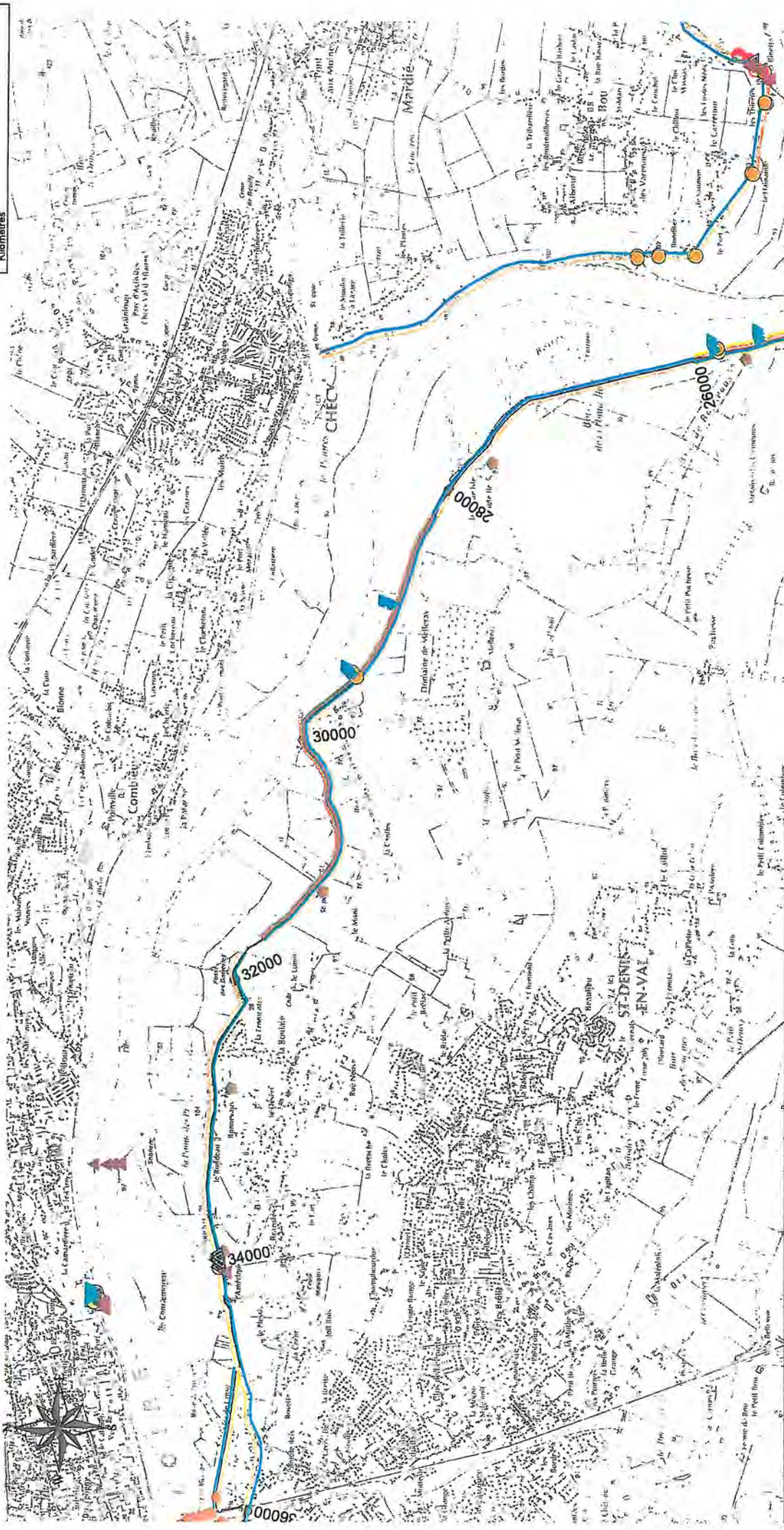
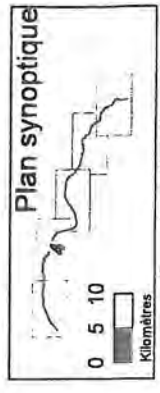
**Légende**

Reconnaitances géotechniques	Mesures géophysiques	Sondage piézométrique	Radar
Fouille à la pelle	TRE	Sondage pressiométrique	EM 31
Sondage carotté	OhmMapper	Sondage pénétrométrique	MASW
Sondage de reconnaissance	RMT	Sondage à la tarière	Réfraction
Sondage destructif	Sondages BSS		PK

ATTENTION : pour une meilleure lisibilité, la position des sondages géotechniques peut être potentiellement décalée

# Etude de DANGERS-Val d'Orléans

Localisation des données géotechniques et géophysiques



**Légende**

Reconnaitances géotechniques		Mesures géophysiques		Radar	
	Fouille à la pelle		Sondage piézométrique		EM 31
	Sondage carotté		Sondage pressiométrique		TRE
	Sondage de reconnaissance		Sondage pénétrodynamique		MASW
	Sondage destructif		Sondage à la tarière		RMT
			Sondages BSS		PK

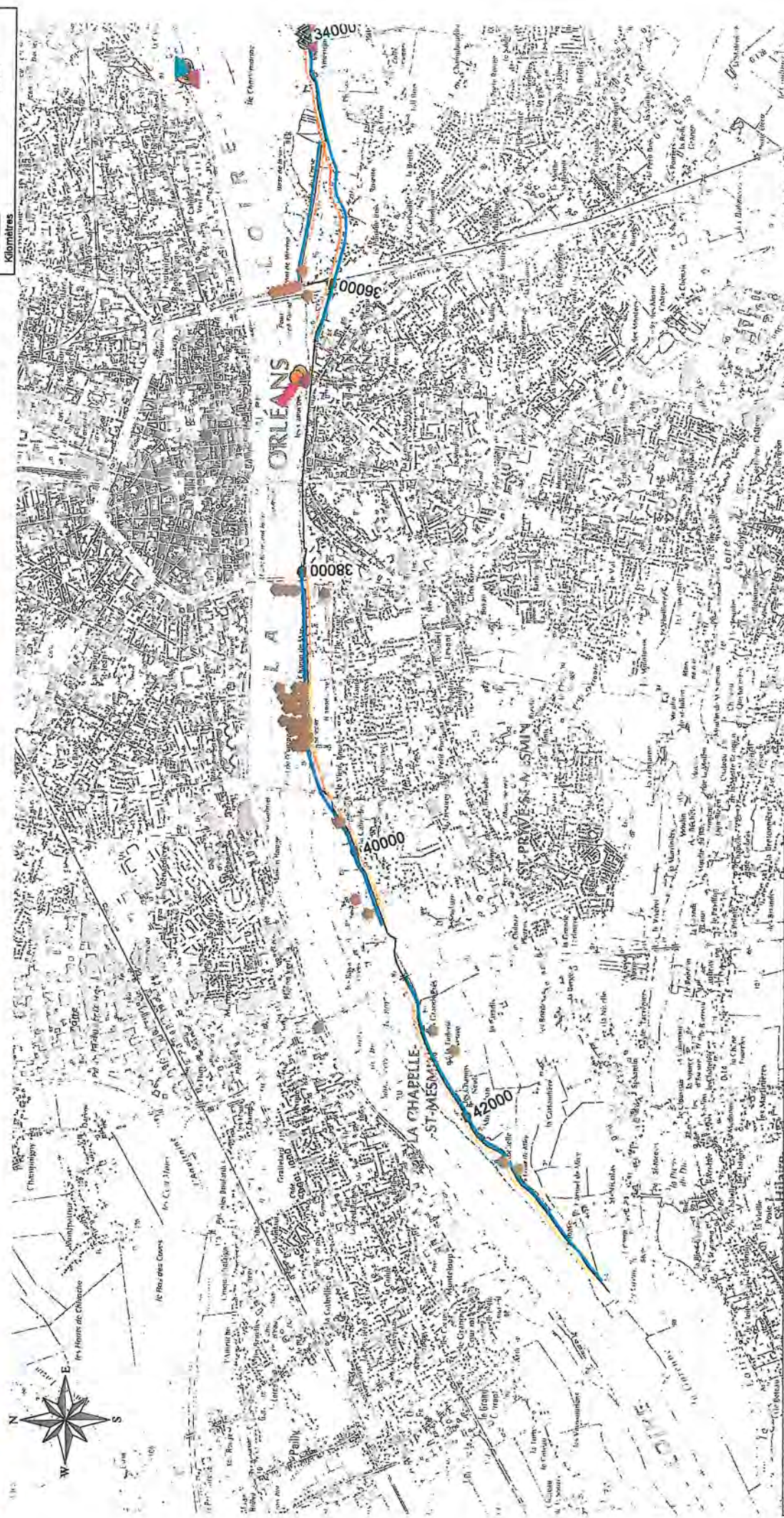
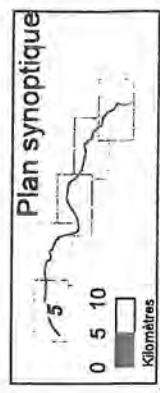
Réalisation : Version du 14/12/2012  
CETE NC - LR de Blois - GER

Page 4 / 5 (Pour format A3 paysage) 1:25 000  
0 0,5 1 2  
Kilomètres

ATTENTION : pour une meilleure lisibilité, la position des sondages géotechniques peut être potentiellement décalée

# Etude de DANGERS- Val d'Orléans

Localisation des données géotechniques et géophysiques



**Légende**

Reconnaitssances géotechniques		Mesures géophysiques	
	Fouille à la pelle		Sondage piézométrique
	Sondage carotté		Sondage pressiométrique
	Sondage de reconnaissance		Sondage pénétrodynamique
	Sondage destructif		Sondage à la tarière
			Sondages BSS
			TRE
			ChmMapper
			RMT
			Réfractiort
			PK
			Radar
			EM 31

Réalisation : Version du 14/12/2012  
CETE NC - LR de Blois - GER

Page 5 /5 (Pour format A3 paysage)  
1:25 000



ATTENTION : pour une meilleure lisibilité, la position des sondages géotechniques peut être potentiellement décalée

## **Annexe B**

Détermination du coefficient de sécurité de rupture par glissement de talus des digues de la Loire moyenne

Etude paramétrique

## Stage de fin d'étude



# GEOTECHNIQUE APPLIQUEE AUX ETUDES DE DANGERS DES DIGUES DE LA LOIRE ET AUTRES INFRASTRUCTURES

Marine DALMASSO

Elève de Master  
2<sup>ème</sup> année

Septembre 2011

## RÉSUMÉ – ABSTRACT

Ce document constitue le rapport du stage de fin d'étude que j'ai effectué au Laboratoire Régional d'Angers (LRA) dans le cadre de ma formation de master spécialisé en risques naturels de l'Université Montpellier II. Le Laboratoire d'Angers est un organisme public qui intervient dans différents domaines techniques relatifs au génie civil et à l'environnement.

Suite au décret du 11 décembre 2007 relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques, l'Etat a demandé aux Laboratoires Régionaux (Blois et Angers) d'établir une méthodologie générale des études de dangers des digues de Loire Moyenne. En tant que stagiaire du LRA, ma mission pour ce projet a été d'analyser deux mécanismes pouvant conduire à la rupture de ces ouvrages en terre, les glissements de talus et le phénomène d'érosion interne, ainsi que de proposer une démarche probabiliste dans le but de pouvoir quantifier le risque de rupture dû à ces mécanismes.

Durant cette période de stage, j'ai également été associée à d'autres études sur la thématique des expertises géotechniques. J'ai choisi d'en présenter deux, représentatives des missions qui m'ont été confiées. La première concerne l'expertise d'ouvrages des marais salants de Guérande (44). La deuxième est l'étude de confortement de talus d'un remblai affecté par un glissement rotationnel au droit du Pont du Gouffre à l'Ile d'Elle (85).

This document is the report of the internship I conducted at the Laboratoire Régional d'Angers (LRA) as part of my training as a master specialist in natural hazards, University Montpellier II. The Laboratoire Régional d'Angers is a public agency which is involved in various technical fields related to engineering and environment.

Following the decree of December 11<sup>th</sup>, 2007 on the safety of hydraulic structures, the French State asked the regional laboratories (Blois and Angers) to implement a general methodology for hazards studies of dams in the Middle Loire. As an intern in the LRA, my role for this project was to analyze two mechanisms that can lead to rupture of these levees, the slope failures and internal erosion, and to propose a probabilistic approach in order to quantify the risk of rupture of these mechanisms.

During this internship, I was also associated with other studies carried out by the LR of Angers on the topic of geotechnical expertise. I chose to present two of them. The first concerns the expertise of the structures of the saltmarsh of Guérande (44). The second is a study of reinforcement of an embankment slope of a bridge (Pont du Gouffre) affected by a rotational landslide, in Ile d'Elle (85).

## REMERCIEMENTS

Avant toute chose je tiens sincèrement à remercier Sébastien HERVE, qui m'a accueillie au sein de son équipe et m'a offert l'opportunité de réaliser un stage riche et professionnalisant. En tant que maître de stage, il a su développer et enrichir un projet en accord avec mes attentes personnelles, en me donnant des responsabilités croissantes au cours de ces quelques mois. Je le remercie également pour sa patience, sa pédagogie et les nombreuses heures qu'il m'a accordées.

Je souhaite également exprimer ma reconnaissance à Bruno BERENGER, chargé d'études ouvrages d'art, qui m'a fait découvrir son métier de manière pédagogique et passionnée, ainsi qu'à l'équipe des sondeurs, et notamment Xavier CHARRIER et Christophe YVINEC qui m'ont apporté leurs connaissances du terrain et avec qui j'ai pris un réel plaisir à travailler.

Enfin, j'adresse mes remerciements à toute l'équipe du LRA qui m'a agréablement accompagnée tout au long de mon stage. Je remercie ainsi chaleureusement Michel, Alban, Agnès, Jean-Paul, Nathalie, David H., David B. et Jean-Claude, d'avoir fait en sorte que cette période se déroule pour le mieux dans une ambiance des plus chaleureuses.

## SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	6
I ETUDE DE DANGERS DES DIGUES DE LA LOIRE.....	7
1.1 Présentation.....	7
1.1.a Historique des digues.....	8
1.1.b Objectifs des études de dangers.....	10
1.2 Mécanismes de rupture envisagés.....	12
1.3 Démarche probabiliste.....	15
1.3.a Probabilité d'occurrence des crues.....	15
1.3.b Probabilités relatives aux mécanismes de rupture.....	17
1.4 Etude des mécanismes d'érosion interne et de glissements de talus.....	19
1.4.a Erosion interne ou de renard hydraulique.....	19
1.4.a.i Méthode de Lane.....	20
1.4.a.ii Méthode de Bligh.....	21
1.4.b Glissement de talus.....	23
1.4.b.i Théorie de modélisation de la rupture rotationnelle.....	23
1.4.b.ii Calage du modèle.....	24
1.4.b.iii Modélisation.....	27
1.4.b.iv Résultats.....	29
1.4.b.v Appréciation des probabilités associées au mécanisme.....	31
1.5 Application sur un site test : Saint Clément des Levées.....	32
1.5.a Surverse.....	33
1.5.b Erosion interne.....	33
1.5.c Glissement de talus.....	34
1.5.d Erosion externe.....	34
1.5.e Soulèvement hydraulique.....	35
1.5.f Synthèse et conclusion.....	35
II AUTRES ÉTUDES.....	36
II.1 Expertise des ouvrages des marais salants de Guérande (Loire-Atlantique).....	36
II.1.a Objet de l'étude.....	36
II.1.b Reconnaissance géotechnique.....	37
II.1.c Utilisation des données pour qualifier l'état général de l'ouvrage et du sol support.....	37
II.1.d Participation personnelle à l'étude.....	38
II.2 Etude de confortement du remblai du Pont du Gouffre à l'île d'Elle (Vendée).....	39
II.2.a Objet de l'étude.....	39
II.2.b Reconnaissance géotechnique et essais en laboratoire.....	39
II.2.c Etude de stabilité du remblai par modélisation TALREN.....	40
II.2.d Participation personnelle à l'étude.....	41
CONCLUSIONS.....	42
BIBLIOGRAPHIE.....	43



## INDEX DES ILLUSTRATIONS

<i>Illustration 1 : Etendue de la Loire</i> .....	7
<i>Illustration 2 : Coupe type d'un déversoir du XIXe siècle</i> .....	8
<i>Illustration 3 : Evolution du profil d'une levée de la Loire (Val d'Authion), depuis le XVIe siècle</i> .....	9
<i>Illustration 4 : Description d'une rupture de digue par surverse</i> .....	12
<i>Illustration 5 : Conséquences du mécanisme d'érosion externe</i> .....	12
<i>Illustration 6 : Déstabilisation des talus d'une digue en glissements rotationnels</i> .....	13
<i>Illustration 7 : Description du mécanisme d'érosion interne ou phénomène de renard</i> .....	13
<i>Illustration 8 : Mise en place d'un soulèvement hydraulique</i> .....	14
<i>Illustration 9 : Galerie creusée à travers un ouvrage hydraulique par érosion interne</i> .....	19
<i>Illustration 10 : Niches d'arrachement successives d'un glissement affectant un pan de digue</i> .....	23
<i>Illustration 11 : Equilibre d'une tranche de sol</i> .....	24
<i>Illustration 12 : Hypothèses de calcul pour la modélisation</i> .....	26
<i>Illustration 13 : Glissement de talus pour un ouvrage fondé sur des limons</i> .....	27
<i>Illustration 14 : Glissement de talus pour un ouvrage fondé sur des sables</i> .....	27
<i>Illustration 15 : Glissement de talus pour un ouvrage fondé sur des argiles</i> .....	27
<i>Illustration 16 : Modélisation d'un glissement de talus côté val</i> .....	28
<i>Illustration 17 : Modélisation d'un glissement de talus côté Loire, lors d'une décrue rapide</i> .....	29
<i>Illustration 18 : Représentation du coefficient de sécurité F pour chaque hauteur de digue H1 en fonction de la hauteur d'eau Hw</i> .....	30
<i>Illustration 19 : Localisation du site test à Saint Clément des Levées</i> .....	32
<i>Illustration 20 : Ouvrage n°709 - Pont de Bois</i> .....	36
<i>Illustration 21 : Profil en travers de l'ouvrage n°709 et reconnaissances géotechniques associées</i> .....	37
<i>Illustration 22 : Niches d'arrachement du glissement affectant les remblais du Pont du Gouffre</i> .....	39
<i>Illustration 23 : Modélisation du confortement par pieux des remblais du Pont du Gouffre</i> .....	40

## INDEX DES TABLEAUX

<i>Tableau 1 : Classement des digues en fonction de leurs caractéristiques</i> .....	10
<i>Tableau 2 : Principales situations de projet des digues à charge permanente et états limites associés</i>	16
<i>Tableau 3 : Coefficients de sols pour la méthode de Lane</i> .....	20
<i>Tableau 4 : Transcription du rapport de Bligh en probabilités</i> .....	21
<i>Tableau 5 : Coefficients pondérateurs du mécanisme d'érosion interne, associés aux paramètres extérieurs</i> .....	22
<i>Tableau 6 : Caractéristiques de sol retenues pour la modélisation</i> .....	25
<i>Tableau 7 : Coefficients partiels et de modèle pour le calcul de stabilité d'ensemble aux Etats Limites Ultimes (ELU)</i> .....	29
<i>Tableau 8 : Relation entre la probabilité d'une instabilité (rupture rotationnelle) et la probabilité qu'elle engendre une rupture de digue</i> .....	31
<i>Tableau 9 : Coefficients pondérateurs du mécanisme de glissement, associés aux paramètres extérieurs</i> .....	31

## TABLE DES ANNEXES

Annexe 1 : Synthèse des reconnaissances géotechniques.....	45
Annexe 2 : Analyse complémentaire à l'érosion interne.....	52
Annexe 3 : Abaques des instabilités à la rupture rotationnelle.....	54
Annexe 4 : Extrait d'une étude géotechnique réalisée sur la digue du site test.....	57
Annexe 5 : Profil transversal du site test à Saint Clément de Levées : lithologie, diagraphie de perméabilité et résultats d'essais pressiométriques.....	65
Annexe 6 : Extrait de carte du PPRI de Saint Clément de Levées.....	66
Annexe 7 : Interprétation et mise en forme des essais in situ réalisés sur le Pont de Bois.....	67
Annexe 8 : Interprétation et mise en forme des essais in situ réalisés sur le Pont du Gouffre.....	71

## INDEX DES SIGLES

CCTP : Cahier des Clauses Techniques Particulières
CEMAGREF : Centre national du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et des Forêts
CETE : Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement
CFBR : Comité Français des Barrages et Réservoirs
DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
ELS : Etats Limites de Services
ELU : Etats Limites Ultimes
LCPC : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LR : Laboratoire Régional ou Laboratoires Régionaux
LRA : Laboratoire Régional d'Angers
LRPC : Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées
PHEC : Plus Hautes Eaux Connues
PPRI : Plan de Prévention du Risque Inondation
RQD : Rock Quality Designation
SIG : Système d'Information Géographique

## INTRODUCTION

La formation de master Géologie, orientée dans l'étude des risques naturels à l'Université Montpellier II, offre la possibilité de réaliser un stage de cinq à six mois en entreprise. Désirant me spécialiser en géotechnique, j'ai choisi le Laboratoire Régional d'Angers (LRA), bureau d'étude reconnu dans ce domaine.

Le LRA, anciennement Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées (LRPC), situé aux Ponts de Cé est un organisme public qui intervient dans la plupart des domaines du génie civil. Il est divisé en plusieurs services, dont l'unité Environnement-Géotechnique, à laquelle j'ai été affectée.

Les missions de cette unité comprennent la réalisation d'études géotechniques, avec la mise en œuvre de reconnaissances et essais in situ ou en laboratoire, les interventions de contrôles sur chantier, le suivi d'ouvrages instables, etc. Parallèlement à ces activités spécifiques, ce service du LRA est impliqué dans les opérations de recherche et développement du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) et participe à la rédaction des normes de constructions nationales et européennes.

Ces activités sont majoritairement menées pour le compte de l'Etat et des collectivités territoriales. A ce titre, les Laboratoires Régionaux (LR) sont souvent amenés à collaborer. Ainsi le LR d'Angers et celui de Blois traitent ensemble une problématique d'actualité : les études de dangers des digues de la Loire.

En effet, l'Etat est propriétaire d'environ 530 km de digues protégeant des inondations les vals de la Loire et de ses principaux affluents. Ces digues, communément appelées « levées », ont été construites sur plus d'un millénaire et constituent aujourd'hui des ouvrages dont la tenue reste incertaine en cas de forte crue. Les levées de la Loire Moyenne (entre Nevers et Angers) protègent une population d'environ 300 000 habitants et 14 000 entreprises. L'importance de ces enjeux a conduit la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) Centre à développer son expertise dans le domaine des digues fluviales et à produire en régie des études de dangers sur les digues de classe A des vals d'Orléans, de Tours et d'Authion. Ces études de dangers, réalisées en partenariat avec le Centre national du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et des Forêts (CEMAGREF) et le LR de Blois, constituent une première approche et serviront de base à la rédaction d'un guide méthodologique applicable à l'ensemble des digues.

Le Laboratoire de Blois a fait appel au LRA dans le but de proposer une méthodologie cohérente sur les caractéristiques géotechniques des ruptures de digues. L'essentiel de mon travail sur cette problématique a été d'étudier deux mécanismes pouvant conduire à une rupture : le phénomène d'érosion interne et les glissements de talus, et de les intégrer dans une analyse de risque pour définir le niveau de protection réellement assuré par l'ouvrage actuel.

Après avoir présenté de façon générale les études de dangers sur les digues de la Loire, j'aborderai la démarche probabiliste retenue et son application aux deux mécanismes étudiés.

La deuxième partie du rapport présente ma participation à d'autres études confiées au Laboratoire d'Angers. Deux thématiques de la géotechnique sont abordées au travers d'une étude de calcul de fondations d'ouvrages d'art anciens et d'une étude de confortement d'un glissement rotationnel.

# I ETUDE DE DANGERS DES DIGUES DE LA LOIRE

## I.1 Présentation

La Loire est un fleuve couvrant plus de 1000 km de linéaire. Elle prend sa source au Mont Gerbier-De-Jonc en Ardèche et termine sa course en se jetant dans l'Océan Atlantique via l'estuaire de la Loire (Loire-Atlantique). Ce fleuve est le plus long de France et compte 75 affluents répartis tout au long de son cours et traverse plus de 80 communes, dont Saint-Étienne, Orléans, Tours, Saumur, Nantes et Saint-Nazaire. Son bassin versant recouvre 117 000 km<sup>2</sup>, soit un cinquième du territoire français (Illustration 1).

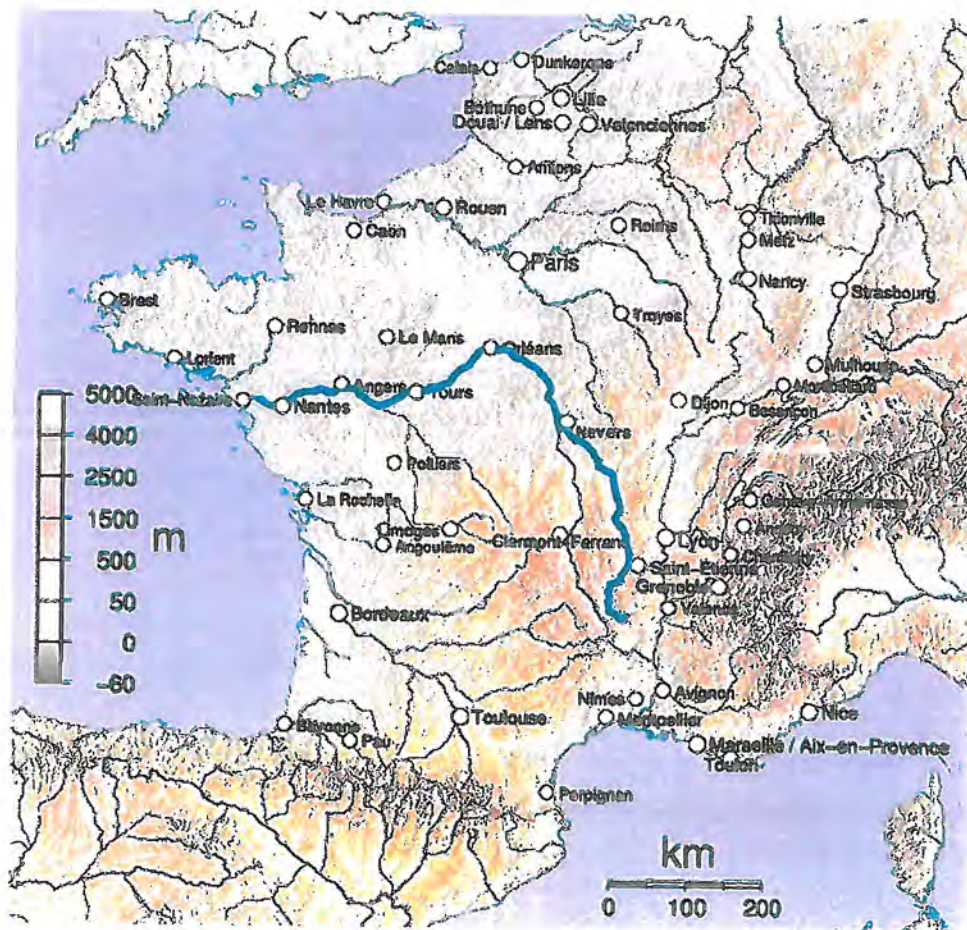


Illustration 1 : Etendue de la Loire

La synthèse des archives du LRA des données géotechniques disponibles sur le Val d'Authion (levée entre Angers et Saumur) m'a permis de comprendre le contexte d'endiguement de la Loire et de récapituler les données des essais in situ dans une base de donnée de type Système d'Information Géographique (SIG) avec le logiciel MapInfo (Annexe 1). Ce travail bibliographique a aussi permis de reconstituer l'histoire des levées de la Loire, présenté dans le chapitre suivant.

## 1.1.a Historique des digues

Les bords de la Loire ont toujours accueilli des populations. Dès le XII<sup>e</sup> siècle, des signes d'organisation d'ouvrages de protection contre les inondations apparaissent. A cette époque, les digues appelées « turcies » sont de simples barrages submersibles constitués de pieux, de pierraille, de terre et de végétaux. Les grands propriétaires terriens, soucieux de la mise en valeur de leurs domaines, souhaitent des protections pérennes, capables de résister aux caprices de la Loire : ils sont à l'origine des premières levées.

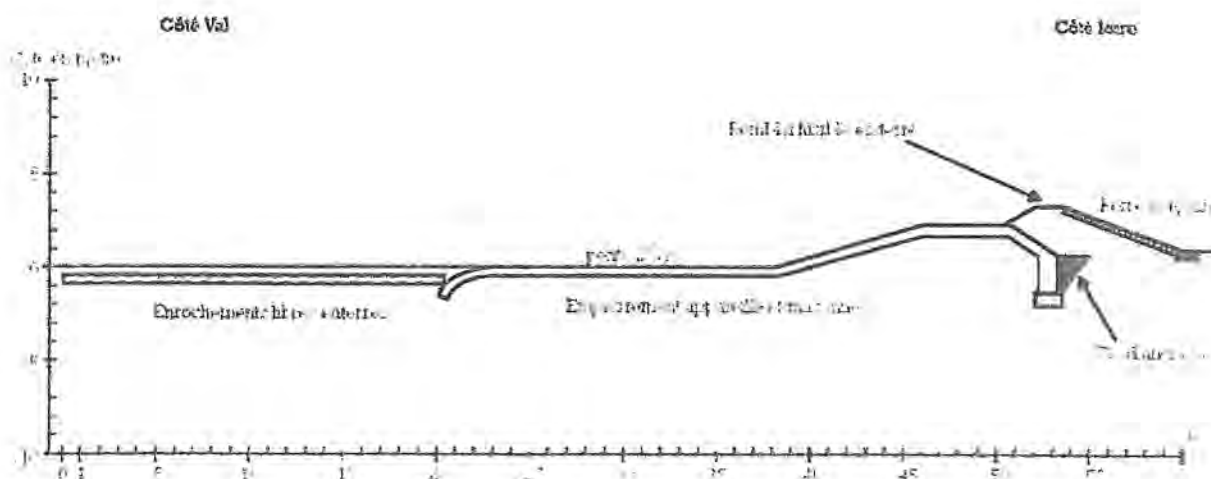
Au cours du XV<sup>e</sup> siècle, de grandes crues occasionnent la rupture des digues, les nobles se mettent alors en charge de surélever les digues de façon à ce que les inondations ne puissent les submerger.

