



**HAL**  
open science

## Études de dangers des digues de classe A de la Loire et de ses affluents - modèle d'aléas de rupture

J. Maurin, A. Boulay, E. Durand, S. Piney, B. Bridoux, R. Tourment

► **To cite this version:**

J. Maurin, A. Boulay, E. Durand, S. Piney, B. Bridoux, et al.. Études de dangers des digues de classe A de la Loire et de ses affluents - modèle d'aléas de rupture. Dignes maritimes et fluviales de protection contre les submersions - 2ème colloque national - Dignes2013, Jun 2013, Aix-en-Provence, France. pp.209-216. hal-01122579

**HAL Id: hal-01122579**

**<https://hal.science/hal-01122579v1>**

Submitted on 4 Mar 2015

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Études de dangers des digues de classe A de la Loire et de ses affluents - modèle d'aléas de rupture

*Loire river levees hazard studies - Failure modes model*

Jean Maurin<sup>1</sup>, Arnaud Boulay<sup>1</sup>, Edouard Durand<sup>2</sup>, Stéphane Piney<sup>2</sup>,  
Bastien Bridoux<sup>2</sup> et Rémy Tourment<sup>3</sup>

<sup>1</sup>DREAL Centre, 5 avenue Buffon, BP 6407 45064 Orléans cedex 2, France  
e-mail: [prenom.nom@developpement-durable.gouv.fr](mailto:prenom.nom@developpement-durable.gouv.fr),

<sup>2</sup>CETE Normandie-Centre, LRPC Blois, PCI « Connaissance des ouvrages hydrauliques et de la morphodynamique fluviale »,  
11 rue Laplace, CS 2912, 41029 Blois Cedex, France,  
e-mail: [prenom.nom@developpement-durable.gouv.fr](mailto:prenom.nom@developpement-durable.gouv.fr),

<sup>3</sup>Irstea, Centre d'Aix en Provence, 3275 route Cézanne, CS 40061,  
13182 AIX EN PROVENCE Cedex 5, France,  
e-mail: [prenom.nom@irstea.fr](mailto:prenom.nom@irstea.fr)

## Résumé

Les études de dangers des digues de classe A de la Loire et de ses affluents ont été remises pour la fin de l'année 2012 aux services de contrôle. Elles sont au nombre de trois : la levée du val d'Orléans, les levées du val de Tours et la grande levée du val d'Authion. A elles trois, elles représentent près de 185 km de levées de terre et protègent quelques 240.000 habitants.

La réalisation de ces études a nécessité la construction d'un modèle pour approcher la probabilité de rupture sur chaque tronçon de la levée. Ce modèle de calcul d'aléa de rupture de digue en probabilités subjectives a été mis au point par les partenaires associés dans la réalisation de ces études : la DREAL Centre, Irstea (Unité de recherche Ouvrage Hydrauliques à Aix) et le LRPC de Blois, ce dernier ayant de plus développé l'outil.

Ce modèle, appelé CARDigues (Calculs d'Aléas de Rupture pour les Digues), a permis de croiser différentes informations indispensables à l'évaluation du risque.

Ainsi, la topographie, les sollicitations hydrauliques, les caractéristiques géotechniques et les observations des visites techniques approfondies (comme la présence de canalisations, de maisons encastrées, de végétation...) sont des éléments d'entrée du modèle. Les sorties sont des probabilités de rupture par tronçon de 50 m de long par classe de crue (8 classes peuvent être utilisées dans l'outil, sans limite dans le modèle) et par mode de rupture considéré.

Les 5 modes de ruptures retenus sont :

- la surverse
- l'érosion interne

- le glissement des talus
- l'érosion externe en pied de digue côté fleuve
- le soulèvement hydraulique en pied de digue côté val

Pour chaque mode de rupture et chaque classe de crue, le modèle est bâti sur la distinction entre la probabilité d'apparition du phénomène et la probabilité de rupture, une fois le phénomène considéré apparu. L'aléa de rupture étant la multiplication de ces deux probabilités.

Le modèle fait appel dans sa conception à des calculs et des méthodes déjà connues mais aussi à des méthodes en cours de développement et repose donc en partie sur des dires d'expert. Loin d'être figé ce modèle sera utilisé dans une partie des études de dangers de la Loire et de ses affluents pour les levées de classe B et C lancées en 2011. Ces 45 études seront réalisées par plusieurs bureaux d'études et seront autant d'occasion de faire évoluer ces méthodes pour améliorer les résultats de calcul.

## Abstract

The hazard studies on the Loire's class A levees will be submitted back the 2012 December the 31<sup>st</sup> to the control's offices. They are three: the Orleans levee, the levees of Tours and the big levee of Authion. To them three, these systems of embankments represent more than 185 kilometers of levee and protect some 240 000 inhabitants.

The realization of these studies has required the construction of a model to approach the probability of failure on every section of the levee. This model has been finalized by the partners associated in the realization of these studies: the DREAL Centre, the Irstea and the LRPC of Blois, this last one having developed it.

