

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

***D - Note de mise en œuvre du modèle
de calcul de l'aléa de rupture sur les
vals de la Nièvre, du Cher et de la
Saône-et-Loire***

Juin 2017

Note d'application de CARDigue aux études de dangers des digues B et C des départements de la Nièvre, de la Saône-et-Loire et du Cher

Document établi sur la base de l'annexe 22 de l'EDD de la levée d'Orléans (Arbres de défaillance simplifiées et méthodologie de calcul de l'aléa de rupture (décembre 2012) et de la note relative aux modifications apportées dans le cadre de la version 28 de CARDigue

	1105 Av Pierre Mendès-France BP 4001 30001 NIMES CEDEX 5 Tel : 04.66.87.50.00 - Fax : 04.66.87.51.03
Titre du document :	Note d'application de CARDigue
N° Affaire :	800730

Date	Indice	Observation	Dressé par	Vérifié par	Approuvé par
24/07/2015	0	Première version	NSI et RRE	RRE	MCG
27/08/2015	1	Deuxième version	NSI et GRI	RRE	
30/11/2015	2	Troisième version	NSI et GRI	RRE	MCG

SOMMAIRE

1. ARBRES DE DÉFAILLANCES SIMPLIFIÉS	3
1.1 arbre de défaillance du scénario de rupture par surverse	4
1.2 arbres de défaillance du scénario de rupture par érosion interne	5
1.3 arbres de défaillance du scénario de rupture par glissement de talus côté val	6
1.4 arbres de défaillance du scénario de rupture par glissement de talus côté riv	7
1.5 arbres de défaillance du scénario de rupture par érosion externe (affouillement)	8
1.6 arbres de défaillance du scénario de rupture par soulèvement	9
2. MÉTHODOLOGIE ADOPTÉE POUR LE CALCUL DE L'ALÉA DE RUPTURE DE DIGUE	10
2.1 principes généraux et probabilités	10
2.1.1 Introduction et principes de la méthodologie	10
2.1.2 Les probabilités définies dans le modèle	10
2.2 phénomène (scenario) de surverse	12
2.2.1 Probabilité d'apparition d'une surverse $P(sa)$	12
2.2.2 Probabilité de rupture en cas de surverse $P(sr)$	12
2.2.3 Aléa de rupture par surverse	16
2.3 phénomène (scenario) d'érosion interne	16
2.3.1 Probabilité d'apparition d'érosion interne $P(ei_a)$	16
2.3.2 Probabilité de rupture une fois l'érosion interne établie $P(ei_r)$	24
2.4 phénomène (scenario) de glissement de talus	25
2.5 phénomène (scenario) d'érosion externe (affouillement)	28
2.6 phénomène (scenario) de soulèvement de fondation cote val	31

1. ARBRES DE DÉFAILLANCES SIMPLIFIÉS

Dans le cadre des études de dangers des digues du Loiret de classe B et C, les 3 profils type pris en compte dans le cadre de l'EDD du val d'Orléans ont été repris :

- T1 : présence d'un perré ou confortement équivalent sur talus côté Loire (et berge éloignée) et pas de confortement côté Val
- T2 : recharge argileuse (étanche) côté Loire et système parafouille (et berge éloignée) et pas de confortement côté Val
- T3 : parement côté Loire, pas de système parafouille et massif filtrant côté Val

Il est précisé :

- que ces profils ne traitent pas les zones renforcées au déversement.
- que les scénarios de rupture initiés par des phénomènes karstiques dans le cadre de l'application de CARDigue, n'ont pas été pris en compte.

Il convient de noter que les profils présentés page 6 de l'annexe 22 sont indicatifs. En effet :

- certains points représentés ne sont pas directement liés aux profils. Il s'agit notamment :
 - De la notion berge éloignée (déduite d'une analyse topographique distincte du type de profil) ;
 - Du contexte géotechnique (déduite des reconnaissances et études spécifiques) ;
 - De la profondeur du système parafouille et/ou du perré (non retenu à ce jour mais pourra faire l'objet de réflexions complémentaires à l'occasion d'une évolution ultérieure du modèle.
- Certaines caractéristiques sont schématiques ou négligées comme :
 - La présence (souvent) d'anciens pieux bois en soutien du perré ;
 - Le type et la profondeur du système parafouille en pied du renforcement côté Loire ;
 - L'épaisseur et les caractéristiques de la recharge argileuse côté Loire ;
 - L'épaisseur et les caractéristiques de l'épaulement en matériaux plus perméables côté Val ;

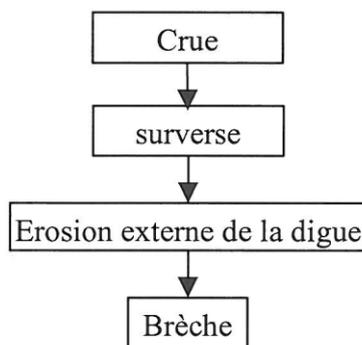
Concernant les § suivants :

- les fonctions mises en évidence sont les suivantes :
 - Résistance à l'érosion externe ;
 - Résistance à l'érosion interne ;
 - Etanchéité ;
 - Drainage ;
 - Stabilité.
- Les différents composants sont les suivants :
 - Berge ;
 - Franc-bord ;
 - Renforcement en pied / parafouille ;
 - Pied de talus côté Loire ;
 - Talus côté Loire ;

- Organes d'étanchéité (Renforcement amont, palplanches) ;
- Crête de digue ;
- Talus côté zone protégée ;
- Pied de talus côté zone protégée ;
- Filtre drainant côté Val ;
- Horizon superficiel ;
- Horizon intermédiaire ;
- Substratum.