Par la suite, le rôle principal des levées évolue vers un aménagement visant à contraindre le cours du fleuve au droit des aménagements portuaires et des ouvrages de franchissement. Ces digues ont également pour rôle de rétrécir le lit mineur afin de faciliter la navigation. Contrairement aux turcies, les levées sont des remblais de terre.

Les crues catastrophiques survenues au début du XVIII<sup>e</sup> siècle abattent les nouvelles levées. Réagissant dans l'urgence, les digues sont rehaussées de près de deux mètres atteignant 6,83 m de hauteur.

Suite à la crue d'octobre 1846, un parapet de protection en terre est aménagé sur la plateforme des digues, 50 cm au-dessus du niveau de cette crue afin d'éviter la surverse.

La crue exceptionnelle de 1856 (plus de 160 brèches) marque la fin du principe de protection par l'exhaussement continu des digues au-dessus des niveaux de plus hautes eaux connues (PHEC) : des déversoirs fusibles font leur apparition (*Illustration 2*).



*Illustration 2 : Coupe type d'un déversoir du XIX<sup>e</sup> siècle*  
 Source : LRPC d'Angers. Mise en charge hydraulique de remblais d'infrastructures de transports, 2008.

Le fleuve n'ayant subi que deux crues en 1907 et 1911, les populations oublient les catastrophes qu'il peut engendrer. Au début du XX<sup>e</sup> siècle, seuls les bateaux extracteurs de granulats circulent encore sur la Loire. La perte de la valeur économique du fleuve amène le désintérêt des riverains et un entretien minimum de ces ouvrages.

Le retour de l'activité économique de la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle (développement de l'extraction de matériaux, centrales nucléaires, besoins en eau potable, ...) permet un retour de l'entretien des bords de Loire, avec notamment la construction de barrages écrêteurs.

En 1994, un plan décennal appelé « Plan Loire Grandeur Nature » visant à concilier la sécurité des personnes, la protection de l'environnement et le développement économique est décidé. Ce plan permet l'accélération du renforcement des levées et la reprise de l'entretien du lit de la Loire.

Les travaux sur les digues et dans le lit ne sont plus l'unique réponse à la sécurité des populations face au risque d'inondation. Cette protection est aujourd'hui complétée par l'amélioration de la prévention et de la prévision des crues.

Au travers de ce bref historique, il apparaît que la Loire a connu une évolution mouvementée au cours de laquelle de nombreuses crues se sont manifestées. Le manque d'expérience en matière de gestion de crue a amené les populations à réparer les brèches avec les « moyens du bord », faisant ainsi des digues de la Loire un ouvrage hétérogène et résultant par endroits de la superposition de levées d'époques et de structures diverses (*Illustration 3*).

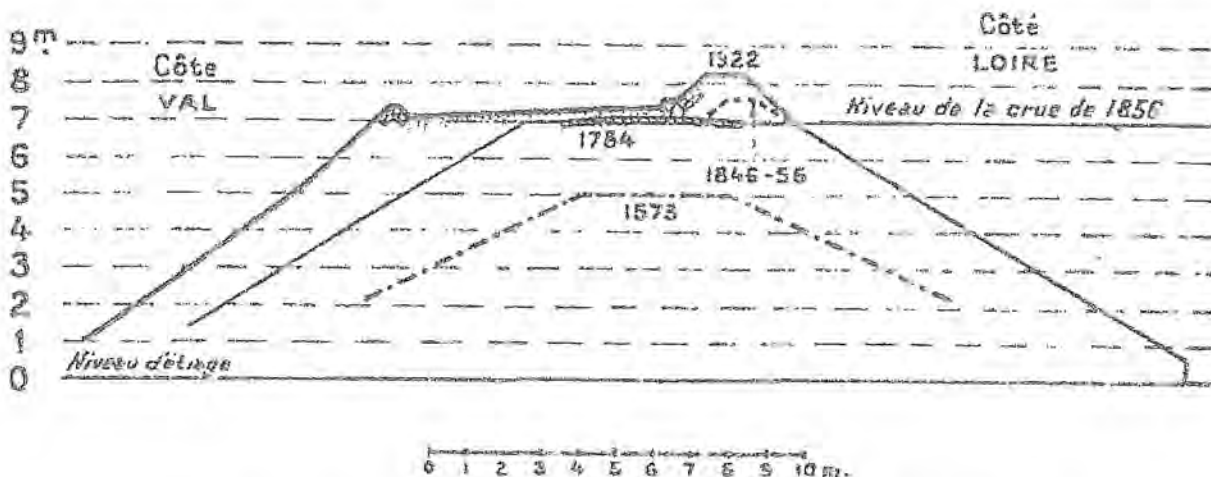


Illustration 3 : Evolution du profil d'une levée de la Loire (Val d'Authion), depuis le XVI<sup>e</sup> siècle  
Source : LRPC d'Angers. Mise en charge hydraulique de remblais d'infrastructures de transports, 2008.

Après la tempête Xynthia de mars 2010, et l'engagement d'un plan national « Digues », il s'est avéré nécessaire de conduire une démarche systématique et méthodique visant à mieux connaître le niveau réel de protection assuré par cet ouvrage. C'est l'objet des études de dangers engagées depuis 2010.

### 1.1.b Objectifs des études de dangers

La démarche d'étude de dangers s'applique à la digue en la considérant comme un ouvrage de danger potentiel et en cherchant à apprécier ses forces, ses faiblesses, les conséquences des accidents potentiels et les moyens de les prévenir. Elle ne juge pas de l'adéquation du niveau de protection (dimensionnement) que l'ouvrage apporte, ou pourrait apporter, au regard de l'aléa « crue » et de l'occupation du territoire.

Le décret du 11 décembre 2007<sup>1</sup> relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques fait obligation au maître d'ouvrage de réaliser une étude de dangers pour toutes les digues (systèmes d'endiguements) de classe A, B ou C (Tableau 1), dont il est propriétaire.

CLASSE	CARACTERISTIQUES DE L'OUVRAGE ET POPULATION PROTEGEE <i>H</i> = hauteur de l'ouvrage en mètres <i>P</i> = population maximale résidant dans la zone protégée en nombre d'habitants
A	Ouvrage pour lequel $H \geq 1$ et $P \geq 50\ 000$
B	Ouvrage non classé en A et pour lequel : $H \geq 1$ et $1000 \leq P < 50\ 000$
C	Ouvrage non classé en A ou B et pour lequel : $H \geq 1$ et $10 \leq P < 1000$
D	Ouvrage pour lequel $H < 1$ , soit $P < 10$

Tableau 1 : Classement des digues en fonction de leurs caractéristiques

Source : Décret n°2007-1735 du 11 décembre 2007.

L'Etat est le propriétaire de la majorité des digues de Loire de classe A. Il se doit d'être exemplaire pour la réalisation de ces études de dangers, qu'il a lui-même imposées à tous les propriétaires de digue. La DREAL Centre est maître d'œuvre de ces études. Compte tenu de l'urgence et des enjeux contenus dans les endiguements de classe A (75 % des habitants), ceux-ci sont traités en priorité dans le but de proposer une dévolution des études.

En Loire Moyenne, 3 vals ont été classés A :

- Tours : 120.000 habitants, nombreux enjeux industriels ;
- Orléans : 65.000 habitants ;
- Authion : 50.000 habitants.

<sup>1</sup> MINISTERE DE L'ECOLOGIE, DU DEVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'AMENAGEMENT DURABLES. Décret n°2007-1735 du 11 décembre 2007 relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques et au comité technique permanent des barrages et des ouvrages hydrauliques et modifiant le code de l'environnement. Journal officiel, n°289 du 13 décembre 2007, p. 20113-20128. NOR DEVO0751165D.

En tout, 235.000 habitants soit 75 % de la population totale protégée. Les 25 vals classés B regroupent 72.000 habitants soit 24 % de la population totale protégée et les 22 vals restants (classés C et D), seulement 4.000 habitants soit 1 % de la population totale protégée.

Pour la réalisation des études de dangers des levées de la Loire, une phase préliminaire est nécessaire. En effet les digues de Loire ont une structure et une histoire commune et donc présentent des similitudes qui leur sont particulières, qu'il est intéressant de traiter dans la globalité. L'étude de dangers fait appel à un certain nombre d'études transversales et globales à l'échelle du bassin de la Loire et notamment de la Loire Moyenne, et vise les objectifs suivants :

- Etude hydrologique

L'étude hydrologique, hydraulique et morphodynamique globale doit permettre de définir les débits forts et extrêmes que l'ensemble des digues est susceptible de connaître ainsi que les lignes d'eau correspondantes dans le lit majeur endigué. Les détections des surverses, le fonctionnement des déversoirs et le niveau de remous à l'aval doivent être qualifiés en terme de ligne d'eau de débit et de probabilité d'occurrence.

- Etude géotechnique

L'étude géotechnique vise à rassembler toutes les données acquises sur les levées et notamment les investigations géophysiques faites par les laboratoires. Une synthèse de l'ensemble de ces données permet de préciser les investigations complémentaires à programmer. Les canalisations connues ou inconnues sont recherchées suivant le protocole précisé lors de l'étude préliminaire. Le repérage de ces ouvrages est primordial pour la sécurité de la digue puisque ceux-ci sont susceptibles de provoquer rapidement une rupture de la levée par renard hydraulique. Pour chaque type de défaut recensé, un niveau d'eau est défini pour lequel la défaillance de la levée commence à être probable, puis un niveau où la défaillance est certaine (ou très probable).

- Etude technique et historique des brèches historiques

Une synthèse de ces informations est menée sur les brèches historiques de la Loire Moyenne. Elle présente chaque brèche connue en essayant de déterminer les causes, les conditions d'apparition, les dégâts et l'ensemble des informations associées. L'étude est complétée par une recherche sur la cinématique, la géotechnique et les conséquences directes d'une brèche. Pour cela, une modélisation physique peut permettre de définir plus précisément le phénomène de brèche encore mal connu et notamment l'interaction entre la fosse de dissipation et la brèche.

Une fois l'ensemble des études élémentaires réalisées, une synthèse globale permettra de définir des scénarios de défaillance et des scénarios d'accidents. Elle devra déboucher sur l'identification et la caractérisation des risques en termes de probabilité d'occurrence, d'intensité et de gravité des conséquences. A l'issue de cette synthèse, un guide méthodologique pour la réalisation d'études de dangers sera rédigé. Il comprendra un Cahier des Clauses Techniques Particulières (CCTP) type pour la réalisation des études des digues de classe B, C et D.

Le travail réalisé dans le cadre du stage s'inscrit principalement dans le volet des études géotechniques. Il comprend l'approche méthodologique destinée à quantifier la probabilité d'apparition d'un mécanisme pouvant générer une rupture et son application pratique intégrant les données géotechniques existantes sur un site test.



## I.2 Mécanismes de rupture envisagés

L'identification des différents mécanismes susceptibles d'engendrer une rupture de digue en cas de crue permet de mieux appréhender le risque. On retrouve cinq mécanismes majeurs de dégradation des ouvrages en terre :