These models, named CARDigues, (the calculations of rupture risks for the levee) enable to cross different indispensable information to the risk assessment.

Thus, topography, hydraulic solicitations, characteristic geotechnical and the deepened observations of the technical inspections (such as the presence of seepage, of recessed houses, of vegetation.) are entrance data parameters of the model. The exits are probabilities of rupture by section of 50 meters long by class of rise in the water level (8 classes can be used) and for each failure made take in account.

The 5 retained failure modes are:

- overtopping
- internal erosion
- sliding slopes
- external erosion
- uplift

For every failure mode, the model makes the distinction between the probability of apparition of the phenomenon and the probability of breach of the levee, once the considered phenomenon appeared. The risk of rupture being the multiplication of these two probabilities.

The model takes in account in its conception calculations and well know methods but also for techniques in progress development and lays therefore in part on expert jugements. Far from being achieved this model will be used in a part of the hazard studies of the Loire and its tributaries for the levees class B and C launches in 2014. This experience will be the referee gathered to evolve methods and refine the calculation results.

## **Introduction**

Les études de dangers de digue de protection contre les inondations doivent mettre en évidence les tronçons de chaque digue qui sont les plus fragiles et permettre d'estimer leur probabilité de rupture.

Pour réaliser les études de dangers de digues de classe A de la Loire, un modèle de calcul des aléas de rupture a été mis au point.[5]

Créé par le comité technique des études de dangers des levées de la Loire (Classe A) puis construit par le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Blois, le modèle CARDigues est une feuille de calcul « excel ». Il permet de prendre en compte simultanément sur chaque tronçon de digue et pour différentes crues considérées des paramètres facilement disponibles comme : la topographie de l'ouvrage, le contexte géotechnique de la digue et de sa fondation, les constatations des visites techniques approfondies (ou d'autres éléments résultant d'examen visuels) et du diagnostic initial (informations extraites de la base SIRS Digues) ainsi que les confortements qu'a connus l'ouvrage et enfin certaines barrières de sécurité résultant de la gestion de l'ouvrage.

## **Concept général**

Dans la méthodologie semi-probabiliste mise au point pour les études de dangers des digues de classe A de la Loire, les levées sont divisées en tronçons de longueurs égales à 50 mètres.

Chaque tronçon de 50 mètres est caractérisé par un profil en travers représentatif de la situation la plus défavorable le long du tronçon. Ce profil a été établi grâce à un levé topographique Lidar.

Sur chacun de ces tronçons l'aléa de rupture est calculé pour les 5 principaux modes de rupture retenus (surverse ; érosion interne ; glissement des talus ; érosion externe en pied de digue côté fleuve ; soulèvement hydraulique en pied de digue côté val). Ces modes de rupture peuvent se décrire en termes de scénarios de rupture de digues. Ainsi 5 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.

Les calculs de probabilité de rupture sont, pour chaque crue considérée, décomposés en deux : d'une part la probabilité d'apparition du phénomène initiateur et une fois celui-ci apparu la probabilité que la levée rompe et crée une brèche. L'aléa de rupture étant la multiplication de ces deux probabilités.

Pour chaque profil ces deux probabilités sont donc calculées pour chaque crue de référence, pour chaque mode de rupture et pour tous les modes.

La levée d'Orléans a été divisée en 877 tronçons, celles de Tours en 1166 tronçons (levée de Loire : 577, levée du Cher : 526 et levée du canal : 63) et celle de l'Authion en 1593 tronçons.

## **Données d'entrée du modèle**

### **Données générales**

Chaque tronçon est repéré par son N° et le point kilométrique en son axe (Pk) depuis l'origine de la levée.

Les noms de la commune, du lieu-dit où il se situe, du propriétaire et du gestionnaire de chaque tronçon sont entrés ainsi que le numéro du tronçon de SIRS Digues la base de données de gestion des ouvrages.

Ces données d'information permettent de repérer le tronçon et de connaître sa situation administrative et de faire des liaisons directes avec les données de SIRS Digues.

### **Données topographiques**

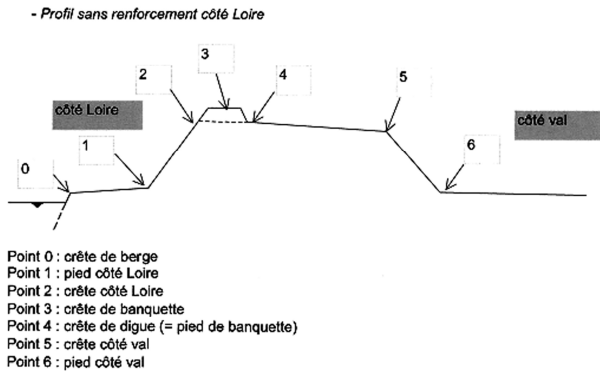
Chaque tronçon est décrit par les coordonnées en X, Y et Z de chaque point caractéristiques de la levée.

Le profil de la levée est représenté par une figure géométrique simplifiée.