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

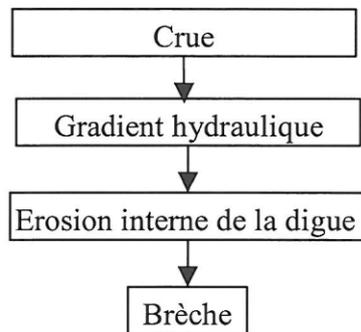
Les composants présentés au §1.1 de l'annexe 22 appellent les remarques suivantes :

- le pied de digue (côté Val) et sa proximité immédiate (environ 5m) peuvent avoir une influence sur ce scénario de défaillance ; dans le cadre de l'utilisation de CAR Digue, cela signifie que, par exemple, **des obstacles positionnés à moins de 5m du pied de talus côté val ont été pris en compte comme facteurs aggravants** ;
- seuls les éléments **en crête de digue, côté val sont susceptibles d'intervenir dans ce mécanisme de rupture** ; en effet seuls les éléments situés au niveau de la prise de vitesse de l'eau surversante présentent un caractère aggravant ;
- le composant « banquette côté Val » a été pris en compte ; la présence de point bas ou d'interruption de ce composant représente en effet un important facteur aggravant vis-à-vis de la rupture par surverse.

Concernant les composants, en pied côté Val, pour des lames d'eau déversantes de faibles épaisseurs, il pourrait être considéré l'effet améliorant des massifs drainant (de par leurs rôles sur la dissipation d'énergie et sur la protection du pied de talus) ; ce point n'a pas été pris en compte mais pourrait faire l'objet de réflexions et études complémentaires.

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

Les composants présentés au §1.2 de l'annexe 22 appellent les remarques suivantes :

- il est noté que la présence du perré est, à ce jour, négligée vis-à-vis de son éventuel rôle sur l'étanchéité. Compte tenu d'une part de la difficulté d'observation des perrés sur la majorité des linéaires (car recouvert de terre végétale) et d'autre part du caractère dégradé à très dégradé des portions observées, ce point n'appelle pas de remarques particulières de BRLi même si ponctuellement il pourrait être optimisé.
- il ne semble pas judicieux de prendre en compte le franc-bord et/ou la berge dans ce scénario de défaillance ; **il a été considéré que seules les facteurs aggravants sur l'ouvrage, en pied de digue et à sa proximité immédiate (environ 5m) devaient être pris en compte** ; Dans le cadre de l'utilisation de CARDigue, cela signifie que, par exemple, les arbres ou terriers positionnés au droit du franc-bord ne sont pas pris en compte comme facteur aggravant ;
- côté Val, sur le même raisonnement que ci-dessus, **il a été considéré uniquement les facteurs aggravants de type arbres ou terriers sur l'ouvrage, en pied de digue et à sa proximité immédiate (environ 5m) ;**

Dans le cadre de l'utilisation de CARDigue seules les dépressions et zones humides ont été prises en compte même pour des distances par rapport à l'ouvrage supérieures à 5m.

Pour le profil 2, concernant les organes d'étanchéité de type parafouille (palplanche, paroi moulée, etc.), il pourrait être intégrée une notion de profondeur de fiche de celles-ci en lien avec la nature des horizons superficiels et intermédiaires. Ce point n'a pas été pris en compte mais pourrait faire l'objet de réflexions et études complémentaires.

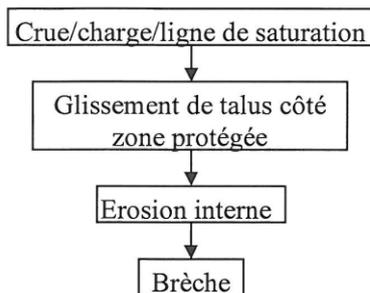
Mode de calcul de l'aléa d'apparition de l'érosion interne :

Les retours d'expérience de BRLi dans le domaine de diagnostic et conception d'ouvrage de type digue ou barrage mettent en évidence la qualité et l'apport des logiciels de calculs utilisés pour la modélisation par éléments finis des écoulements de fluides et les pressions interstitielles dans les milieux poreux (sols, bétons, rock, etc.), tels que SEEP ou PLAXFLOW, pour déterminer en fonction des différents hydrogrammes de crue, la ligne de saturation des ouvrages et les gradients en résultant en pied côté val.

Ainsi sur le même principe que ce qui a été fait pour le calcul de l'aléa d'apparition des glissements, il est recommandé de réaliser une étude paramétrique.

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

L'arbre de défaillance simplifié considère que le phénomène de glissement provoquera une diminution de l'épaisseur de l'ouvrage et de ce fait induira un phénomène d'érosion interne qui provoquera la brèche.

La version initiale de CARDigue prévoit un simple surclassement de la probabilité d'érosion interne (majoration de 10%). Or, il s'est avéré lors des EDD45 que cette majoration du risque d'érosion interne n'était pas suffisante pour mettre en exergue la forte probabilité de ré-apparition de glissement. Une proposition d'évolution/amélioration de CARDigue sur ce point est présentée ci-dessous.