- La surverse

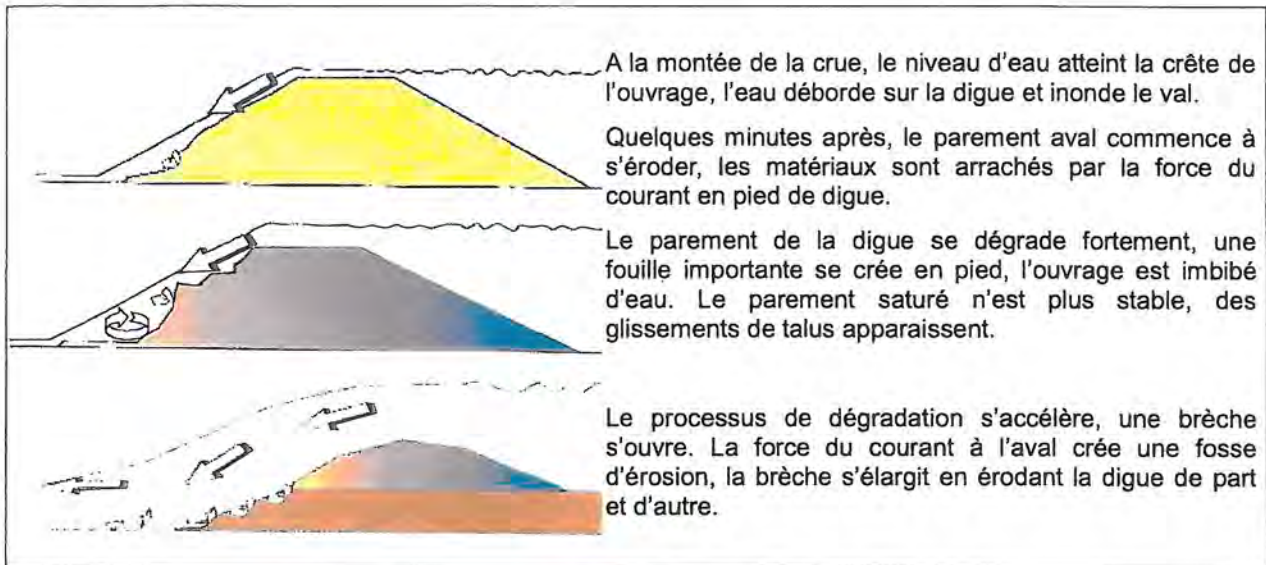


Illustration 4 : Description d'une rupture de digue par surverse

- L'érosion externe

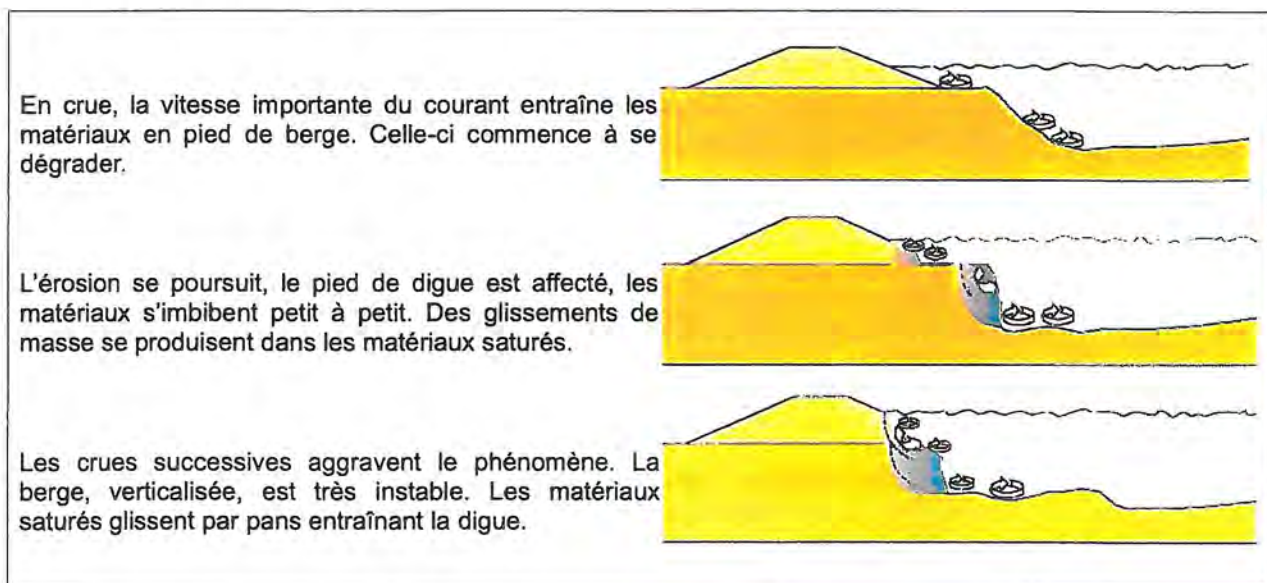
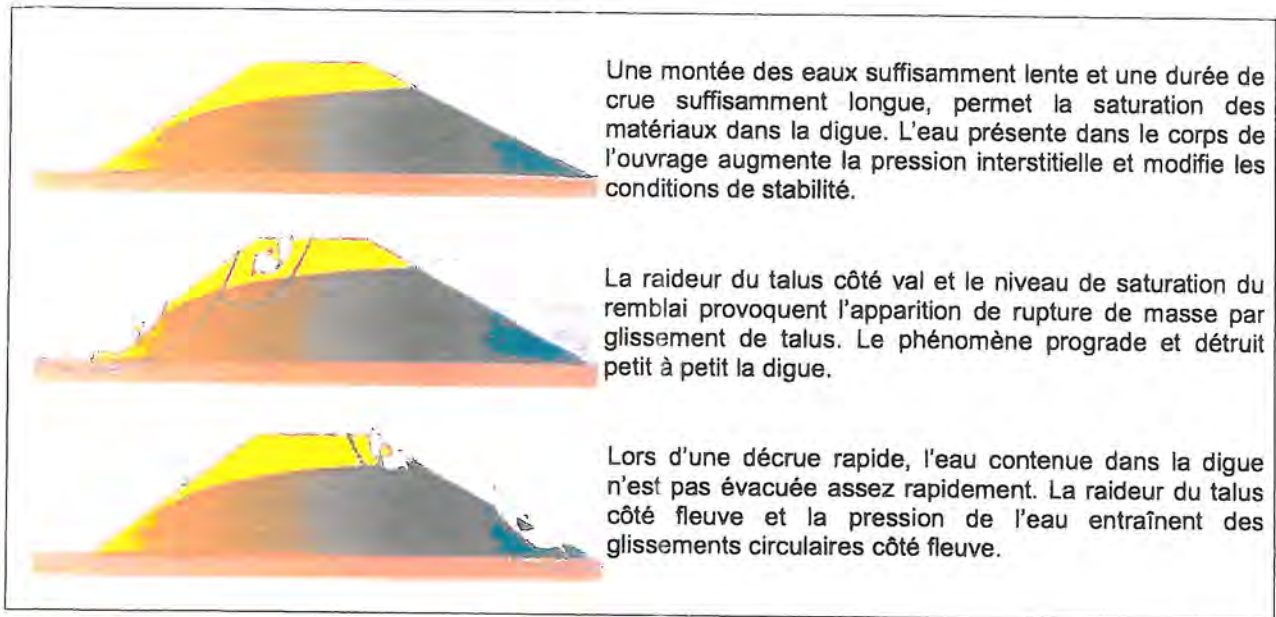


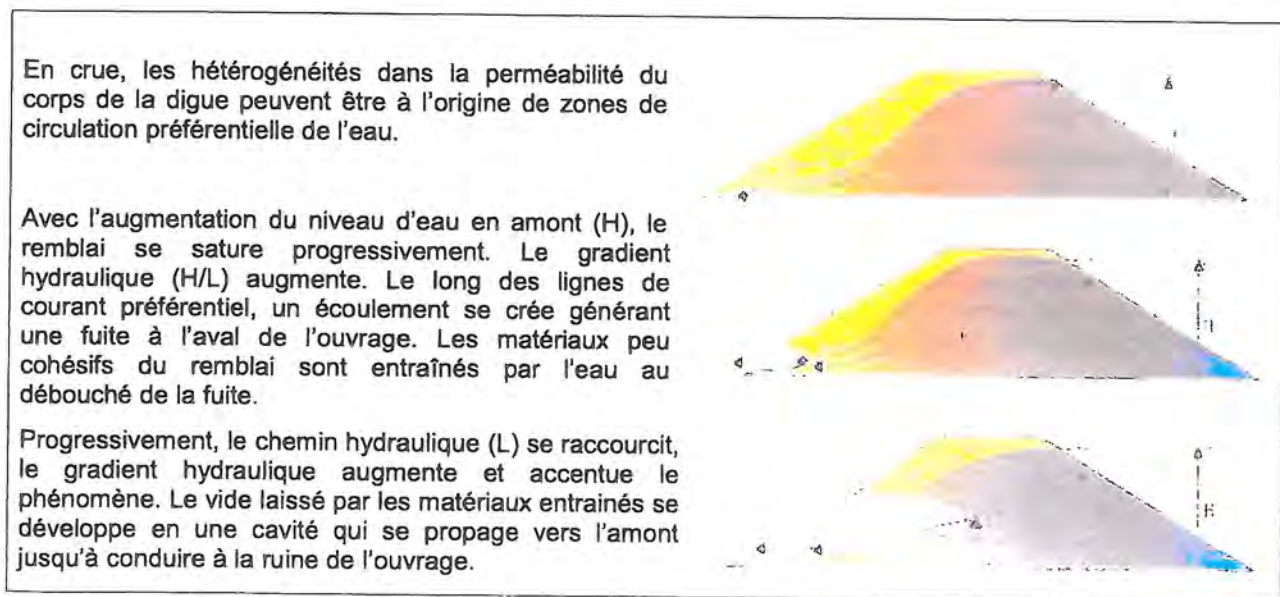
Illustration 5 : Conséquences du mécanisme d'érosion externe

- Les glissement de talus



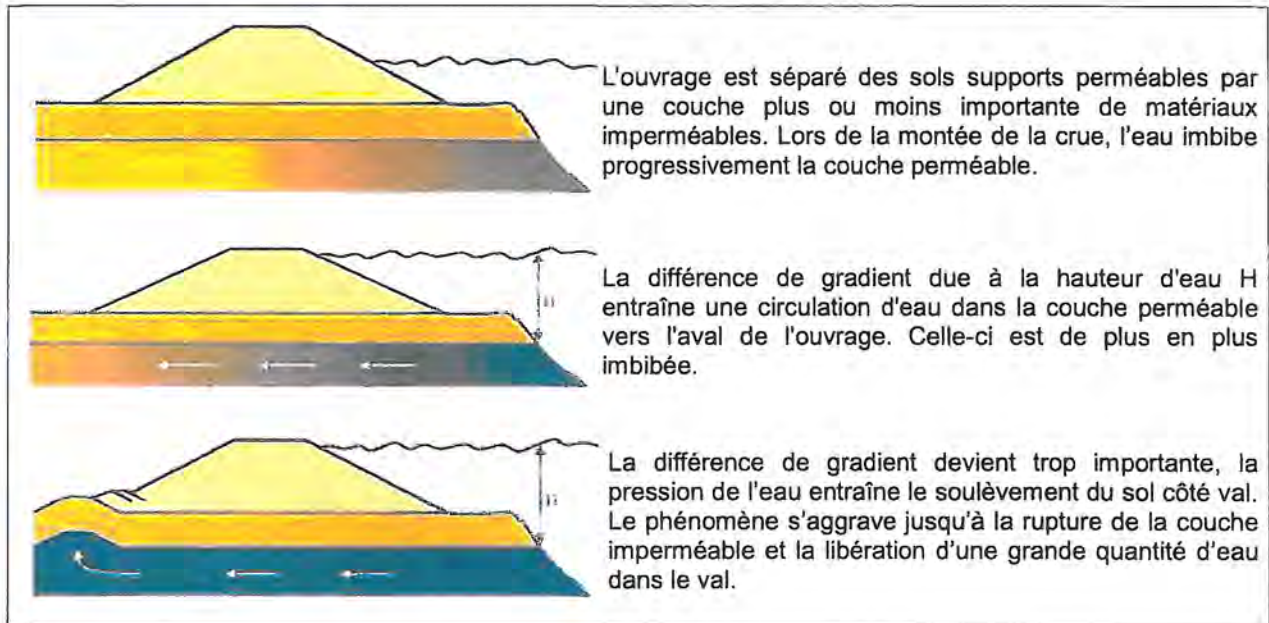
*Illustration 6 : Déstabilisation des talus d'une digue en glissements rotationnels*

- L'érosion interne



*Illustration 7 : Description du mécanisme d'érosion interne ou phénomène de renard*

- Le soulèvement hydraulique



*Illustration 8 : Mise en place d'un soulèvement hydraulique*

D'après le retour d'expérience sur les digues de Loire Moyenne, la surverse est le phénomène préférentiel susceptible de créer une brèche en très peu de temps, c'est à dire à l'échelle de la crue. Les ruptures connues n'ayant pas été causées par une surverse sont dues à une combinaison des autres mécanismes.

Les Laboratoires d'Angers et de Blois ont eu pour mission de quantifier ces modes de rupture de la manière la plus générale et de proposer une méthodologie systématique dans le but de pouvoir l'appliquer sur toutes les digues de Loire Moyenne. Le LR d'Angers a une compétence plus spécifique en ce qui concerne les mécanismes d'érosion interne et de glissements rotationnels, car ils sont associés directement aux propriétés géotechniques des matériaux de la digue et du sol support. L'étude de ces deux phénomènes m'a été confiée, elle sera développée dans le paragraphe I.4. Le LR de Blois est, quant à lui, plutôt intervenu sur les thématiques hydraulique et bathymétrie.

## 1.3 Démarche probabiliste

La démarche probabiliste présentée dans ce chapitre est une approche mathématique qui permet d'appliquer les règles de probabilités théoriques aux mécanismes considérés. J'ai proposé cette analyse au Comité Technique des études de dangers qui l'a retenue comme base pour ces études.

### 1.3.a Probabilité d'occurrence des crues

- Principe de discrétisation par période de retour

L'aléa « crue » peut être qualifié en terme d'occurrence et d'intensité. L'occurrence correspond à la période de retour de la crue considérée. Pour un fleuve donné, l'intensité d'une crue, caractérisée par une hauteur d'eau, une durée et une vitesse d'écoulement, est directement liée à sa période de retour.

On définit la probabilité qu'un débit pour une crue de période de retour  $T$  ne soit pas dépassé au cours d'une année, par :  $P(q_T) = 1 - \frac{1}{T}$

Pour exprimer la probabilité d'occurrence d'une crue de période de retour  $T$  donnée, il faut considérer une gamme de crues encadrant cette période  $T$ . Cette analyse permet de discrétiser l'espace probabiliste.

Ainsi, une gamme de crue de la crue décennale correspond aux crues comprises entre les crues de période de retour 3 ans et 30 ans.

La probabilité de la gamme de crue décennale vaut donc :

$$P(Q_{10}) = P(q_{30}) - P(q_3) = \left(1 - \frac{1}{30}\right) - \left(1 - \frac{1}{3}\right) = \frac{1}{3} - \frac{1}{30} = 0,3$$

L'encadrement de chaque gamme de crue doit être cohérent avec le nombre de périodes de retour considéré. Ainsi la somme de toutes ces gammes revient à couvrir l'espace temps jusqu'à la plus rare crue prise en compte. Ceci se traduit par :

$$\sum_{T=1}^{\infty} P(Q_T) = 1$$

- Cas pratiques considérés en fonction des situations de crue

D'après le guide des Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai<sup>2</sup>, les gestionnaires des ouvrages sont amenés à définir les gammes de crue à prendre en compte dans l'analyse en fonction de la situation à laquelle elles réfèrent (*Tableau 2*).

<sup>2</sup> COMITE FRANCAIS DES BARRAGES ET RESERVOIRS. *Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai*. Juin 2010, 114 p.

Situation de projet	Commentaires	Description	Etats limites
<b>SITUATIONS NORMALES D'EXPLOITATION</b>			
Situation normale d'exploitation	Niveau moyen de la rivière hors crue Ecoulement permanent établi Caractéristiques mécaniques à long terme	Etablissement du régime permanent de piézométrie dans le corps de la digue La piézométrie est imposée par le niveau de la rivière et éventuellement la nappe	Glissement de talus aval Glissement de talus amont Affouillement pied amont
<b>SITUATIONS TRANSITOIRES OU RARES</b>			
Situation rare d'étiage ou d'érosion de pied	Niveau d'étiage le plus fort de la rivière (périodicité 10 à 100 ans) Erosion en pied si tendance suspectée Caractéristiques mécaniques à long terme	Abaissement rare de la ligne d'eau après que le régime permanent ait été établi	Glissement de talus amont Affouillement pied amont
Situation rare de crue	Niveau de la cote de protection (cote du déversoir de sécurité d'une digue ou cote de la digue aménagée à résister à la surverse) Périodicité = 10 à 100 ans	Elévation de la ligne d'eau après que le régime permanent ait été établi Régime transitoire car les pressions interstitielles n'ont pas nécessairement le temps de s'établir	Glissement de talus aval Soulèvement pied aval Affouillement pied amont
Situation transitoire de décrue rapide	Depuis le niveau de crue rare de la rivière (cote de protection)	Abaissement rapide de la ligne d'eau avec un niveau piézométrique maintenu dans la digue au niveau de la crue considérée	Glissement de talus amont
<b>SITUATIONS EXCEPTIONNELLES</b>			
Situation exceptionnelle de crue	Cote des plus hautes eaux ou cote de la rivière, laissant encore une revanche pour se protéger des vagues Périodicité = 50 ou 1000 ans selon les risques		Glissement de talus aval Soulèvement pied aval Affouillement pied amont
<b>SITUATIONS ACCIDENTELLES</b>			
Situation (accidentelle) de crue ou situation de la crue de danger	Débit de crue de plein bord ou cote au-delà de laquelle l'ouvrage risque de subir des dégâts majeurs pouvant conduire à la rupture Périodicité supérieure à la précédente		Glissement de talus aval Soulèvement pied aval Affouillement pied amont
Situation accidentelle de séisme (SES)	On considère que cette situation ne peut pas être concomitante d'une crue	Effet des efforts d'inertie et surtout, dans certains cas, augmentation des pressions interstitielles	Glissement de talus (surtout aval) Liquéfaction

Tableau 2 : Principales situations de projet des digues à charge permanente et états limites associés  
Source : CFBR. Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai, 2010.

Si la probabilité d'occurrence d'une crue peut être relativement bien qualifiée, le risque d'une défaillance de la digue selon les différents modes identifiés ne peut être approché que de façon qualitative. Toutefois, il est utile de tenter d'associer une probabilité arbitraire aux différentes situations rencontrées de façon à pouvoir comparer les différents scénarios, ce qui permettra ainsi de pondérer les mécanismes de rupture les uns par rapports aux autres.