Les points caractéristiques sont au nombre de 7 :

- Point 0 : crête de la berge du fleuve ou de la rivière
- Point 1 : pied de levée côté Loire ou rivière
- Point 2 : crête de digue côté Loire ou rivière
- Point 3 : crête de la banquette

- Point 4 : crête de la digue en pied de banquette (c'est ce point qui est considéré comme le sommet de la levée. Il est pris comme position de l'axe de la polygone représentant la levée)
- Point 5 : crête de la digue côté val
- Point 6 : pied de levée côté val



**FIGURE 1 : - POINTS CARACTERISTIQUES D'UN PROFIL DE LEVEE DANS CARDIGUES**

Les coordonnées des points renseignés sont en Lambert 93 pour la planimétrie et en NGF (IGN69) pour l'altimétrie. Pour les études de dangers des levées de classe A de la Loire les coordonnées ont été obtenues à l'aide des MNT Lidar de 2002 pour Tours et l'Authion et de MNT Lidar Flimap haute résolution (2010) pour la levée d'Orléans. Ces données brutes permettent le calcul des différentes valeurs géométriques caractérisant le tronçon. Le modèle calcule donc :

- la largeur de la levée en pied
- la hauteur de la digue
- la pente du talus côté rivière
- la pente du talus côté val
- la largeur de la levée en tête
- la largeur du franc-bord entre le fleuve et le pied de levée

**Données hydrauliques**

L'outil développé permet de prendre en compte 8 lignes d'eau différentes, correspondant aux 8 crues pouvant être testées. Les hauteurs d'eau au niveau de chaque profil sont donnée en cote NGF. Il est également possible de prendre en compte la présence d'eau à l'intérieur du val par une cote altimétrique (par exemple à l'aval d'un endiguement pour tenir compte d'une inondation par remous).

**Données géotechniques**

Le contexte géotechnique de la digue a été établi comme constante. Le corps de digue est assimilé à des limons-sableux. La fondation est représentée par trois couches géologiques considérées homogènes.

- un niveau d'assise de sols fins (limon ou argile) peu perméables représenté par sa densité, son épaisseur et sa perméabilité, côté fleuve et côté val.
- un niveau d'alluvions plus grossières (sables/sables et graviers) perméables représentées par sa densité, son épaisseur côté fleuve et côté val et sa perméabilité.
- le substratum imperméable.

**Données de structure et d'anomalies**

Ces informations, propres à chaque tronçon, sont susceptibles d'influencer les calculs probabilistes. Elles sont liées à l'utilisation de la digue et des dégradations qu'elle peut présenter:

- présence d'une banquette en crête côté fleuve
- présence d'une banquette en crête côté val
- présence de bâtiment encastré.
- présence de mur de soutènement ou mur de quai
- présence de point bas sur la banquette (coté fleuve ou en crête côté val)
- présence de végétation ligneuse (arbres) sur la levée ou à proximité. Trois types de colonisation sont prises en compte (isolée, clairsemée ou généralisée)
- présence et position d'une canalisation. Deux types de position sont possibles soit qualitative (haute, moyenne ou basse) soit par sa cote en NGF.
- présence de terriers d'animaux fouisseurs la position est qualitative (haute, moyenne ou basse) la notion de traversant est indispensable.
- Présence de désordres affectant le talus côté Val (obstacle ou décapage de la couche de terre végétale herbacée ou les deux simultanés).
- facteurs aggravants l'affouillement de pied côté fleuve (érosions diverses, obstacle)
- facteurs particuliers aggravants le risque d'érosion interne.

**Données des renforcements, protections ou améliorations**

Les facteurs favorables à la stabilité et à la sécurité de la levée sont aussi utilisés dans le modèle. Les calculs prennent donc en compte les dispositifs de protection dont bénéficie chaque tronçon :

- déversoir, levée est résistante à la surverse
- renforcement de talus côté val
- renforcement du corps de la levée par écran étanche
- renforcement de pied côté fleuve
- facteur améliorant pour l'érosion interne

**Barrières de sécurité de la gestion**

La capacité du gestionnaire à anticiper ou à réparer une défaillance du système est prise en compte crue par crue. On distingue les cas :

- où le gestionnaire a les moyens de surveiller la levée et de prévenir les éventuelles défaillances avant la

crue.

- où le gestionnaire a les moyens de surveiller la levée et d'intervenir en cas de défaillance pendant la crue.
- où le gestionnaire a les moyens de surveiller la levée mais n'a pas les moyens d'intervenir en cas de défaillance
- où le gestionnaire n'a pas les moyens de surveiller la levée et donc n'a pas les moyens adéquats pour intervenir en cas de défaillance (c'est le cas lorsque la sécurité des agents n'est plus assurée et que l'évacuation des surveillants est nécessaire)

## **Modes et mécanismes de rupture**

Le modèle prend en compte les principaux modes de rupture [2] rencontrés, sur la base des retours d'expérience de systèmes d'endiguement semblables à ceux de la Loire.