Etude paramétrique retenue en fonction de la Configuration de la digue

Les reconnaissances géotechniques ont mis en évidence des natures et caractéristiques de sol différentes de celles prises en compte pour réaliser les modélisations et établir les formules de d'interpolation utilisées dans CarDigue (cf. §1.4.b de rapport de stage de fin d'étude : Géotechnique appliquée aux études de dangers des digues de la Loire et autres infrastructures).

Ce constat nous a conduit à intégrer au calcul de la probabilité d'apparition des glissements, un facteur favorable/défavorable, fonction de la nature du corps de digue.

L'arbre de défaillance simplifié considère que le phénomène de glissement provoquera une diminution de l'épaisseur de l'ouvrage et de ce fait induira un phénomène d'érosion interne qui provoquera la brèche. Pour mémoire, actuellement CARDigue prévoit un simple surclassement de la probabilité d'érosion interne (majoration de 10%).

Comme évoquée dans la publication du 2ième colloque national – Dignes 2013, dans le cadre des EDD de la Loire ce choix se justifie par les caractéristiques géométriques des levées qui rendent très peu probable l'occurrence de glissement induisant une rupture directe de la levée.

Compte tenu des hétérogénéités géométriques constatées et des signes de glissement identifiés lors des VTA (au droit des vals de Saint-Hilare Fontaine, Givry, Beffes et Léré) BRLi à proposer lors des précédentes EDD une amélioration du mode de calcul.

Afin d'améliorer le mode de calcul, il est préconisé :

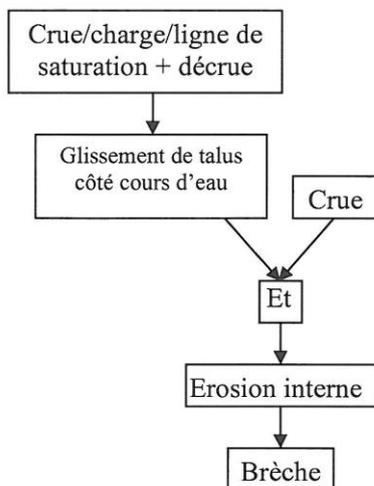
- de rajouter deux facteurs aggravant intervenant dans la probabilité d'apparition du glissement et tenant compte de la préexistence d'un glissement :
 - o GLI (glissement de peau) : 1,2
 - o GGL (grand glissement) : 1,5
- En lieu et place du surclassement, en considérant que le glissement entraîne une réduction de la largeur de l'ouvrage équivalent à la hauteur de celui-ci, de créer un nouvel onglet de calcul de l'érosion interne, après glissement, sur la base d'une largeur d'ouvrage réduite : $L' = L_{\text{initiale}} - H_{\text{ouvrage}}$ avec L' : nouvel largeur d'ouvrage de calcul, L_{initiale} : largeur de l'ouvrage initiale, avant glissement et H_{ouvrage} : la hauteur de l'ouvrage côté val.

Une autre piste de réflexion/amélioration pourrait être de modifier l'arbre de défaillance en considérant, à compter du premier glissement, qu'il pourrait se produire des glissements successifs conduisant soit à une surverse, soit qui provoquerait directement une brèche. Néanmoins, compte tenu d'une part de la faible incidence probable de cette variante et d'autre part, par homogénéité avec les études d'ores et déjà réalisées sur le val d'Orléans, cette piste de réflexion/amélioration ne semble pas être la plus pertinente.

Concernant les tableaux Fonctions/composants présentés, il a été noté que pour le profil T3, la présence du massif drainant est à ce jour négligée en ce qui concerne l'évaluation de l'aléa de glissement; pourtant cet ouvrage, d'une part, permet d'abaisser la ligne de saturation dans l'ouvrage et, d'autre part, compte tenu de sa constitution en matériaux frottants et sa position en pied, peut avoir un impact améliorant sur les calculs de stabilité ; à ce stade, par homogénéité avec les études d'ores et déjà réalisées il n'est pas prévu de modifier CARDigue ; **néanmoins le rajout d'un facteur améliorant pourrait être envisagé.**

1.4 ARBRES DE DÉFAILLANCE DU SCÉNARIO DE RUPTURE PAR GLISSEMENT DE TALUS CÔTÉ RIV

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

L'arbre de défaillance simplifié considère que le phénomène de glissement provoquera une diminution de l'épaisseur de l'ouvrage et de ce fait induira un phénomène d'érosion interne qui provoquera la brèche. Ce point appelle les mêmes remarques que ci-dessus.

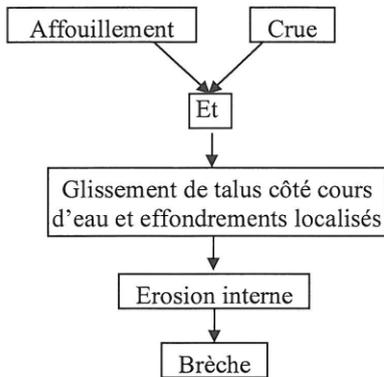
L'arbre de défaillance simplifié considère que le phénomène de glissement provoquera une diminution de l'épaisseur de l'ouvrage et de ce fait induira un phénomène d'érosion interne qui provoquera la brèche. Pour mémoire, actuellement CARDigue prévoit un simple surclassement de la probabilité d'érosion interne (majoration de 10%).