### 1.3.b Probabilités relatives aux mécanismes de rupture

On peut considérer chaque mécanismes indépendants les uns des autres mais ils ne peuvent exister sans la réalisation de l'évènement « crue ». Cette condition s'exprime par la définition des probabilités conditionnelles :

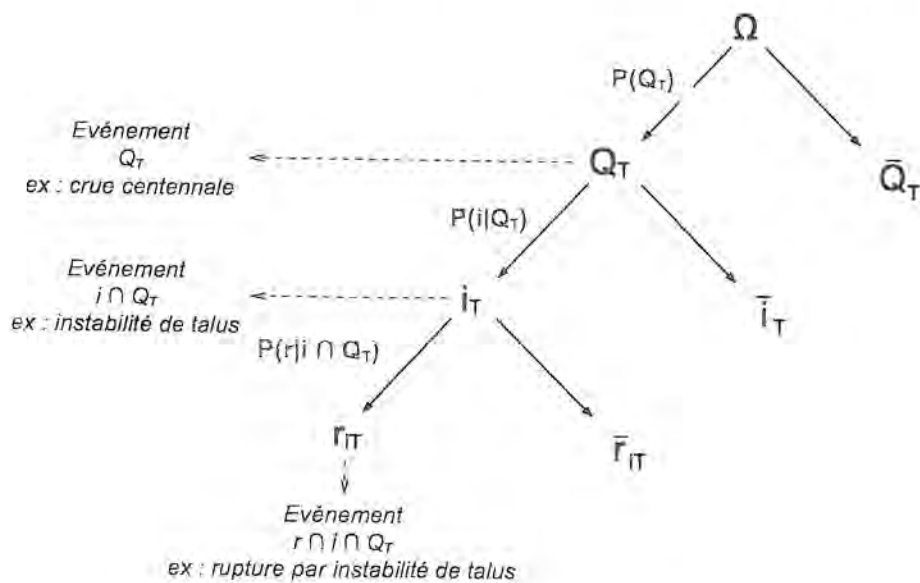
« La probabilité  $P(B|A)$  que l'évènement  $B$  soit réalisé sachant que  $A$  s'est produit est définie lorsque  $P(A) > 0$  par :  $P(B|A) = \frac{P(A \cap B)}{P(A)}$  ou  $P(A \cap B) = P(B|A) \times P(A)$  »

Dans le cas des études de dangers, chaque mécanisme de rupture a été décomposé en deux évènements :

- l'évènement « Apparition du mécanisme  $i$  de rupture sachant qu'une crue de la gamme de période de retour  $T$  s'est produite » ;
- l'évènement « Rupture de la digue sachant l'apparition du mécanisme  $i$  ».

Cette décomposition permet d'explicitier le fait que l'apparition d'un phénomène d'érosion de la digue dépend de l'importance de la crue, et que la rupture de l'ouvrage est conditionnée par l'importance du phénomène d'érosion.

Ce conditionnement successif peut être représenté sous forme d'un arbre de probabilités dont la forme et les propriétés sont les suivantes :



Où :

- $\Omega$  est l'ensemble des événements,  $\Omega = 1$  ;
- $Q_T$  est l'événement « *Crue de la gamme de crue de période de retour T* » ;
- $i_T = i \cap Q_T$  est l'événement « *Apparition du phénomène i pendant l'événement  $Q_T$*  » ;
  - i peut être : - la surverse notée 's'
  - l'érosion externe notée 'ee'
  - l'érosion interne notée 'ei'
  - les glissements de talus notés 'g'
  - le soulèvement hydraulique noté 'sh'

Une analyse quantifiée d'un des mécanismes  $i$  qui conduit par exemple à un facteur de sécurité  $F$ , permet de définir un niveau de risque d'apparition du phénomène. En effet la probabilité  $P(i_T)$  est appréciée en assimilant ce facteur à une probabilité, par exemple  $F > 1,5$  signifie une faible probabilité d'apparition du phénomène, soit  $P(i_T) = 0,3$ .

- $r_{iT} = r \cap i \cap Q_T$  est l'événement  
« *Rupture de la digue due au mécanisme i pendant la crue  $Q_T$*  » ;

Le risque réel de rupture par un phénomène est apprécié au dire d'expert, suivant, par exemple, les connaissances historiques de rupture des digues.

- l'événement contraire de chaque événement  $r$  est noté  $\bar{r}$ .

Pour obtenir la probabilité de rupture par un phénomène  $i$  pour une crue de la gamme de période de retour  $T$ , il convient de multiplier les branches en remontant vers la racine de l'arbre. Par exemple pour obtenir la probabilité de rupture par surverse pour une crue décennale  $P(r \cap s \cap Q_{10})$ , on calcule :

$$P(r \cap s \cap Q_{10}) = P(r|s \cap Q_{10}) \times P(s|Q_{10}) \times P(Q_{10})$$

Pour obtenir la probabilité de rupture par un phénomène  $i$  pour l'ensemble des crues considérées, on ajoute les probabilités de rupture dues à ce phénomène. Par exemple, pour obtenir la probabilité de rupture par surverse pour les crues d'ordre décennale et centennale, on a :

$$P(r \cap s) = P(r \cap s \cap Q_{10}) + P(r \cap s \cap Q_{100})$$

Pour caractériser la probabilité de rupture d'un tronçon quel que soit le mécanisme et la crue, il faut utiliser l'événement contraire. En effet, un tronçon n'est pas amené à rompre s'il n'y a ni rupture par surverse, ni par glissement, ni par aucun autre mode. Cette combinaison est une multiplication des événements contraires des événements « *Rupture par le mécanisme i* ». On écrit :

$$P(\bar{r} \cap s) = 1 - P(r \cap s) \quad \text{Où } r \cap s \text{ est l'événement « Rupture par surverse »}$$

et  $\bar{r} \cap s$  est l'événement contraire  
c'est à dire « Absence de rupture par surverse ».

La probabilité qu'il n'y ait ni rupture par surverse, par érosion externe, par érosion interne, par glissement, par soulèvement hydraulique, s'écrit donc :

$$P[(\bar{r} \cap s) \cap (\bar{r} \cap ee) \cap (\bar{r} \cap ei) \cap (\bar{r} \cap g) \cap (\bar{r} \cap sh)] = [1 - P(r \cap s)] \times [1 - P(r \cap ee)] \times [1 - P(r \cap ei)] \times [1 - P(r \cap g)] \times [1 - P(r \cap sh)]$$

La probabilité de rupture  $P(r)$  d'un tronçon quel que soit le mode et la crue est donc la probabilité de l'événement contraire à celui décrit ci-dessus et s'exprime par :

$$P(r) = 1 - \{ [1 - P(r \cap s)] \times [1 - P(r \cap ee)] \times [1 - P(r \cap ei)] \times [1 - P(r \cap g)] \times [1 - P(r \cap sh)] \}$$

## I.4 Etude des mécanismes d'érosion interne et de glissements de talus

La deuxième partie de mon travail consistait à quantifier de manière générale les risques d'érosion interne et de glissements de talus, afin de pouvoir leur associer une probabilité d'instabilité puis de rupture pour un tronçon donné.

### I.4.a Erosion interne ou de renard hydraulique

Le phénomène d'érosion interne apparaît lorsqu'une ligne de saturation s'établit dans le corps de la digue lors d'une crue. Si la force de percolation est suffisante, l'eau qui transite dans la digue ou dans la fondation va arracher sur son parcours des particules et les entraîner avec elle vers son exutoire à l'aval de l'ouvrage. L'arrachement de la matière n'est possible que si la vitesse de l'eau à la résurgence permet d'engendrer des forces hydrauliques capables de vaincre les forces de liaison entre les grains (forces de frottement) et la pesanteur. C'est le phénomène de boulangerie.

Cet équilibre revient à définir un gradient critique à partir duquel les particules sont arrachées. L'entraînement des particules est préjudiciable dès lors qu'elles sont expulsées à l'extérieur de l'ouvrage, laissant un volume vide à leur emplacement initial (*Illustration 9*).



*Illustration 9 : Galerie creusée à travers un ouvrage hydraulique par érosion interne*

Ce phénomène, appelé « renard hydraulique » se développe donc à partir du point d'émergence de l'écoulement et progresse de manière régressive et rapide vers l'amont.

Le critère utilisé pour appréhender le risque de renard par boulangerie est le gradient.



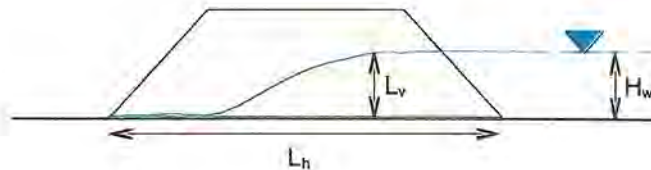
Le phénomène de boulangance apparaît dès que le gradient hydraulique atteint ou dépasse la valeur critique  $\frac{\gamma_l}{\gamma_w}$ , rapport du poids volumique immergé du terrain au poids volumique de l'eau. Le risque de renard est donc directement fonction du gradient de potentiel. Comme la hauteur d'eau  $H_w$  à l'amont de l'ouvrage est imposée, c'est la longueur  $L$  des cheminements qui est le paramètre essentiel.

Dans la bibliographie courante<sup>3</sup>, on retrouve deux méthodes généralement utilisées pour caractériser la stabilité des ouvrages en terre.

#### 1.4.a.i Méthode de Lane

Cette méthode distingue les cheminements verticaux de longueur  $L_v$  et les cheminements horizontaux de longueur  $L_h$ . La règle de Lane exprime la condition nécessaire pour qu'un renard ne se forme pas, elle s'écrit :

$$L_v + \frac{1}{3}L_h \geq cH_w$$



$c$  étant un coefficient dont les valeurs minimales varient suivant le terrain :

Nature du terrain	$c$
Sables fins et limons	8,5
Sables fins	7
Sables moyens	6
Gros sables	5
Petits graviers	4
Gros graviers	3
Mélange de graviers et de gros galets	2,5
Argile plastique	3
Argile consistante	2
Argile dure	1,8

Tableau 3 : Coefficients de sols pour la méthode de Lane

Source : Ministère de l'Agriculture. Techniques des barrages et aménagement rural, 1977.

3 MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE - DIRECTION DE L'AMÉNAGEMENT. *Technique des barrages en aménagement rural*. Septembre 1977, 325 p.  
 LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSEES. *Hydraulique des sols*. Novembre 1968, 245 p.  
 GEORGE FILLIAT. *La pratique des sols et fondations*. Edition du Moniteur. Paris, 1981, 1392 p. ISBN 2862821624.

### 1.4.a.ii Méthode de Bligh

Cette méthode est basée sur des principes similaires à celle précédemment évoquée, si ce n'est qu'elle ne considère que le chemin horizontal  $L_h$  à l'interface digue/sol support. En effet, compte-tenu de la faible perméabilité des matériaux constituant les digues, on peut supposer que les écoulements se font préférentiellement sous la digue et de façon horizontale.

La condition de stabilité selon Bligh est :  $\frac{L_h}{H_w} > 6$

Les formules de Lane et Bligh permettent de définir, de façon simple, un gradient de potentiel pour un ouvrage en terre sous une charge constante (ex. barrages), c'est à dire qu'elles ne prennent pas en compte le caractère transitoire de la crue. Appliquer ces formules sur les digues de protection contre les inondations revient à sous-estimer le gradient critique et donc à sous-évaluer le facteur de sécurité.

La méthode retenue pour l'étude de dangers des digues de Loire Moyenne est celle de Bligh car, par expérience, elle est assez représentative de la réalité et nécessite peu de connaissances sur le tronçon de digue étudié. Le lien entre le rapport calculé par la méthode de Bligh, les probabilités d'apparition du phénomène de renard et celles de rupture par ce phénomène sont données dans le tableau suivant :

Rapport de Bligh $\frac{L_h}{H_w}$	$\frac{L_h}{H_w} \geq 9$	$9 > \frac{L_h}{H_w} \geq 8$	$8 > \frac{L_h}{H_w} \geq 7$	$7 > \frac{L_h}{H_w} \geq 6$	$6 > \frac{L_h}{H_w}$
$P(ei_T)$	0,01	0,1	0,3	0,7	1
$P(r_{eiT})$	0,01	0,1	0,3	0,5	0,8

Tableau 4 : Transcription du rapport de Bligh en probabilités

La probabilité d'apparition du phénomène  $P(ei_T)$  est calée en fonction du gradient de Bligh. La probabilité de rupture par érosion interne  $P(r_{eiT})$  est, quant à elle, appréciée à dire d'expert d'après le retour d'expériences et les archives de Loire Moyenne. Cette probabilité n'atteint jamais la valeur 1 car d'après les archives les plus anciennes, il n'y a jamais eu de rupture par érosion interne seule.

Il faut cependant noter que le calcul amenant à ces valeurs de probabilité ne tient pas compte de la présence d'éléments stabilisants (éléments drainants, rideaux étanches, etc.) ou aggravants (ouvrages traversants, canalisations, etc.). L'introduction de ces paramètres extérieurs s'exprime par une réduction ou une augmentation de la probabilité de rupture en fonction de l'action du critère sur la stabilité de l'ouvrage. Par exemple,  $P(r_{eiT}) \times 1,5$ , en présence d'ouvrages traversants de type habitation dans la digue. Ces coefficients pondérateurs ont été définis en accord avec le LR de Blois (Tableau 5).

<b>Critères</b>	<b>Coefficients pondérateurs</b>
<b>Stabilisants</b>	
Renforcements en palplanches	0.1
Éléments drainants	0.8
Réaménagement de la digue (suite à des désordres)	0.8
<b>Aggravants</b>	
Aménagements anthropiques (station de pompage, etc.)	1.5
Ouvrages traversants (habitations, etc.)	1.5
Anciennes brèches	5
Zones de fuite ou résurgences d'eau	10

*Tableau 5 : Coefficients pondérateurs du mécanisme d'érosion interne, associés aux paramètres extérieurs*

La méthode de Bligh présentant un modèle très simplifié du gradient hydraulique, les zones sensibles devront faire l'objet d'une étude spécifique plus poussée, tenant compte de la variation du niveau d'eau devant la digue et du temps durant lequel la digue est en eau. L'analyse complémentaire proposée en annexe 2 est adaptée d'après les études développées dans les FLOOD site Project Report<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> EUROPEAN COMMUNITY SIXTH FRAMEWORK PROGRAMME FOR EUROPEAN RESEARCH AND TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT. FLOOD site Project Report - Failure mechanisms for flood defence structures. Février 2007, 211 p.

### ***1.4.b Glissement de talus***

Lors d'une crue, il s'établit une ligne d'eau dans les matériaux de la digue, dépendant de la perméabilité de cette dernière et de la durée d'imbibition. Cette charge hydraulique modifie l'équilibre mécanique d'ensemble pouvant générer des glissements de talus, qui apparaissent soit, dans des conditions de vidange, côté rivière (*Illustration 10*), soit, par des instabilités côté val. Ces surfaces de rupture peuvent être modélisées par des cercles de rupture rotationnelle.



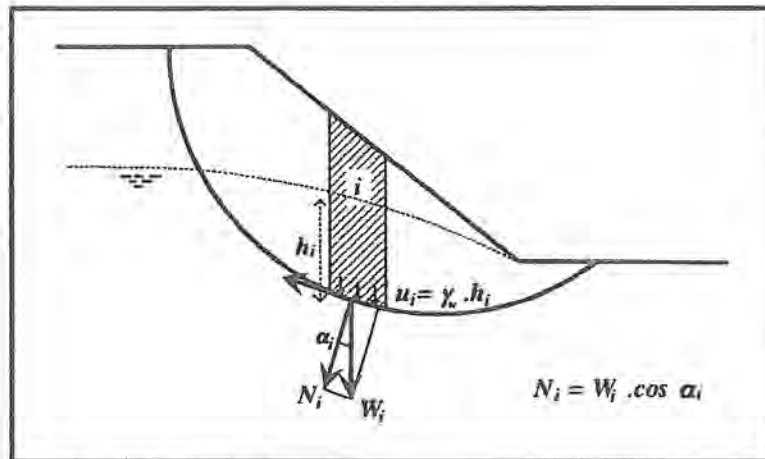
*Illustration 10 : Niches d'arrachement successives d'un glissement affectant un pan de digue*

#### ***1.4.b.i Théorie de modélisation de la rupture rotationnelle***

La modélisation numérique est un moyen efficace et courant pour quantifier cette instabilité à l'aide d'un facteur de sécurité  $F$ .