Ces modes de rupture font appel à des mécanismes de défaillance qui, combinés, peuvent entraîner une brèche. Les mécanismes sont :

### **La surverse**

La surverse intervient lorsque le niveau des eaux dépasse le niveau du sommet de la digue. L'eau qui passe alors par-dessus la levée, en se déversant, érode le talus en entraînant les matériaux constitutifs de la digue. L'érosion s'accélère rapidement avec l'augmentation de la pente du talus érodé et/ou la concentration (ou perturbation) des écoulements sur le talus qui crée une ravine jusqu'à aboutir à une rupture totale de la digue. Ce phénomène est freiné par la qualité de l'enherbement du talus, de son revêtement ou par la faiblesse de sa pente.

### **L'érosion interne**

L'érosion interne est un ensemble de phénomènes lié à la qualité des matériaux constitutifs de la digue et de sa fondation. Elle se produit lorsque deux conditions sont réunies :

- quand l'eau est capable de traverser la digue ou sa fondation lorsque celle-ci est en eau ;
- quand les matériaux constitutifs de l'ouvrage sont entraînés par l'eau circulant dans la digue vers l'extérieur. Le phénomène s'accélère avec la perméabilité du matériau qui augmente avec le départ des éléments les plus fins, pouvant ainsi engendrer une brèche.

L'érosion interne peut prendre plusieurs formes, de l'érosion généralisée, ou suffusion, à l'érosion localisée (de contact, de conduit ou régressive). L'érosion généralisée se produit lorsque la digue est saturée d'eau et lorsque les particules les plus fines sont capables de traverser le squelette constitué par les éléments les plus gros, alors les éléments de plus en plus gros sont mobilisés et entraînés à l'extérieur de la digue. L'érosion localisée se produit à partir d'une irrégularité dans la perméabilité du corps de la digue. L'érosion de conduit est

généralement appelée renard hydraulique. Il est souvent lié à des facteurs extérieurs tels que :

- les terriers d'animaux fouisseurs ;
- les racines d'arbres ;
- les ouvrages traversant ou inclus tels que les canalisations ;
- la conjugaison de plusieurs de ces phénomènes et des autres formes d'érosion interne.

L'érosion interne est un phénomène capable de provoquer, à lui seul, la rupture d'une digue. Il peut être néanmoins associé à d'autres modes de rupture, l'érosion interne restant souvent le mode final de la rupture.

### **Le glissement de talus**

La déstabilisation de talus par glissement, qui est favorisée par la saturation des matériaux de la digue peut se produire côté val quand le corps de digue est saturé ou côté fleuve à la décrue ;

Les glissements ne sont généralement pas capables d'entraîner une rupture directe de la levée. Celle-ci peut être initiée par ce type de défaillance et se poursuivre par d'autres phénomènes, le plus souvent par érosion interne. La digue, une fois affectée par un glissement, voit sa géométrie amputée et donc sa résistance à l'érosion interne diminuée au point d'en occasionner potentiellement la rupture.

### **L'érosion externe**

L'érosion externe est un phénomène qui se produit quand un courant d'eau à l'extérieur de la digue est capable d'entraîner ses matériaux constitutifs ou ceux de sa fondation.

On rencontre 3 types principaux d'érosion externe :

- en contact avec le fleuve, la fondation peut être affouillée en pied de digue ;
- en crue, le talus côté cours d'eau peut être érodé par le courant ;
- en cas de surverse, le talus côté val peut être érodé par les écoulements.

À l'exception du cas des surverses où l'érosion externe est la cause directe de la rupture, l'érosion externe du pied de digue ou du talus côté fleuve est rarement capable d'en produire une. Elle est, en revanche, initiatrice d'un glissement qui, associé à une érosion interne, provoque la rupture de la digue. Le modèle se limite à l'étude du cas d'attaque du pied de digue côté fleuve par le courant et prend en compte des éléments favorables (protection en enrochement) et défavorables (obstacles perturbant l'écoulement érosion préexistante)

### **Le soulèvement hydraulique de la fondation côté val**

Ce phénomène correspond à la déstabilisation de la fondation de la digue qui peut se produire dans un cas de figure souvent rencontré au niveau des levées de Loire. Une couche géologique très perméable (alluvions sablo-graveleuses) est surmontée d'une couche imperméable (limon). Si la pression hydrostatique de l'eau dans la couche d'alluvions perméables

est susceptible de déstabiliser la couche limoneuse imperméable, il peut y avoir « claquage » c'est à dire une perte de la continuité de l'imperméabilité de cette dernière couche. Ce phénomène est appelé « soulèvement hydraulique côté val ».

Ce mécanisme seul n'est pas susceptible d'entraîner de rupture de la levée mais il supprime une barrière importante à l'érosion interne régressive de la couche de matériaux fins peu perméables. Ce mode de rupture est donc associé à une rupture par érosion interne en considérant cette couche côté val inexistante.