Tout comme pour les glissements afin d'améliorer le mode de calcul, il est préconisé :

- de rajouter deux facteurs aggravant intervenant dans la probabilité d'apparition du glissement :
 - o GLI (glissement de peau) : 1,2
 - o GGL (grand glissement) : 1,5
- de créer un nouvel onglet de calcul de l'érosion interne, après glissement, sur la base d'une largeur d'ouvrage réduite : $L' = L_{\text{initiale}} - H_{\text{ouvrage côté RIV}}$ avec L' : nouvel largeur d'ouvrage de calcul, L_{initiale} : largeur de l'ouvrage initiale, avant glissement et $H_{\text{ouvrage côté RIV}}$: la hauteur de l'ouvrage, considérant que le glissement entraîne une réduction de la largeur de l'ouvrage équivalent à la hauteur de celui-ci ;
- et de réaliser une étude paramétrique complémentaire.

1.5 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

Par rapport aux remarques des paragraphes précédents, cet arbre de défaillance n'appelle pas de remarques complémentaires.

Pour mémoire il convient néanmoins de noter :

- que cet arbre de défaillance induit une influence non négligeable du calcul de probabilité de rupture par glissement côté Loire ;
- que cet arbre de défaillance induit une influence non négligeable du calcul de probabilité de rupture par érosion interne.

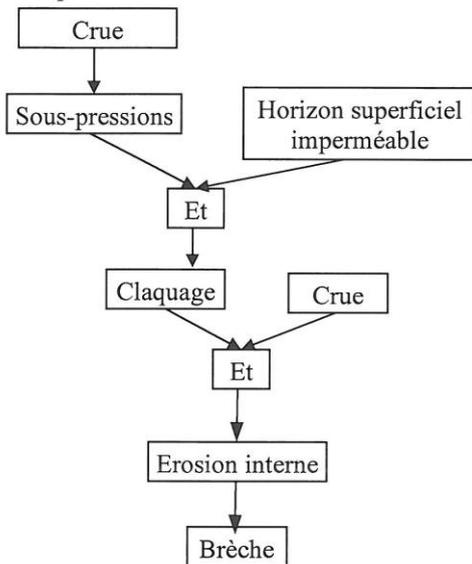
En considérant que l'érosion externe augmente le risque de rupture par glissement ($P(ee-r) = Alea$ de rupture par glissement [$P(ga) \times P(gr)$] majoré) et que celui-ci, lorsqu'il se produit, entraîne une réduction de la largeur de l'ouvrage équivalente à la hauteur côté Loire ; Il est recommandé d'utiliser un nouvel onglet de calcul de l'érosion interne, après glissement, sur la base d'une largeur d'ouvrage réduite : $L' = L_{initiale} - H_{ouvrage}$ avec L' : nouvel largeur d'ouvrage de calcul, $L_{initiale}$: largeur de l'ouvrage initiale, avant glissement et $H_{ouvrage}$: la hauteur de l'ouvrage.

Pour le reste, la majoration par un facteur 4 de l'apparition initiale de glissement côté Loire suite à érosion externe est maintenue, soit au final, comme $[P \text{ rupture } ee] = [P \text{ érosion interne suite glissement Loire}] \times [P \text{ glissement Loire suite à érosion externe}] \times [P \text{ apparition } ee]$:

$$P(ree) = P \text{ "glissement Loire" } \times 4$$

1.6 ARBRES DE DÉFAILLANCE DU SCÉNARIO DE RUPTURE PAR SOULÈVEMENT

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

Par rapport aux remarques des paragraphes précédents, cet arbre de défaillance n'appelle pas de remarques complémentaires.

2. MÉTHODOLOGIE ADOPTÉE POUR LE CALCUL DE L'ALÉA DE RUPTURE DE DIGUE

2.1 PRINCIPES GÉNÉRAUX ET PROBABILITÉS

2.1.1 Introduction et principes de la méthodologie

Les dispositions présentées dans la note initiale ont été reconduites dans le cadre de notre étude. Ce point n'appelle donc pas de remarques complémentaires.

Par soucis de précision quant à l'exploitation des différents points caractéristiques, pour mémoire il est néanmoins précisé les points suivants :

- Largeur de la digue : distance (X,Y,Z) entre pt1 et pt6 ;
- Hauteur de la digue : distance (Z) entre pt4 et pt6 ;
- Largeur en crête de la digue : distance (X,Y) entre pt2 et pt5 ;
- Largeur du franc-bord : distance (X,Y) entre pt0 et pt1 ;
- Chemin hydraulique vertical : distance (Z) entre pt1 et pt6 ;
- Charge hydraulique : $Z_{crue} - Z_6$ ou $Z_{crue} - Z_{val}$ en cas d'inondation par remous.

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

Le mode de calcul des probabilités évènementielles dans CARDigue ne considère que les conditions hydrauliques du pic de crue¹ qui ne sont pas systématiquement les plus pénalisantes (y compris pour la surverse où l'augmentation du niveau d'eau côté val diminue le risque de rupture) sur les vals soumis à un remous important.

Afin d'obtenir une probabilité croissante de rupture en fonction de l'occurrence de crue, la formule de calcul de la probabilité de rupture évènementielle a été corrigée en retenant le max des probabilités évènementielles de rupture de l'occurrence courante et des occurrences précédentes.

Ainsi il convient de noter que pour chaque situation hydraulique de la crue Q_i , il est retenu le maximum entre les aléas des événements inférieurs et l'aléa global calculé (Par exemple, pour $Q_5 = 25\%$, si l'aléa calculé pour Q_{10} est 10% , il sera retenu $\max(25\% ; 10\%) = 25\%$).