Les analyses classiques de la stabilité reposent sur les méthodes des tranches de Fellenius et de Bishop et la méthode des perturbations.

Dans ces méthodes, le sol est divisé en tranches verticales discrètes ou infinitésimales dont on étudie l'équilibre statique (*Illustration 11*). Le coefficient de sécurité global  $F$ , supposé constant sur la surface de rupture, est défini comme le rapport de la contrainte de cisaillement  $\tau_{\max}$  à la contrainte  $\tau$  mobilisée le long de la surface de rupture.



$W_i$  : poids de la tranche  $i$

$\alpha_i$  : angle de la normale à la base de la tranche  $i$  avec la verticale

$u_i$  : pression interstitielle à la base de la tranche

Illustration 11 : Equilibre d'une tranche de sol

Source : CFBR. Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai, 2010.

Ce type de calcul est aujourd'hui facilement réalisable à l'aide de logiciels de modélisation numérique développés depuis une vingtaine d'années. Le programme TALREN 97<sup>5</sup> est un logiciel courant de calcul de stabilité des ouvrages en terre par surface de rupture potentielle, mis au point par TERRASOL.

Nous avons utilisé TALREN dans le but de calculer des facteurs de sécurité pour des digues types couvrant 95 % des digues de Loire Moyenne.

La création du modèle a nécessité la définition des paramètres suivants :

- la géométrie de l'ouvrage, modélisée par des points et segments ;
- les caractéristiques des sols  $\gamma, \phi$  et  $c$ , respectivement le poids volumique, l'angle de frottement interne et la cohésion ;
- les données hydrauliques, modélisées sous forme de nappes interne et externe.

#### 1.4.b.ii Calage du modèle

- Géométrie type de la digue

La géométrie d'une digue peut globalement se simplifier sous la forme d'un trapèze (Illustration 12). Les glissements étudiés concernent potentiellement le talus côté val ou côté Loire (décrue rapide). Le toit des digues est suffisamment large pour que la stabilité côté val soit indépendante des conditions de stabilité côté Loire et inversement.

Généralement, la pente de talus côté Loire correspond à une valeur de 2/3. Les pentes de talus côté val varient entre 1/2,5, 1/2 et 2/3. Sachant que le lit mineur du fleuve est relativement plat, l'étude

<sup>5</sup> TERRASOL. Guide d'utilisation TALREN 97 : Logiciel pour l'analyse de la stabilité des structures géotechniques.1997, 222 p.

de stabilité côté Loire utilise la même géométrie que l'étude de stabilité côté val avec une pente de 2/3 ; seules les données hydrauliques seront modifiées.

Les données d'entrée du modèle sont la hauteur de la digue H1 et la pente P qui varient respectivement de 3 à 7 m et de 2/3 à 1/2,5. J'ai observé l'influence de ces paramètres sur le facteur de sécurité.

- **Caractéristiques de sols**

D'après les reconnaissances géotechniques des digues de la Loire Moyenne, le corps des ouvrages de protection est constitué d'un mélange de sables, limons et argiles. On y retrouve aussi des horizons de limons, sables ou argiles, purs de faible épaisseur dont l'influence sur le comportement mécanique de la digue est négligeable. La digue est donc assimilée à un sol homogène, le sol n°1.

Les sols de fondation de l'ouvrage peuvent être différenciés en trois catégories :

- Les "limons", qui sont en fait un mélange de matériaux limono-sableux, argileux, limoneux ou encore sablo-limoneux, ont les caractéristiques du sol n°2 ;
- Les "sables" qui correspondent aux sables de Loire (dépôts alluvionnaires) et plus globalement aux matériaux non cohérents (graves etc.) sont le sol n°3 ;
- Les "argiles" qui sont les argiles du terrain naturel ou des matériaux purement cohérents (dépôts alluvionnaires ou dégradation de substratum) correspondent au sol n°4.

Les valeurs des caractéristiques de ces sols (*Tableau 6*) ont été appréciées à travers différentes études et confirmées par les données des Laboratoires de Blois et d'Angers.

sol n°	1	2	3	4
$\gamma$	18	18	18	18
$\Gamma_{s1}$	1	1	1	1
c	5	5	0	10
$\Gamma_c$	1.1	1.1	1.1	1.1
$\phi$	30	27	32	25
$\Gamma_\phi$	1.1	1.1	1.1	1.1

*Tableau 6 : Caractéristiques de sol retenues pour la modélisation*

Avec

- $\gamma$  : le poids volumique des matériaux
- $\phi$  : l'angle de frottement
- c : la cohésion
- $\Gamma_{s1}$ ,  $\Gamma_c$  et  $\Gamma_\phi$  sont des coefficients pondérateurs expliqués dans la partie 1.4.b.iii

D'après les reconnaissances géotechniques compilées dans la base de données présentée en annexe 1, on rencontre la lithologie sous la digue dans l'ordre suivant, du haut vers le bas : limons, sables, argiles. Les épaisseurs de couches varient entre 2 et 8 m (d'après les sondages à la tarière limités à 10 mètres de profondeur de forage). L'ordre des couches est parfois différent, on peut aussi ne rencontrer qu'une seule couche homogène sous l'ouvrage.

Plusieurs configurations de sols ont été modélisées afin de connaître l'influence de leurs caractéristiques sur les glissements de talus. L'épaisseur des sols n°2, 3 et 4 varient entre 0, 2 et 4 m.

- Calage des données hydrauliques

L'anisotropie de perméabilité  $a = \frac{K_h}{K_v}$  des matériaux du remblai joue un rôle essentiel sur la distribution des écoulements (hauteur de résurgence de la ligne d'eau côté val, gradient en sortie) pour la configuration de la digue actuelle. Les valeurs de perméabilités horizontale  $K_h$  et verticale  $K_v$  des matériaux de la digue ne sont toutefois pas connues de façon précise.

Une modélisation des écoulements dans l'ouvrage a été réalisée par le bureau ISL<sup>6</sup> en fonction de différents rapports de perméabilités  $\frac{K_h}{K_v}$  (valeurs comprises entre 1 et 20). A l'issue de cette étude, une anisotropie comprise entre 5 et 10 est statistiquement représentative des lignes d'eau les plus couramment observées. En accord avec le LR de Blois et la DREAL Centre, c'est la ligne d'eau la plus pénalisante, correspondant à  $a = \frac{K_h}{K_v} = 5$  qui a été retenue.

Il est important de noter que ce paramètre (niveau d'eau dans la digue) est prépondérant dans le calcul de stabilité de l'ouvrage puisqu'il conditionne la valeur de pression interstitielle utilisée par le logiciel. Etant donné la difficulté à mesurer les perméabilités des matériaux constituant la digue, la forme de l'écoulement à travers celle-ci ne peut être approchée que de manière qualitative.

- Hypothèses de calcul

La figure suivante illustre la géométrie type de l'ouvrage avec ces paramètres H1 et P variables, la nature des sols de fondation d'épaisseur variable également, ainsi que le niveau d'eau Hw fonction du niveau de crue considérée. J'ai effectué plusieurs calculs TALREN afin de déterminer l'influence de chaque paramètre sur le facteur de sécurité et donc sur la stabilité du talus.

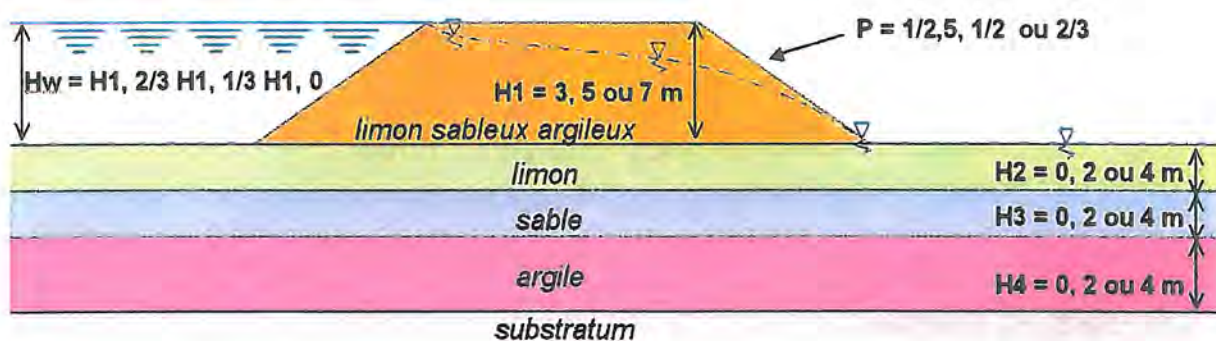


Illustration 12 : Hypothèses de calcul pour la modélisation

En faisant varier chaque paramètre un par un, pour une rupture rotationnelle côté val ou Loire, nous obtenons un total de 1800 cas théoriques à modéliser, ce qui couvre plus de 95 % des configurations possibles pour les digues de la Loire.

6 ISL. Renforcement de la levée de protection du val de l'Authion contre les crues de la Loire – Avant projet. Février 2005, 94 p.

### 1.4.b.iii Modélisation

- Influence du sol de fondation sur le coefficient de sécurité

Pour les premiers calculs de stabilité, le talus étudié est situé côté val. On cherche à mettre en évidence l'influence des sols de fondation sur la valeur du coefficient de sécurité. La modélisation permet de visualiser le cercle de rupture dont le centre correspond au coefficient de sécurité le plus faible, en rouge sur les illustrations 13, 14, 15.

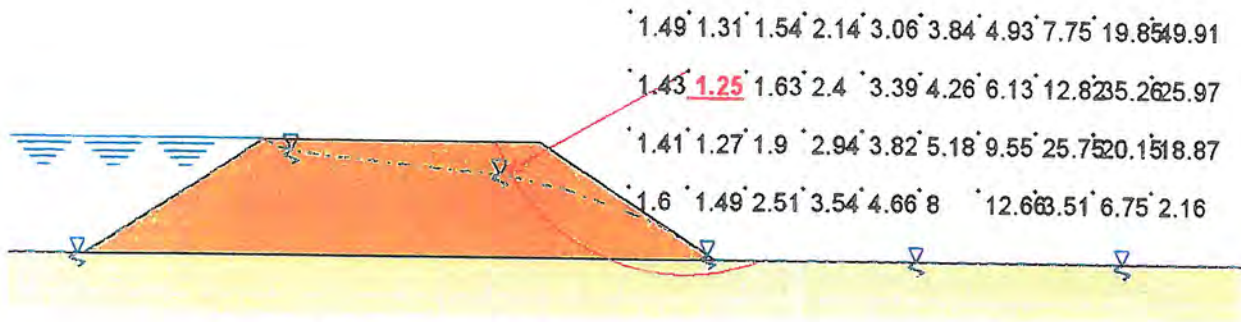


Illustration 13 : Glissement de talus pour un ouvrage fondé sur des limons

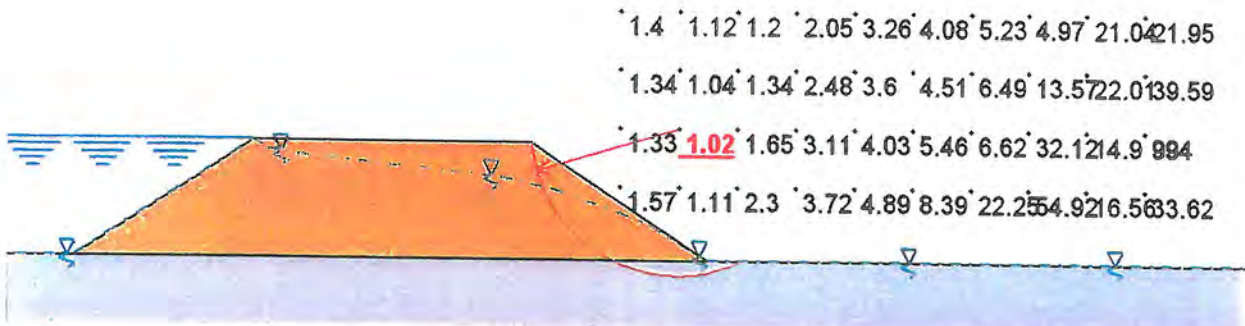


Illustration 14 : Glissement de talus pour un ouvrage fondé sur des sables

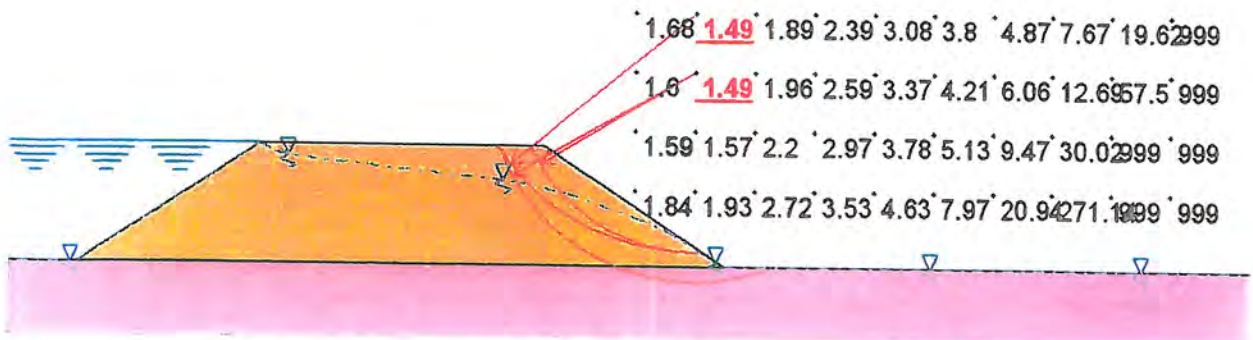


Illustration 15 : Glissement de talus pour un ouvrage fondé sur des argiles



D'une manière générale, les cercles de rupture n'affectent seulement que les 2 premiers mètres de sol sous le remblai, quelle que soit la configuration des sols de fondation. Cette observation a été vérifiée pour les digues de 3, 5 et 7 m pour une hauteur d'eau égale à celle de la digue ( $H_w = H_1$ ), cas le plus défavorable.