### **Modes de défaillance non pris en compte**

La déstabilisation d'ensemble n'a pas été prise en compte dans le modèle CARDigue ; ce n'est pas un mode de rupture retenu pour les levées de la Loire compte tenu de la géologie tabulaire des couches.

Les seuls cas sur la Loire où ce type de phénomène est possible sont les passages sous les ponts, ferrés ou autoroutiers. Dans ce cas la levée a été abaissée pour permettre la circulation sommitale (création d'un point bas). La continuité de la protection est assurée par un mur en maçonnerie ou en béton qui peut lui subir une déstabilisation d'ensemble. Ces cas sont étudiés à part mais sont néanmoins décelés par le modèle qui signale localement un point bas.

Un autre mode non pris en compte est la rupture par effondrement karstique ou par déstabilisation de la levée suite à la présence de fontis d'origine karstique.

Ces cas de figure ont bien été mis en évidence notamment sous la levée d'Orléans mais aujourd'hui nous ne disposons pas des conclusions de recherches en cours qui pourraient nous éclairer dans la méthodologie et le calcul des aléas de rupture associés.

## **Calcul de probabilité**

Les calculs probabilistes nécessitent que les événements que l'on combine entre eux soient indépendants. Le modèle repose sur cette hypothèse mais il est évident que les probabilités de rupture des tronçons restent dépendantes les unes des autres. En effet dès lors qu'un tronçon est affecté par une rupture les tronçons voisins sont entraînés dans la brèche, les tronçons loin à l'aval verront en revanche leur probabilité diminuée du fait de l'écrêtement de la ligne d'eau due à la brèche.

Néanmoins l'objectif des études de dangers est l'estimation de la probabilité de la première brèche. C'est pourquoi nous considérerons que les probabilités sont indépendantes tant qu'aucune brèche ne s'est déjà produite.

Le modèle ne pourra donc être utilisé que pour identifier, par probabilités relatives, le tronçon où la première brèche a le plus de chance de survenir.

Pour chaque mode de rupture le modèle calcule la probabilité que le phénomène en cause apparaisse (glissement de talus, surverse...) puis la probabilité qu'une fois apparu, il engendre

une rupture de la digue par brèche.

Ces calculs sont faits pour chaque situation hydraulique (niveau d'eau), pour chaque mode de rupture et pour chaque tronçon de digue.

Ainsi pour chaque mode de rupture, ces probabilités sont calculées suivant une méthodologie complexe qui fait appel à un logigramme pour tenir compte des scénarios les plus réalistes.

Nous décrivons ci-dessous les grandes lignes de cette méthodologie, suivant les différents modes de rupture

### **La surverse**

La probabilité d'apparition de la surverse est fonction de la différence entre le sommet de la levée (point 4 de la figure n°1) et la ligne d'eau en crue issue du modèle 1D Loire Moyenne.

A noter que les banquettes (rehausses) souvent présentes en crête des digues ne sont pas prises en compte à ce stade.

La probabilité de rupture une fois la surverse établie est fonction de la hauteur d'eau qui passe au-dessus de la digue, au-delà d'une lame d'eau de 20 centimètres, la probabilité de rupture est prise égal à un compte tenu des observations faites lors des crues historiques [3].

Des cas spécifiques de calculs prennent en compte des éléments particuliers du tronçon comme :

- la présence structurelle ou fonctionnelle d'un déversoir la probabilité associée est prise égal à  $10^{-3}$
- la présence d'une banquette en crête côté val pour laquelle la rupture est considérée comme certaine en raison de la concentration des écoulements induite sur le talus côté val.

Des coefficients secondaires pondèrent la probabilité de rupture pour tenir compte de la pente du talus côté val, de la largeur en crête de la digue, de la présence d'un obstacle dans le talus côté val.

### **L'érosion interne**

La probabilité d'apparition d'infiltrations au travers et sous la levée susceptible, de provoquer la rupture par érosion interne est calculée à l'aide de la formule de Bligh basée sur le ratio  $L/H$ ,  $L$  étant la largeur de base de la digue et  $H$  la charge hydraulique (différence entre le niveau d'eau côté rivière et côté val)

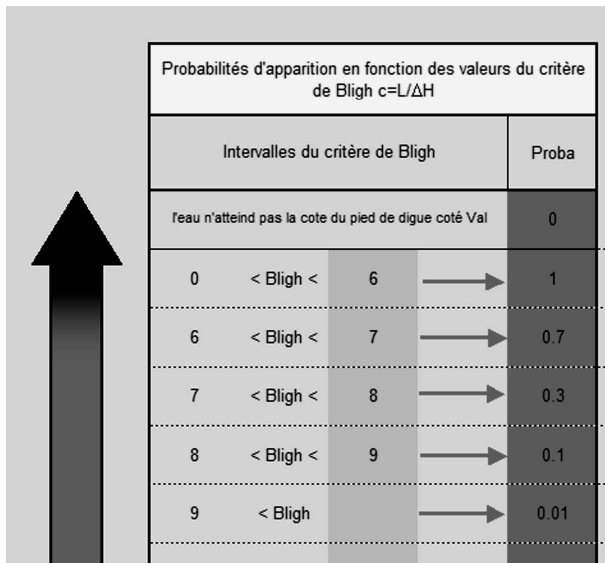


FIGURE 4 : - LOGIGRAMME DE LA PROBABILITE D' APPARITION DE L'EROSION INTERNE

A ce ratio brut de Bligh est associée une probabilité à chaque classe présentée à la figure n°4, considérant pour un profil type de base, une levée et une fondation en limon reposant sur des alluvions sablo-graveleuses de Loire.