2.1.2.2 – Aléa global de rupture

Hormis la dernière remarque du § précédent, les dispositions présentées dans la note initiale ont été reconduites dans le cadre de notre étude. Ce point n'appelle donc pas de remarques complémentaires.

¹ Interrogée sur le fait que ce principe de calcul s'apparentait davantage une notion de probabilité conditionnelle (i.e. associée à des conditions hydrauliques données), la DREAL a confirmé que le calage des paramètres a été établi en considérant toute la durée de la crue et correspondait bien à des probabilités évènementielles (i.e. intégratrices de l'ensemble des conditions hydrauliques rencontrées au cours d'une crue).

2.1.2.3 – Aléa annuel de rupture

Idem ci-dessus.

2.1.2.4 – Aléa global annuel de rupture

Idem ci-dessus.

2.2 PHÉNOMÈNE (SCENARIO) DE SURVERSE

Les dispositions présentées en préambule de la notice CARDigue de décembre 2012 ont été reconduites dans le cadre de notre étude. Ce point n'appelle donc pas de remarques complémentaires.

2.2.1 Probabilité d'apparition d'une surverse P (sa)

Nota sur les banquettes côté Loire :

- Pour les banquettes en terre présentant des interruptions ou des points bas, il est retenu 0 comme hauteur d'influence ($H_{ir}=0$), c'est-à-dire que leur rôle est négligé
- Pour les banquettes en terre ne présentant pas d'interruptions ou point bas et les banquettes en maçonnerie, la hauteur d'influence a été déterminée au cas par cas, à dire d'expert, en fonction de leur état et de leurs caractéristiques géométriques.

Notons que le regroupement des cas « avec banquette » et « sans banquette » sous une seule et même formule dans la V28 de CARDigue (alors qu'il y avait 2 arbres séparés dans la V27) ne semble pas fonctionner idéalement car la revanche par rapport à la crête de banquette est nécessairement traitée avec le même degré de fiabilité que la revanche par rapport à la crête de digue.

Concernant la revanche, lorsqu'elle est inférieure à 0.5m, compte tenu des incertitudes, la surverse est considérée comme possible mais peu probable. Dans le cadre des EDD45, afin de réduire les effets de seuil important entre une revanche de 0.01m ($P(Sa)=0.1$) et une revanche de 0 ($P(Sa)=0.8$ à 1), il a été retenu la formulation continue suivante :

$P(Sa) = 0,5 - H_r$ si $0 < H_r < 0,5$
--

Il est proposé de reconduire ce choix.

Rappel : En l'absence de banquette $H_{ir} = 0$

2.2.2 Probabilité de rupture en cas de surverse P(sr)

Probabilité de rupture fixe

- 1) Présence banquette côté Val -> 1

Par cohérence avec les études d'ores et déjà réalisées, ce point n'a pas été modifié.

- 2) Déversoir -> 0.001

Dans le cadre de l'application de CARDigue ce point n'a pas été modifié sur la majorité des vals.

Seul le déversoir de Guétin a nécessité une adaptation. En effet, afin de tenir compte d'une part des retours du MOA (présence de « gézer » lors des crues passées) qui laissent penser à une dégradation de l'ouvrage sous la parement et à la nature sableuse des formations sous la parement, mise en évidence par les sondages géotechniques, il a été retenu, à dire d'expert, un facteur de 0.05.

Dans le cadre d'évolution ultérieure de CARDigue, il est néanmoins recommandé de créer un onglet spécifique aux déversoirs et à leur vérification vis-à-vis de la surverse. Sur la base des lames d'eau déversante, de la pente du talus, de la profondeur et largeur de la fosse de dissipation, il est possible :

- de déterminer la vitesse et de fait, force tractrice qui s'applique en pied de talus et de comparer celle-ci à la nature du déversoir et à son état « à dire d'expert » ;
- de déterminer la longueur du ressaut et de le comparer à la géométrie du déversoir ;

- de comparer les hauteurs d'eau à la hauteur des bajoyers pour déceler d'éventuels risques en bordure immédiate des talus renforcés.

3) Revanche critique

Dans le cadre des précédentes études, il a été retenu une revanche critique nulle : s'il n'y a pas de surverse réelle, alors la probabilité de rupture est nulle quand bien même le risque d'apparition de surverse ne l'est pas (cf. ci-avant). Cette hypothèse rendrait donc caduque le risque d'apparition de surverse précédemment pris en compte.

Dans la cadre de la présente étude, il est proposé de retenir 0.5m pour tenir compte des aléas du modèle et des éventuels effets du vent et $P_b(Sr) = 0.1$.

Probabilité de rupture fonction de la Hauteur de surverse H_s <i>(probabilité modifiable par les coefficients ci-dessous)</i>		-0.5	$H_s <$	0	0.1
		0	$H_s <$	0.1	0.5
		0.1	$< H_s <$	0.2	0.8
		0.2	$< H_s$		1

Facteurs influençant la probabilité de rupture par surverse :

Les facteurs relatifs à la largeur en crête, à la pente du talus côté val et à la présence d'eau côté val n'appellent pas de remarque.

Concernant la présence d'obstacles à l'écoulement certains facteurs ont été rajoutés.