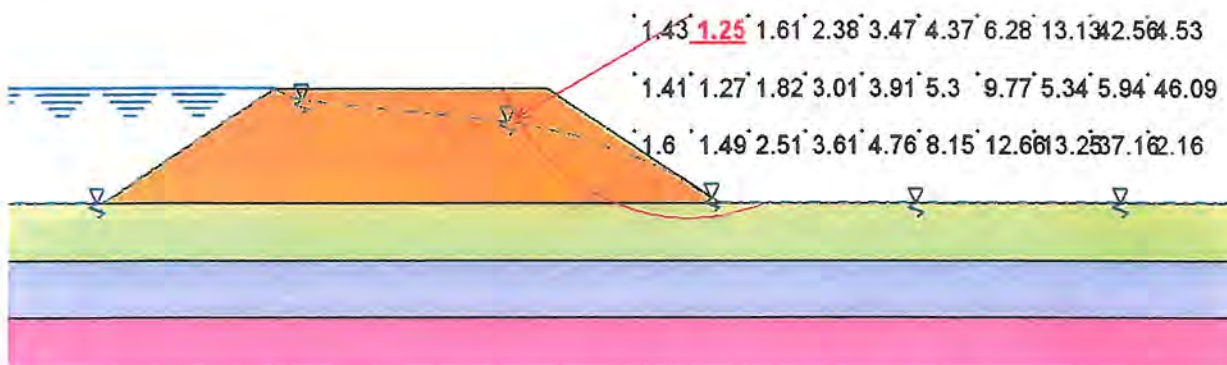
Le sable apparaît comme le sol support le plus défavorable à la stabilité de l'ouvrage. Cette observation est à mettre en relation avec la valeur de la cohésion qui est nulle. Ainsi, l'argile qui présente une plus forte cohésion confirme cette tendance avec des calculs dont le coefficient de sécurité est toujours plus élevé que celui pour les deux autres sols. Le sol n°2 a une cohésion moyenne entre les sables et les argiles, le coefficient F obtenu correspond globalement à une valeur intermédiaire des deux autres.

Dans la plupart des cas, le cercle de rupture n'affecte pas ou peu la couche d'argile, alors seuls les paramètres de la digue sont à prendre en compte, ce qui est aussi le cas pour un ouvrage sur le rocher.

Ces différentes observations nous ont permis de simplifier les configurations pour le sol de fondation. Ainsi j'ai retenu trois sols supports d'au moins 2 m d'épaisseur : limon, sable et substratum. Le nombre de cas étudiés est ainsi réduit à 200 et englobe toujours la majorité des digues.

- Comparaison des glissements de talus coté val et côté Loire

Afin de simplifier encore le nombre de cas étudiés, j'ai comparé les conditions de stabilité des glissements de talus côté val et ceux côté Loire (*Illustrations 16 et 17*).



*Illustration 16 : Modélisation d'un glissement de talus côté val*

Le Laboratoire de Blois dispose de nombreuses données hydrauliques sur les hauteurs de crues de la Loire. D'après ces données, la décrue rapide correspondrait en première analyse à une diminution du niveau d'eau de 2 m par rapport au niveau haut de la crue. Dans ce cas le talus côté Loire est toujours plus stable que le talus côté val. Une hypothèse plus défavorable consiste à retenir un niveau d'eau résiduel plus bas, à +1,00 m par rapport aux conditions courantes (*Illustration 17*).

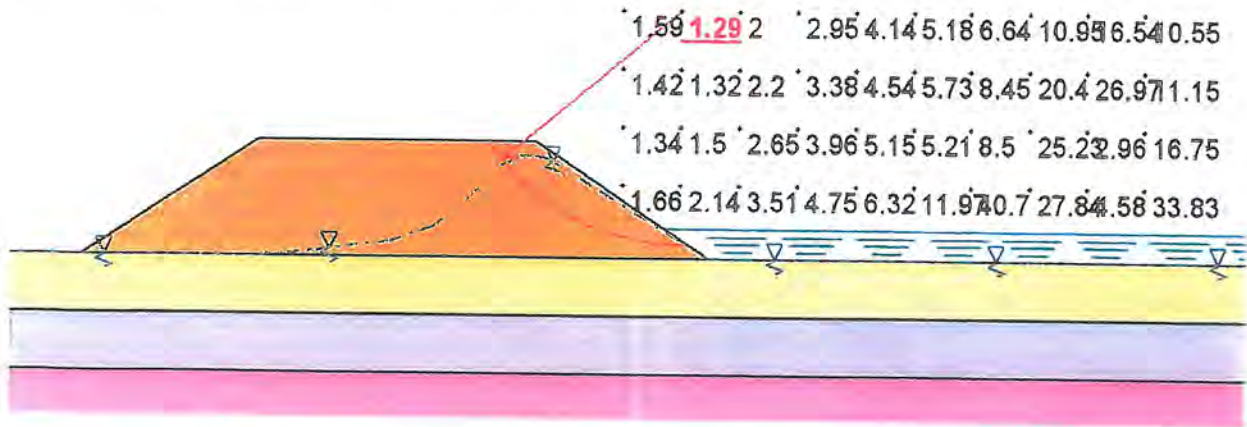


Illustration 17 : Modélisation d'un glissement de talus côté Loire, lors d'une décrue rapide

Cette analyse est plus défavorable et va dans le sens de la sécurité. En outre, dans différentes configurations de la digue étudiées (hauteur, pente de talus, sol de fondation etc.), il s'avère que le niveau de stabilité calculé pour le côté val (Illustration 16) et la vidange rapide avec un niveau résiduel à +1,00 m (Illustration 17) est très comparable pour une même pente, c'est à dire que les coefficients de sécurité diffèrent de moins de 5 % (variation au centième). Cette similitude nous a permis de simplifier et de réduire le nombre de calculs à 100 cas.

#### 1.4.b.iv Résultats

Lors de la modélisation, chaque calcul a été réalisé en accord avec les Eurocodes structuraux. Ces textes constituent un ensemble de normes européennes destinées à proposer un cadre commun pour la conception structurale des bâtiments et des ouvrages de génie civil, couvrant les aspects géotechniques, les situations sismiques, l'exécution et les structures provisoires. Ces normes ont progressivement été transposées en normes nationales : NF EN 1990 à NF EN 1999 pour la France<sup>7</sup>.

Pour ce qui relève de l'application de ces textes au domaine des ouvrages hydrauliques en remblai, la norme NF EN 1990 « Bases de calcul des structures » s'applique à la justification de la stabilité des ouvrages. Selon cette norme, la sécurité du calcul réside dans les deux points ci-dessous :

- les valeurs de calculs de  $c'$  et  $\phi'$  sont les valeurs caractéristiques, divisées par des coefficients partiels ;
- on applique ensuite un coefficient de modèle (Tableau 7).

Situation...	Coefficient partiel $\gamma_m$ sur $c'$ et $\tan \phi'$	Coefficient partiel $\gamma_m$ sur le poids volumique	Coefficient de modèle $\gamma_d$
normale d'exploitation	1,25	1	1,2
transitoire ou rare	1,1	1	1,2
exceptionnelle de crue (PHE)	1,1	1	1,2
extrême de crue	1	1	1,1
accidentelle	1	1	1,1

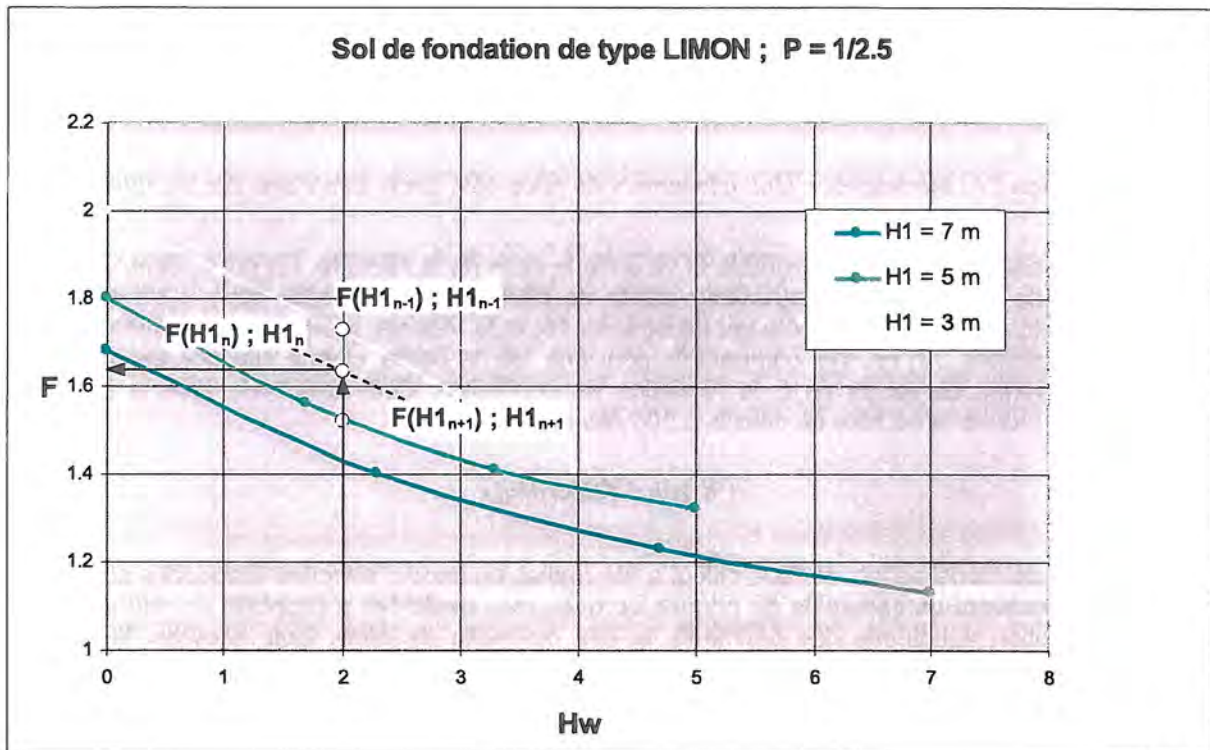
Tableau 7 : Coefficients partiels et de modèle pour le calcul de stabilité d'ensemble aux Etats Limites Ultimes (ELU)

Source : CFBR. Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai, 2010.

<sup>7</sup> COMITE FRANCAIS DES BARRAGES ET RESERVOIRS. Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai. Juin 2010, 114 p.

Dans les études de dangers, les situations considérées étant principalement les crues transitoires ou rares et exceptionnelles, le coefficient pondérateur appliqué sur la cohésion et l'angle de frottement selon les Eurocodes est 1,1 et la valeur recherchée pour justifier la stabilité de l'ouvrage est  $\gamma_d = 1,2$ .

Après avoir entré ces dernières données dans le modèle, j'ai réalisé la centaine de calculs de stabilité à la rupture rotationnelle avec les hypothèses définies ci-dessus. J'ai obtenu une valeur de coefficient de sécurité pour chaque cas que nous avons ensuite mis sous forme d'abaques, présentés en annexe 3 et dont un exemple est donné sur le graphe ci-après (*Illustration 18*).



*Illustration 18 : Représentation du coefficient de sécurité F pour chaque hauteur de digue H1 en fonction de la hauteur d'eau Hw*

Par interpolation des courbes des abaques, il est possible de déduire un coefficient de sécurité quelle que soit la hauteur exacte de la digue, grâce à la relation :

$$F(H1_n) = F(H1_{n+1}) - [(F(H1_{n+1}) - F(H1_{n-1})) \times \frac{H1_n - H1_{n+1}}{H1_{n-1} - H1_{n+1}}]$$

Par exemple, on cherche  $F(H1_n)$  et on connaît :

- $F(H1_{n+1}) = 1,52$  ;  $H1_{n+1} = 5$  ;
- $H1_n = 4$  ;
- $F(H1_{n-1}) = 1,73$  ;  $H1_{n-1} = 3$  ;

$$F(H1_n) = 1,52 - [(1,52 - 1,73) \times \frac{4 - 5}{3 - 5}] = 1,62$$

Sur cet exemple, la pente est fixe et on cherche une valeur de F pour une hauteur de digue comprise entre celles modélisées.

Dans le cas où la pente de la digue n'est pas exactement celle fixée dans les abaques, on calcule F pour les deux pentes encadrant celle recherchée. Son coefficient de sécurité sera obtenu par une combinaison linéaire des deux valeurs de F, similaire à celle donnée précédemment.

#### 1.4.b.v Appréciation des probabilités associées au mécanisme

Le coefficient F ainsi obtenu est directement comparé à la valeur du coefficient de modèle  $\gamma_d$ . Cette comparaison aboutit à la valeur d'une probabilité d'apparition d'un glissement rotationnel, elle s'exprime par :

$$P(g_T) = 1 - \max\left(\frac{F - \gamma_d}{\gamma_d}; 0\right) \quad (\text{si } P(g_T) < 0 \text{ alors on écrit } P(g_T) = 0)$$

Par exemple, si  $F = 1,62$  :

$$P(g_T) = 1 - \max\left(\frac{1,62 - 1,1}{1,1}; 0\right) = 0,53$$

La probabilité de rupture de l'ouvrage par glissement est liée à cette probabilité d'apparition du phénomène (Tableau 8). Contrairement à la probabilité d'une instabilité de talus, qui est approchée par un calcul du coefficient de sécurité, la probabilité de rupture est appréciée au dire d'expert, d'après les connaissances historiques du site. La valeur maximale que peut atteindre  $P(r_{gT})$  est 0,3 car la probabilité pour qu'un glissement soit la cause d'une rupture d'ouvrage reste faible.

$P(g_T)$	$P(g_T) < 0,1$	$0,1 \leq P(g_T) < 0,3$	$0,3 \leq P(g_T) < 0,7$	$0,7 \leq P(g_T) < 1$	$1 \leq P(g_T)$
$P(r_{gT})$	0,01	0,05	0,1	0,2	0,3

Tableau 8 : Relation entre la probabilité d'une instabilité (rupture rotationnelle) et la probabilité qu'elle engendre une rupture de digue

Il faut cependant noter que le calcul amenant à ces valeurs de probabilité ne tient pas compte de la présence d'éléments stabilisants (perré maçonné, enrochement en pied de digue etc.) ou aggravants (infiltration d'eau ou résurgence etc.). L'introduction de ces paramètres extérieurs s'exprime par une réduction ou une augmentation de la probabilité de rupture en fonction de l'action du critère sur la stabilité de l'ouvrage. Par exemple  $P(r_{gT}) \times 0,3$  si on a la présence d'enrochement qui stabilise le talus, par un poids en pied de digue. Ces coefficients pondérateurs ont été définis en accord avec le LR de Blois (Tableau 9).

Critères	Coefficients pondérateurs
<b>Stabilisants</b>	
Renforcements enrochements ou banquettes	0,3
<b>Aggravants</b>	
Sismicité régionale	1,1 à 1,5 selon région
Anciennes brèches	10
Zones de fuite ou résurgences d'eau	10

Tableau 9 : Coefficients pondérateurs du mécanisme de glissement, associés aux paramètres extérieurs

## I.5 Application sur un site test : Saint Clément des Levées

L'analyse des mécanismes de rupture, érosion interne et glissement de talus pour le LR d'Angers et surverse, érosion externe et soulèvement hydraulique pour le LR de Blois, a permis de mettre en place une méthodologie qui associe aux phénomènes naturels des probabilités d'apparitions puis de ruptures de digue.

La validité de cette méthodologie doit être confirmée par plusieurs applications sur des sites test. Le Laboratoire de Blois possède de nombreuses données topographiques, le nombre important de profils en travers des levées sur les Val de Tours et d'Orléans leur permet de définir des tronçons relativement homogènes et d'appliquer cette méthodologie.

Le Laboratoire d'Angers possède moins de données sur la géométrie des digues qui est l'élément indispensable à l'analyse quel que soit le mode de rupture envisagé. Je n'ai donc pas pu utiliser cette méthodologie sur un tronçon de plusieurs kilomètres, mais je l'ai appliquée sur un site expérimental, une section de digue du Val d'Authion située à Saint Clément des Levées (*Illustration 19*), dont les conditions géotechniques étaient particulièrement bien connues.