Pour tenir compte du limnigramme de crue type, des particularités liées aux désordres, anomalies ou aux aménagements modifiant la résistance à l'érosion interne, des coefficients (voir figure n°5) sont appliqués à la largeur de la digue.

Ces coefficients ont été calculés en comparant le profil type avec les profils contenant les anomalies ou améliorations. Cette comparaison s'est faite, en appliquant la loi de Darcy, sur la somme des produits de la distance par la perméabilité du chemin de l'eau le plus critique au travers de la digue ou de sa fondation. [4]

La probabilité de rupture une fois l'écoulement d'eau établi, est fonction de la présence d'un filtre drainant côté val et de la nature de la surveillance et de l'organisation du gestionnaire en crue.

### Le glissement de talus

La probabilité d'apparition de glissement, est apprécié pour chaque profil au facteur de sécurité F obtenu par un calcul paramétrique aux états limites ultimes ELU basé sur la méthode de Bishop, selon la géométrie de la digue, la nature du support et la charge hydraulique. Ils tiennent compte de facteurs partiels. Les probabilités d'apparition sont ensuite définies en fonction d'intervalles de F (plus F est grand plus la probabilité est faible).

Coefficients (multiplication) de Bligh dus au type de profil					
Facteurs modifiant le critère de Bligh	Code	Digue non renforcée	Digue renforcée coté Loire	Digue renforcée coté Val	Famille 4
		Famille 1	Famille 2	Famille 3	
Profil de base	F	1	1	1	Coef à définir
Présence de Maison encastrée Cote Val	BatV	0.8	1	1	Coef à définir
Présence de Maison encastrée Coté Loire	BatL	0.8	1	1	Coef à définir
Présence de Maison encastrée des deux cotés	Bat2	0.8	1	1	Coef à définir
Présence de canalisation en position haute	CanH	0.08	0.09	0.15	Coef à définir
Présence de canalisation en position moyenne	CanM	0.07	0.09	0.1	Coef à définir
Présence de canalisation en position basse	CanB	0.06	0.08	0.09	Coef à définir
Présence de terriers non traversants en position haute	TerH	0.7	0.9	0.9	Coef à définir
Présence de terriers non traversants en position moyenne	TerM	0.7	0.9	0.9	Coef à définir
Présence de terriers non traversants en position basse	TerB	0.7	0.9	0.9	Coef à définir
Présence de terriers traversants	TT	0	0	0	0
Végétation ligneuse isolée	VLI	0.6	0.8	0.8	Coef à définir
Végétation ligneuse clairsemée	VLC	0.4	0.6	0.85	Coef à définir
Végétation ligneuse généralisée	VLG	0.1	0.2	0.2	Coef à définir
Présence d'horizon argilo-limoneux en couche d'assise de la digue	AbsLimoc	0.78	0.78	0.78	Coef à définir
Paroi étanche	PET	10000	10000	10000	Coef à définir

Les canalisations seront prises en compte dès lors qu'elles sont submergées de : 0.50 m

FIGURE 5 : - TABLEAU DES COEFFICIENTS PAR SITUATION

La probabilité d'apparition est définie comme suit :

- F entre 0 et 1 : 1
- F entre 1 et 1,1 : 0,7
- F entre 1,1 et 1,3 : 0,3
- F entre 1,3 et 1,5 : 0,1
- F supérieur à 1,5 : 0,01

La présence de certains types de renforcements en pied côté Loire améliore le facteur F. Par exemple, si le profil dispose de renforcement par enrochement du pied, le facteur F calculé sera majoré de 20%.

Pour un certain nombre de profils, la probabilité d'apparition n'est pas définie via le facteur de sécurité F mais directement par l'opérateur. Ces profils dont le risque d'apparition est très faible, rassemblent les cas suivants:

- présence d'un bâtiment encastré
- présence murs (mur de soutènement ou mur de quai)
- pente du talus inférieure à 10°
- hauteur du talus inférieure à 1m

L'utilisateur définit les limites des intervalles de F et les probabilités correspondantes, ainsi que la probabilité d'apparition de glissement pour les cas particuliers ci-dessus.

Le glissement correspond à une déstabilisation du talus qui aggrave le risque vis à vis de l'érosion interne qui constitue le

mécanisme provoquant la rupture, *in fine*.

La probabilité de rupture par glissement est donc établie dans ce modèle à partir de l'aléa d'érosion interne, que l'on majore pour tenir compte du glissement.