Coefficient lié à la largeur de digue en tete (en mètres)				
Intervals de la largeur de digue en mètres	0	$< \text{largeur} <$	30	1
	30	$< \text{largeur} <$	40	0.8
	40	$< \text{largeur} <$	50	0.5
	50	$< \text{largeur} <$	100	0.1
	100	$< \text{largeur}$		0.01
Coefficient lié à la pente du talus coté Val (en degrés)				
Intervals de la pente du talus en degré	0	$< \text{pente} <$	10	0.5
	10	$< \text{pente} <$	22	0.8
	22	$< \text{pente}$		1

Autres facteurs		
Description du facteur	code	coef
Décapage du tapis végétal (ravinelements, passages d'animaux...)	DECAP	1.3
Présence d'obstacle sur le talus Coté Val (pylone, borne, escalier, arbre incliné, etc.)	OBSV	1.3
Décapage + Obstacle coté Val	DECAP+OBSV	1.5
Glissement et/ou érosion / affouillement	GLI	1.5
Grand glissement	GGL	1.7
Ravinement	RAV	1.6
Piétinement	PIE	1.6
Enrochements	ENR	0.5
Tapis drainant/Massifs filtrants	TADR	0.9
Génie végétal (type evergreen)	EVG	0.8
Génie végétal (type fascine)	FASC	0.9
Parement aval maçonné	PAM	0.8

Coefficient lié à la présence d'eau coté Val (en mètres)				
Intervals de hauteur d'eau en mètre	0	< Heau Val <	0.50	→ 0.9
	0.5	< Heau Val <	1.00	→ 0.7
	1	<Heau Val <	2.00	→ 0.5
	2	< Heau Val		→ 0.1

Nota : il a été intégré un quatrième facteur aggravant « GLI » sur le talus côté val. Ce facteur comprend tout indice de mouvement de terre ou d'érosion dans le sens de la pente du talus. Ces désordres sont considérés comme des mécanismes déjà apparus et peuvent de ce fait initier rapidement une érosion externe au droit de ces zones de talus déjà fragilisées. Afin de prendre en compte le caractère à la fois initiateur et aggravant de ce facteur, le coefficient qui lui a été affecté est pris égal à celui dû à la présence simultanée d'un décapage et d'un obstacle.

Concernant les facteurs défavorables, il est recommandé d'intégrer/spécifier les facteurs suivants :

- GGL pour tenir compte du caractère très défavorable de la préexistence de grand glissement sur l'aléa de rupture ;
- RAV et PIE pour tenir compte du caractère défavorable des ravines et traces de piétinement préexistantes, compte tenu de leur orientation (dans le sens de la pente) par rapport à la concentration de l'écoulement qu'elles engendrent lors de l'apparition des surverses.

Le tableau suivant récapitule les facteurs associés à chaque type de désordre sous réserve qu'il se situe côté TER, en crête, sur le talus ou en pied :

Attribut	code couleur	Saisie ou choix possible "Désordre_description"	Correspondance SIRS	Facteurs aggravants surverse
				TAD côte TER (yc PDI côté TER) et CRE côte TER
		leve topographique	AUTRE	
Canalisation/conduite		Canalisation Conduite (CAN)	CAN	OBSV
		Canalisation Conduite Hors Service	CHS	OBSV
OHT		OH traversant ouvert	OHT	OBSV
		OH traversant avec marteliere	OHT	OBSV
		OH traversant avec clapet anti-retour	OHT	OBSV
Ouvrage encastré		ouvrage encastré	BAT	OBSV
		Bâtiment	BAT	OBSV
		Mur de soutènement	MUR	OBSV
		Culée	OUV	
	Ecluse	OUV		
Corps divers		pylone	POT	OBSV
		borne	BOR	OBSV
		Barrière	COR	OBSV
		banc	COR	OBSV+DECAP
		muret	CLO	OBSV
		escalier	ESC	OBSV
		route/piste	CNS	OBSV
		cloture	CLO	OBSV
		piezo	PZO	OBSV
		Barbacane	BAR	OBSV
		ouvrage divers	COR	OBSV
		regard	REG	OBSV
		Corps divers n'affectant pas la structure	CNS	OBSV
Vegetation		Arbre (VLI)	VEG	OBSV
		Arbre incline (VLI)	VEG	OBSV
		Arbre Arrache (VLA)	VEG	OBSV+DECAP
		SOU (Souche)	VEG	OBSV
		Souche VLI (SOUVLI)	VEG	OBSV
		Souche VAB (SOUVAB)	VEG	OBSV
		Vég Arbustive brousaille (VAB)	VEG	OBSV
		haie (VAB)	VEG	OBSV
		Vég Ligneuse clairsemée (VLC)	VEG	OBSV
	Vég Ligneuse généralisée (VVG)	VEG	OBSV	
dégradation de surface		erosion ravinement	RAV	RAV
		Erosion/affouillement	ERV	DECAP
		Piétinement	PIE	PIE
		Ornière	PAS	DECAP
		désordre divers	DIV	DECAP
Hors profil		point bas banquette	PTBB	
		point bas crête	PTBC	
		crete bombee	CEB	
		interruption banquette	INB	
		Fossé	FOS	
		Depression, Etang, Zone d'emprunt	DEP	
		fosse en eau	FEE	
		depression, zone d'emprunt en eau	DEP	
		remblai/recharge (ancienne breche?)	RCH	
		Terrassements/deblais	DEB	OBSV+DECAP
Desordres geotechniques		Gliss/bascul (TV remaniee)	MVT	DECAP
		gliss basculement (bourrelets)	MVT	
		Glissement	MVT	DECAP
		Gliss/bascul (tass/affai)	MVT	DECAP
		tassement affaissement	MVT?	DECAP
		Basculement	MVT	
		GRAND GLISSEMENT	MVT	DECAP
		Fontis	FON	
		Fuite	FU	
	indice de fuite	IFU		
Terriers		terrier D5	TRR	DECAP
		terrier D15	TRR	DECAP
		terrier D30	TRR	DECAP
Desordres structurels		Fissure	FIS	
		Basculement	MVT	
		Altera/corros	ALT	
		Déchaussement maçonnerie	DEC	
		Decollement	DEC	
		mauv contact ouv	DEC	
		Déjointement	DEJ	
		destruction	DES	
		Autre désordre structurel	DES	
		Devers defens	DES	
		Eros ar defense	ERD	