*Illustration 19 : Localisation du site test à Saint Clément des Levées*

Source : Géoportail

Le site choisi a, déjà fait l'objet de nombreuses reconnaissances géotechniques (Annexe 4 et 5) :

- carottages (pour les essais en laboratoire) ;
- sondages à la tarière (reconnaissance de sols et vérification de la teneur en eau) ;
- essais pressiométriques
- essais au perméafor (diagraphie de perméabilité des sols constituant la digue).

Cette section de digue est également un site d'instrumentation du Val d'Authion depuis 2007 :

- 2007 : mise en place par l'entreprise TENCAT d'un géotextile équipé de fibres optiques permettant de localiser les infiltrations d'eau ;
- 2008 : instrumentation par panneaux électriques, mesure de la résistivité apparente du sol, directement liée à sa teneur en eau ;
- 2011 : mise en place de 4 sondes de températures, 4 capteurs de succion et de 2 piézomètres (instrumentation complémentaire aux mesures par panneaux électriques).
- Depuis 2007 : 3 à 4 mesures par an sont systématiquement réalisées : panneau électrique, radar, électromagnétique EM31 et radio magnéto-tellurique RMT.

Les données disponibles, le profil en travers (Annexe 5), les hauteurs de crue centennale (Annexe 6) sur cette portion de digue, sont largement suffisantes pour l'application de la méthodologie sur chaque mécanisme.

### 1.5.a Surverse

L'analyse du phénomène de surverse définie par le Laboratoire de Blois<sup>8</sup>, compare le niveau de crue  $z_L$  au niveau de crête de digue  $z_C$ . D'après le Plan de Prévention du Risque Inondation (PPRI) de la commune de Saint Clément, le niveau des PHEC, (crue centennale de référence) a atteint  $z_L = 29,10$  m IGN69 au droit du site test, pour lequel la crête de digue se situe à  $z_C = 29,20$  m IGN69.

Ainsi, on a :  $0 < z_C - z_L < 0,5$  m

D'après l'analyse de Blois, la probabilité qu'il y ait une surverse pour une crue centennale à cet endroit, est  $P(s_{100}) = 0,2$ . La probabilité qu'une digue rompe à cause d'une surverse est de  $P(r_s) = 0,8$ .

La probabilité de rupture de la digue de Saint Clément par surverse pour une crue centennale est donc :

$$P(r_{s100}) = P(s_{100}) \times P(r_s) \times P(Q_{100}) = 0,2 \times 0,8 \times 0,011 = 1,8 \cdot 10^{-3}$$

### 1.5.b Erosion interne

Le profil en travers de la digue indique que sa largeur en base est d'environ 29 m. Cette distance correspond au cheminement horizontal  $L_h$  pour une éventuelle résurgence en aval du pied de digue.

<sup>8</sup> LABORATOIRE REGIONAL DE BLOIS. *Etudes de dangers des digues de la Loire - Analyses des mécanismes de ruptures.* (rédaction en cours) 2011.

Le PPRI indique que la hauteur d'eau pour une crue centennale est sensiblement au même niveau que la crête de digue, à savoir, 6 m. En appliquant la règle de Bligh, on a :  $\frac{L_n}{H_w} = \frac{29}{6} = 4,8$

D'après le tableau de probabilité défini dans le chapitre 1.4.a.ii, on a  $P(ei_{100}) = 1$  et  $P(r_{ei}) = 0,8$ . Toutefois, lors d'un chantier de renforcement de la digue, un système drainant avec une géomembrane et des granulats a été mis en place, ce qui permet d'abaisser la ligne d'eau dans la digue et donc la charge hydraulique. En conséquence, la probabilité de rupture est minorée de 20 %.

La probabilité de rupture par érosion interne pour une crue centennale pour cette partie de l'ouvrage est :

$$P(r_{ei100}) = P(ei_{100}) \times P(r_{ei}) \times P(Q_{100}) \times 0,8 = 1 \times 0,8 \times 0,011 \times 0,8 = 7,0 \cdot 10^{-3}$$

Cette valeur paraît encore assez élevée au regard du risque réel. L'analyse des résultats de la zone test conduira probablement à reconsidérer certaines des hypothèses de  $P(r_{ei})$ .

### 1.5.c Glissement de talus

La hauteur de digue est de 5 m, la pente de talus côté val est de 1/2,5 et la pente de talus côté Loire de 2/3. Au vu des reconnaissances géotechniques réalisées, l'ouvrage repose directement sur une couche de limon (limon argileux sableux, sol n°2). La valeur du facteur de sécurité déterminée d'après la modélisation est  $F = 1,34$  côté val et  $F = 1,01$  côté Loire.

En comparant  $F$  à  $\gamma_d$ , on obtient les probabilités suivantes :

<b>Côté val</b>	<b>Côté Loire</b>
$P(g_{100}) = 0,88$	$P(g_{100}) = 1$
$P(r_g) = 0,2$	$P(r_g) = 0,3$

Sachant que le talus côté Loire est protégé par un perré maçonné en bon état et qu'il y a la présence d'un enrochement au pied de la digue, on peut appliquer un facteur minorant de 0,3 à la probabilité de rupture. On peut également appliquer une minoration de 70 % à la probabilité de rupture côté val grâce à la présence d'éléments drainants cités ci-dessus.

La probabilité de rupture du remblai par glissement de talus pour une crue centennale est donc :

**Côté val**  $P(r_{g100}) = P(g_{100}) \times P(r_g) \times P(Q_{100}) \times 0,3 = 0,88 \times 0,2 \times 0,011 \times 0,3 = 5,8 \cdot 10^{-4}$

**Côté Loire**  $P(r_{g100}) = P(g_{100}) \times P(r_g) \times P(Q_{100}) \times 0,3 = 1 \times 0,3 \times 0,011 \times 0,3 = 9,9 \cdot 10^{-4}$

### 1.5.d Erosion externe

La distance entre la Loire et le pied de digue est variable selon les saisons mais reste toujours inférieure à 5 m. La protection côté Loire est constituée par un perré maçonné en bon état.

D'après le tableau de probabilité établi par le LR de Blois<sup>9</sup>, la probabilité que le pied de digue soit érodé lors d'une crue centennale est  $P(ee_{100}) = 0,1$  et la probabilité pour qu'un phénomène

<sup>9</sup> LABORATOIRE REGIONAL DE BLOIS. *Etudes de dangers des digues de la Loire - Analyses des mécanismes de ruptures* (rédaction en cours) 2011.

d'érosion externe soit la cause d'une rupture de digue vaut  $P(r_{ee}) = 0,001$ .

La probabilité d'une rupture sur la levée de Saint Clément par érosion externe pour une crue centennale est :

$$P(r_{ee100}) = P(ee_{100}) \times P(r_{ee}) \times P(Q_{100}) = 0,1 \times 0,001 \times 0,011 = 1,1 \cdot 10^{-6}$$

### 1.5.e Soulèvement hydraulique

La quantification du soulèvement hydraulique nécessite la connaissance des paramètres géotechniques<sup>10</sup>. La perméabilité de la couche sous le remblai, ainsi que son épaisseur côté val et côté Loire sont respectivement  $K_b = 1 \cdot 10^{-6}$  m/s,  $z_{bv} = 7$  m,  $z_{bL} = 6$  m. De même, les caractéristiques de l'aquifère sous cette couche de fondation sont :  $K_t = 1 \cdot 10^{-4}$  m/s,  $z_v = 2$  m,  $z_L = 4$  m.

En insérant ces données dans l'analyse du Laboratoire de Blois, on en déduit une valeur de coefficient de sécurité  $F_h = 3,3$ .

D'après leur tableau de probabilités, la probabilité pour qu'un soulèvement hydraulique ait lieu sur la digue de Saint Clément des Levées, pour une crue d'occurrence 100 ans, est  $P(sh_{100}) = 0,01$ . La probabilité que ce phénomène engendre une rupture de digue reste très faible,  $P(r_{sh}) = 0,0001$ .

La probabilité de rupture par soulèvement hydraulique pour une crue centennale sur cet ouvrage est :

$$P(r_{sh100}) = P(sh_{100}) \times P(r_{sh}) \times P(Q_{100}) = 0,01 \times 0,0001 \times 0,011 = 1,1 \cdot 10^{-8}$$

### 1.5.f Synthèse et conclusion

Les probabilités de rupture pour une crue centennale selon chaque mode sont :

$$\text{Surverse : } P(r_{s100}) = 1,8 \cdot 10^{-3}$$

$$\text{Erosion interne : } P(r_{ei100}) = 7,0 \cdot 10^{-3}$$

$$\text{Glissement de talus : } P(r_{g100}) = 5,8 \cdot 10^{-4} \text{ (côté val) et } P(r_{g100}) = 9,9 \cdot 10^{-4} \text{ (côté Loire)}$$

$$\text{Erosion externe : } P(r_{ee100}) = 1,1 \cdot 10^{-6}$$

$$\text{Soulèvement hydraulique : } P(r_{sh100}) = 1,1 \cdot 10^{-8}$$

Ces probabilités permettent de définir un ordre croissant de mode de défaillance : le soulèvement hydraulique, l'érosion externe, les glissements de talus, la surverse puis le plus défavorable, l'érosion interne.

Cette classification met en évidence une incohérence. En effet, le risque de rupture par surverse étant, au dire d'expert et d'après les nombreuses données historiques, prépondérant par rapport aux autres, les probabilités ci-dessus ne reflètent pas ce fait. Il semblerait que l'appréciation du risque associé à l'érosion interne et/ou à la surverse soit à revoir. Ceci conduira dans une deuxième phase de l'étude, après avoir une analyse critique sur chaque site test, à recalculer si besoin, certaines valeurs de probabilité pour intégrer le retour d'expérience et la connaissance réelle issue des données historiques des différents vals.

<sup>10</sup> LABORATOIRE REGIONAL DE BLOIS. *Etudes de dangers des digues de la Loire - Analyses des mécanismes de ruptures*, (rédaction en cours) 2011.



## CONCLUSIONS

Durant ce stage, j'ai été amenée à aborder plusieurs aspects et applications de la géotechnique à travers différentes études.

Les études de dangers des digues de la Loire m'ont permis de mettre à profit les connaissances acquises lors de ma formation de master. En effet, une première phase du travail qui m'a été confié, consistait à compléter une base de données SIG avec les données d'archives géotechniques du Val d'Authion. Ensuite, la démarche probabiliste que j'ai développée fait appel à des notions de probabilité d'occurrence et d'intensité de phénomènes, enseignées dans ma formation. J'ai également pu mettre en application mes connaissances théoriques en mécanique des sols à travers l'utilisation du logiciel de modélisation de stabilité des ouvrages à la rupture rotationnelle.

Actuellement, la méthodologie définie pour les études de dangers est en cours d'application sur les sites test. Cette démarche permettra de mettre en avant d'éventuelles incohérences dans la détermination du niveau de risque par section de digue. Suite aux observations sur les différents vals, les valeurs des probabilités seront sans doute modifiées pour une meilleure représentativité de la réalité. Cette méthodologie doit être fixée et applicable aux autres vals de Loire Moyenne au courant d'octobre 2011.

Grâce à d'autres études plus spécifiques du Laboratoire Régional d'Angers j'ai pu avoir une formation en géotechnique appliquée. Le LRA m'a d'abord associée à une expertise d'ouvrages existants pour laquelle nous devons qualifier l'état général des ouvrages et leurs fondations. Ensuite j'ai été chargée de la justification des fondations d'un boviduc pour un projet de déviation. Dans le même contexte, j'ai aidé au dimensionnement de futurs ouvrages hydrauliques. Enfin l'étude du confortement d'un glissement de talus d'un remblai m'a permis d'appréhender la problématique du comportement de certains sols compressibles. Chaque étude a fait l'objet d'un rapport que j'ai rédigé avec le chargé d'étude.

J'ai ainsi pu assister à plusieurs reconnaissances in situ que j'ai, par la suite, été amenée à traiter :

- pénétrromètre dynamique, avec une mise en forme des résultats sous Géo-Log 3.2 ;
- forages à la tarière, avec le prélèvement de matériaux (détermination de la teneur en eau au laboratoire) et la réalisation d'une coupe de sol assez précise sur le terrain puis la mise en forme de la lithologie et des teneurs en eau sous le même logiciel ;
- sondages pressiométriques avec le dépouillement, l'interprétation et la mise en forme des essais notamment pour le calcul des contraintes admissibles des sols et des tassements ;
- sondage carotté au piston stationnaire avec le prélèvement intact de carottes dans des tubes en plastique rigide ainsi que la détermination des limites d'Atterberg et essais œdométriques en laboratoire qui permettent de définir les valeurs précises de  $\gamma$ ,  $\varphi$  et  $c$  utilisés pour caractériser les sols compressibles ;
- sondage carotté, notamment dans les maçonneries des ouvrages anciens dont l'analyse (mesure RQD) est nécessaire pour la qualification de l'état de celles-ci ;
- sondage au scissomètre avec la mise en forme des données de cohésion utilisées dans le calage des modèles à la rupture rotationnelle.

A travers les différentes thématiques abordées, j'ai pu acquérir de nombreuses compétences professionnelles et participer à une expérience humaine enrichissante en parfait adéquation avec mon projet d'avenir.

## BIBLIOGRAPHIE

COMITE FRANCAIS DES BARRAGES ET RESERVOIRS. *Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai*. Juin 2010, 114 p.

EUROPEAN COMMUNITY SIXTH FRAMEWORK PROGRAMME FOR EUROPEAN RESEARCH AND TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT. *FLOOD site Project Report - Failure mechanisms for flood defence structures*. Février 2007, 211 p.

GEORGE FILLIAT. *La pratique des sols et fondations*. Edition du Moniteur. Paris, 1981, 1392 p. ISBN 2862821624.

ISL. *Renforcement de la levée de protection du val de l'Authion contre les crues de la Loire – Avant projet*. Février 2005, 94 p.

LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSEES. *Règles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages de génie civil*. Fascicule 62, Titre V du CCTG. Septembre 1992, 171 p.

LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSEES. *Guide technique – Stabilisation des glissements de terrain*. Février 1998, 97 p.

LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSEES. *Hydraulique des sols*. Novembre 1968, 245 p.

LABORATOIRE REGIONAL DE BLOIS. *Etudes de dangers des digues de la Loire - Analyses des mécanismes de ruptures*. (rédaction en cours) 2011.

LABORATOIRE REGIONAL DES PONTS ET CHAUSSEES D'ANGERS. *Mise en charge hydraulique de remblais d'infrastructures de transports. Digue de protection du Val d'Authion : Synthèses des études et travaux*. Réf. 42.08.99.102-2895. Décembre 2008, 39 p.

MINISTERE DE L'AGRICULTURE - DIRECTION DE L'AMENAGEMENT. *Technique des barrages en aménagement rural*. Septembre 1977, 325 p.

MINISTERE DE L'ECOLOGIE, DU DEVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'AMENAGEMENT DURABLES. *Décret n°2007-1735 du 11 décembre 2007 relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques et au comité technique permanent des barrages et des ouvrages hydrauliques et modifiant le code de l'environnement*. Journal officiel, n°289 du 13 décembre 2007, p. 20113-20128. NOR DEVO0751165D.

TERRASOL. *Guide d'utilisation TALREN 97 : Logiciel pour l'analyse de la stabilité des structures géotechniques*. 1997, 222 p.