Le modèle permet de choisir le mode de majoration des probabilités de l'aléa d'érosion interne, parmi les deux suivants:

- sur classement d'une classe d'aléa de l'apparition de l'érosion interne
- multiplication de la probabilité de l'aléa d'érosion interne par un facteur fixe de 1,10 (choix fait pour les levées de classe A de la Loire)

### **L'érosion externe (affouillement)**

Le modèle ne traite l'érosion externe qu'au niveau des pieds de levée en contact avec le lit vif du fleuve ou de ses affluents. L'érosion du talus côté fleuve n'est pas traitée car elle n'a jamais été mise en évidence sur les levées de la Loire. L'érosion externe du talus côté val est traitée dans le cadre des surverses.

Le phénomène d'érosion externe (affouillement) des pieds de levées côté Loire n'est pas capable seul d'entraîner une rupture.

L'apparition de ce phénomène se traduit par un affouillement de la fondation, déstabilisant le pied de digue. Cette déstabilisation provoque un glissement de talus qui réduit la largeur de l'ouvrage, suivi d'un phénomène d'érosion interne qui peut provoquer la rupture.

La probabilité d'apparition du phénomène d'érosion des pieds de levée a été définie en fonction de la largeur du franc-bord :

- franc-bord entre 0 et 5 mètres : 0,01
- franc-bord entre 5 et 10 mètres : 0,001
- franc-bord supérieur à 10 mètres : 0

Les facteurs améliorants la probabilité sont affectés d'un coefficient minorant en cas de présence de :

- palplanches en protection de pied : 0,0001
- enrochements en protection de pied : 0,001
- fascines en protection de pied : 0,1
- parafouille en protection de pied : 0,001

Les facteurs aggravants la probabilité sont affectés d'un coefficient majorant en cas de présence de :

- fosse d'érosion en rivière : 50
- érosion en pied déjà active : 20
- obstacle ou point dur en pied de digue : 50
- érosion et obstacle en pied de digue : 60

La probabilité de rupture une fois l'apparition du phénomène d'érosion des pieds de levée est fonction de la probabilité de rupture par glissement avec un surclassement d'une classe d'aléa ou une multiplication de l'aléa glissement par un facteur pris égal à 4.

### **Soulèvement hydraulique de la fondation côté val**

Le risque d'apparition d'un soulèvement hydraulique, est apprécié par le calcul d'un Facteur de sécurité Fh basé sur la méthode de l'USACE [1]. Ce facteur est fonction de nombreuses variables (épaisseurs et perméabilité des alluvions, du niveau d'assise, et des données géométriques de la digue.

Les probabilités d'apparition sont ensuite définies en fonction d'intervalles de Fh. (Plus Fh est grand, plus le risque est faible.)

La probabilité d'apparition est définie comme suit :

- Fh inférieur à 1,1 : 0,8
- Fh entre 1,1 et 1,3 : 0,3
- Fh entre 1,3 et 1,5 : 0,1
- Fh entre 1,5 et 2 : 0,01
- Fh supérieur à 2 : 0,001

En cas d'absence de la couche de sols fins sous la digue imperméable la probabilité est nulle.

Le soulèvement hydraulique n'entraîne pas, à lui seul, la rupture d'une digue. Une fois un soulèvement hydraulique établi, la dégradation de la digue se ramène au phénomène d'érosion interne de la fondation perméable. La probabilité de rupture due à un soulèvement hydraulique est donc ramenée à un calcul de l'aléa de rupture par érosion interne. Pour ce calcul, on applique une modification sur le critère de Bligh (brut, c'est à dire sans les modificateurs utilisés pour le mode Erosion Interne) pour tenir compte du soulèvement hydraulique. Les classes de probabilité en fonction de la valeur de Bligh restent les mêmes que pour l'érosion interne. La probabilité de rupture par érosion interne reste inchangée.

### **Combinaison des probabilités**

Les probabilités d'apparition et de rupture pour chaque mode sont multipliées pour obtenir la probabilité de création de brèche pour le mode considéré = aléa de rupture.

La probabilité pour tous les modes pour une crue est calculée par la formule suivante :

$$P = 1 - \prod_i (1 - P_i)$$

La probabilité pour toutes les crues traduisant le risque existant chaque année est calculée (pour un mode ou pour tous) par une moyenne pondérée des aléas de chaque crue (les pondérations étant les intervalles autour des crues)

### **Fonctionnalités**

Le modèle a été construit de manière à ce que les mécanismes de calculs soient figés mais que les limites de classes, les grandeurs seuils et les coefficients soient modifiables, permettant un affinage des calculs au fur et à mesure des retours d'expérience des utilisateurs.

### **Feuille PV par profil**

L'outil de calcul d'aléas de rupture dispose d'une fonctionnalité de visualisation schématique de chaque profil.



Il donne un tableau de toutes les probabilités attachées au profil sélectionné (probabilité d'apparition, de rupture et d'aléa pour chaque mode de rupture et pour chaque crue) et donne la valeur de la probabilité globale de l'aléa et des aléas annuels par mode et global.