2.2.3 Aléa de rupture par surverse

Les dispositions présentées dans la notice CARDigue de décembre 2012 ont été reconduites dans le cadre de notre étude. Ce point n'appelle donc pas de remarques complémentaires.

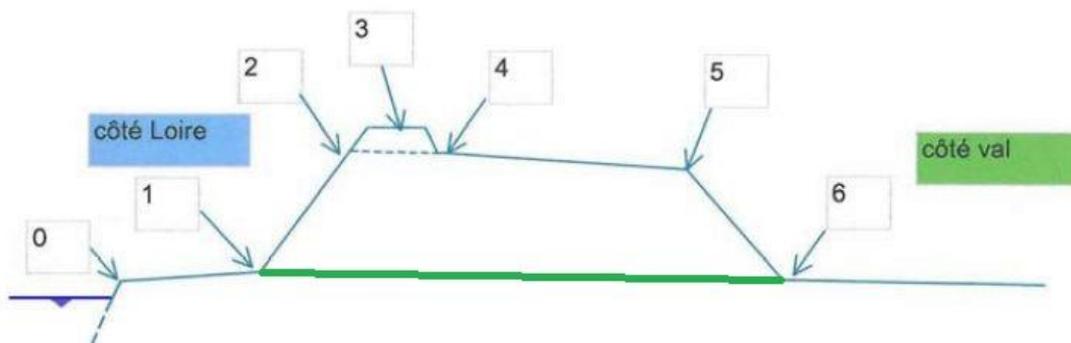
2.3 PHÉNOMÈNE (SCENARIO) D'ÉROSION INTERNE

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

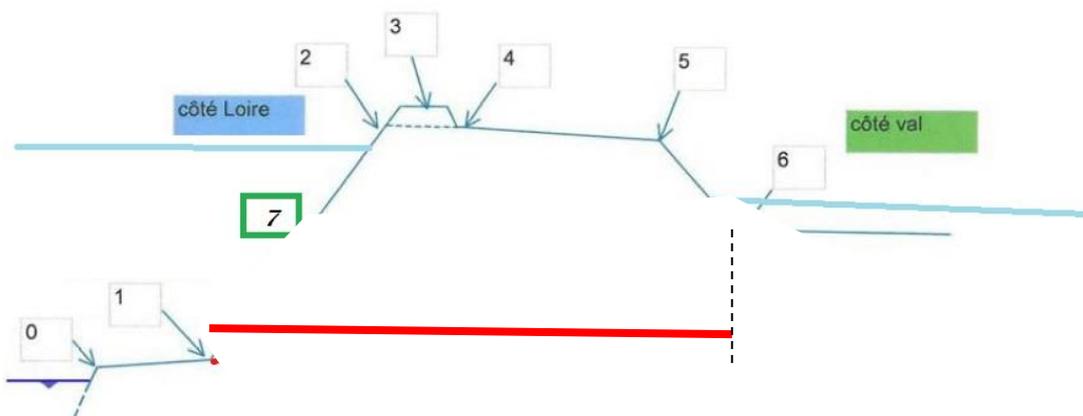
Détermination du chemin hydraulique :

Dans le cadre des études précédentes il a été constaté que certaines configurations conduisaient à des calculs de chemin hydraulique non conforme avec le mode de calcul du facteur de Bligh.

Ci-dessous un exemple standard pour lequel le calcul du chemin hydraulique (en vert) est cohérent :

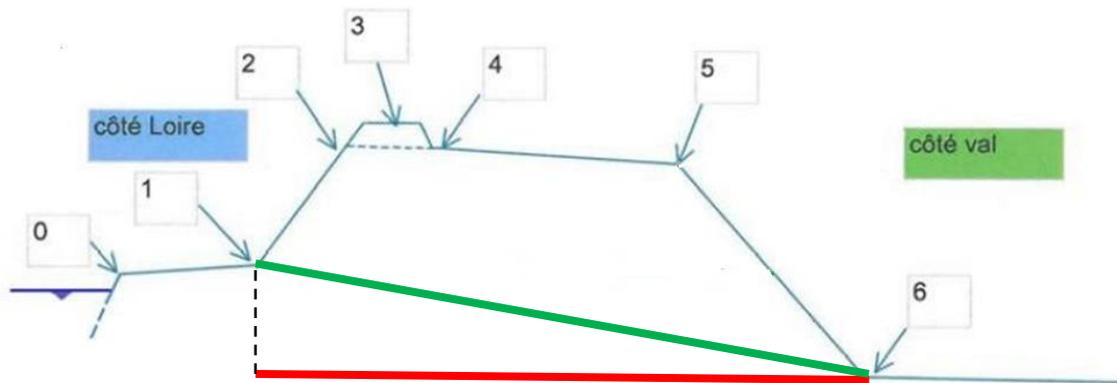


Ci-dessous un exemple d'un franc-bord sensiblement plus bas que le val, pour lequel le calcul du chemin hydraulique (en rouge) ne nous semble pas adapté.