		<i>Etude de Dangers des digues de la Loire et de ses affluents</i> <b>Calcul de l'Aléa Rupture de Digue</b> <small>(Modèle de Calcul V22 - Juin 2012)</small>							
N° du Profil	<b>15</b>	PK Digue (km/OrigineVal)	<b>0.7</b>	Val	<b>Orléans</b>				
Tronçon SIRS Digue	206	Commune	GULLY	Opérateur	LR BLOIS				
Gestionnaire / Propriétaire	DDT 45 / Etat	Localisation	Méandre de Bouteille - "Courmain"	Date d'édition	7 décembre 2012				
	Q50	Q70	Q100	Q170	Q200	Q500	Q1000	--	Aléa annuel
Occurrence annuelle de crue	1.7E-02	5.6E-03	3.7E-03	2.1E-03	2.1E-03	1.9E-03	1.3E-03	--	0.0333
Cote de crue (NGF)	112.78	113.28	113.93	114.21	114.35	114.47	114.77	--	
Surverse	Apparition	0	0	0	0.1	0.1	1	--	
	Rupture	0	0	0	0	0	0.8	--	
	Aléa	0	0	0	0	0	0.8	--	1.00E-03
Erosion Interne	Apparition	0.7	1	1	1	1	1	--	
	Rupture	0.1	0.1	0.5	1	1	1	--	
	Aléa	0.07	0.1	0.5	1	1	1	--	1.10E-02
Glissement	Apparition	0.1	0.1	0.3	0.3	0.3	0.3	--	
	Rupture	0.077	0.11	0.55	1	1	1	--	
	Aléa	0.0077	0.011	0.165	0.3	0.3	0.3	--	3.02E-03
Erosion externe	Apparition	0	0	0	0	0	0	--	
	Rupture	0.00308	0.0044	0.022	0.4	0.4	0.4	--	
	Aléa	0	0	0	0	0	0	--	0.00E+00
Soulèvement hydraulique	Apparition	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	--	
	Rupture	0.1	0.1	0.5	1	1	1	--	
	Aléa	0.08	0.08	0.4	0.8	0.8	0.8	--	9.19E-03
Aléa global	1.5E-01	1.8E-01	7.5E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	--	1.37E-02

Note sur les calculs:  
L'**Aléa global** désigne, pour chaque crue, la probabilité de rupture tous modes confondus (Formule de Poincaré)  
L'**Aléa annuel** désigne, pour chaque phénomène, la somme de chaque aléa de crue multiplié par son occurrence.

Classification de l'aléa	Nul	Négligeable	Faible	Moyen	Fort	Très fort	Certain
--------------------------	-----	-------------	--------	-------	------	-----------	---------

FIGURE 6 : - PV DU TRONÇON N° 15 DE LA LEVEE D'ORLEANS

Il donne un schéma de la levée avec les informations principales (hauteur de la levée, largeur en tête et en pied présence de canalisation, de maison encastree ou de végétation.) le niveau d'eau de chaque crue est représenté devant la levée ou dessus en cas de surverse.

**Feuille analyse**

Une feuille d'analyse permet de garder les informations principales relatives à chaque modélisation et permet de

comparer chaque résultat en faisant varier un ou plusieurs paramètres.

**Feuille d'export**

Une feuille d'export permet d'exporter les informations nécessaires pour représenter les résultats à l'aide d'un logiciel de type SIG.

**Conclusion**

La méthode CARDigues est un outil innovant pour réaliser une étude de dangers ou faire un diagnostic sur une levée ancienne. Il a permis de mettre en évidence les faiblesses des trois digues de classe A de la Loire. C'est un résultat essentiel dans la méthodologie des études de dangers. Néanmoins il reste encore à perfectionner :

- le calage du modèle est à affiner via tous les coefficients et paramètres pris en compte
- il est également possible de prévoir de nouveaux "modes" (scénarios) de rupture, non actuellement pris en compte.
- L'outil informatique en lui même reste en cours de développement, notamment pour l'ergonomie et les échanges avec les logiciels de données entrantes (SIRS), ou sortantes (SIG).

La réalisation des études de dangers des 45 digues de classe B et C de la Loire et des ses principaux affluents sera l'occasion d'améliorer ce modèle semi-probabiliste.

**Remerciements**

Nous tenons à transmettre tous nos remerciements à toutes les personnes qui ont permis la réalisation des études de dangers des digues de classe A de la Loire.

**Références**

- [1] U.S. Army corps of Engineers (1986). *Engineering and design : seepage analysis and control for dam.*
- [2] Cemagref (2001) *Guide pratique à l'usage des propriétaires et gestionnaires - Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations*
- [3] Piney (2011) Retour d'expérience des brèches historiques du val d'Orléans
- [4] Maurin (2011) Calcul des digues à l'érosion interne pour un hydrogrammes de crue donnée
- [5] Durand (2012) Note méthodologique Cardigues – études de dangers de la Loire