Ci-dessous le cas inverse où le val est en contrebas du franc-bord.

Il a de ce fait été proposé la création d'un point 7 (par projection du TN côté Val) et le calcul du chemin hydraulique selon la ligne verte.



Dans le cadre de la présente étude, il est proposée de préciser encore le mode de détermination de la distance à prendre en compte dans le cadre des calculs. Cette proposition consiste à retenir comme point 7 :

- Pour une ligne d'eau supérieure au point 1: l'intersection entre la ligne d'eau et le talus côté RIV ;
- Pour une ligne d'eau inférieure au point 1 : l'intersection entre la ligne d'eau et le franc bord.

Probabilité d'apparition :

Probabilités d'apparition en fonction des valeurs du critère de Bligh $c=L/\Delta H$			
Intervalles du critère de Bligh			Proba
l'eau n'atteint pas la cote du pied de digue coté Val			0
0	< Bligh <	2	1
2	< Bligh <	3	0.99
3	< Bligh <	3.5	0.95
3.5	< Bligh <	4	0.8
4	< Bligh <	4.5	0.5
4.5	< Bligh <	5	0.2
5	< Bligh <	5.5	0.1
5.5	< Bligh <	6	0.02
6	< Bligh <	7	0.01
7	< Bligh <	8	0.001
8	< Bligh		0.0001

L'évolution proposée de l'échelle des probabilités d'apparition de l'érosion interne en fonction des valeurs du critère de Bligh n'appelle pas de remarque de notre part.

Toutefois pour tenir compte des hypothèses d'application et notamment de la nature du corps de digue rencontré, il a été rajouté un facteur CDA « corps de digue argileux » de 1.1.

Autres Facteurs améliorants à porter sur Bligh		
Description du facteur	Code	coef
corps de digue argileux	CDA	1.1

Concernant les effets de seuils liés au calcul de du Bligh « brut » il convient néanmoins de préciser qu'une adaptation a été effectuée sur les seuils de déclenchements des calculs. En effet, lors des premières simulations, des risques important d'érosion interne ont été identifiés pour des lames d'eau très faibles voire nulle en pied de digue côté Loire. Les conditions retenues sont les suivantes :

- Si la charge hydraulique (mesurée par rapport à la cote du TN côté val) est supérieur à 0.5m,
- Si la hauteur d'eau en pied côté Loire est supérieure à 0.5m

Coefficients correcteurs appliqués aux coefficients de Bligh brut

Concernant ce point, il est proposé de retenir les coefficients retenus dans le cadre des études précédentes.

En ce qui concerne les souches (SOU), afin de tenir compte du caractère défavorable de la dégradation des racines, sans pour autant créer un facteur aggravant spécifique, il a été retenu d'associer à leur présence les mêmes coefficients que la végétation ligneuse généralisée (VLG).

Nota 1 : Dans le cadre de SIRSDigue un code VAB pour les végétations de type broussaille ou haie a été rajouté mais leur impact est à ce jour considéré comme nul vis-à-vis de l'aléa d'érosion interne.

Nota 2 : Le qualificatif VLG est attribué en fonction du qualificatif utilisé lors des relevés VTA, et correspond donc à « végétation dense d'un côté ou de l'autre de la digue ». Cette définition diffère de celle retenue sur l'EDD du val d'Orléans où le terme VLG était réservé au cas où la végétation était abondante des deux côtés

Pour une approche plus fine, les facteurs relatifs à la végétation ont été repris en considérant des configurations côté Loire/côté val selon le tableau ci-dessous :

VEG côté RIV	VEG côté TER	Assemblage	Code VEG CARDIGUE	F1	F2	F3
VLG	VLG	VLG-VLG	VLG2	0.55	0.6	0.65
VLC	VLG	VLC-VLG	VLG1			
VLG	VLC	VLG-VLC	VLG1	0.6	0.66	0.7
VLC	VLC	VLC-VLC	VLC2			
VLG	VLI	VLG-VLI	VLC2			
VLI	VLG	VLI-VLG	VLC2	0.7	0.85	0.86
VLC	VLI	VLC-VLI	VLC1			
VLI	VLC	VLI-VLC	VLC1			
VLG	x	VLG-x	VLC1			
x	VLG	x-VLG	VLC1	0.75	0.91	0.91
VLI	VLI	VLI-VLI	VLI2			
VLC	x	VLC-x	VLI2			
x	VLC	x-VLC	VLI2	0.9	0.93	0.93
VLI	x	VLI-x	VLI1			
x	VLI	x-VLI	VLI1	0.95	0.95	0.95

Nota : SOUCHE = VLG

Les maisons et murs ont été distingués selon leur position par rapport à la digue :

- Ouvrage inclus dans le talus de la digue : identifié comme mur/maison encastré avec modification locale du profil en travers de digue ;
- Ouvrage en pied sur le franc-bord (sans incidence sur le talus) : non pris en compte ni en tant que mur/maison encastré ni en tant que facteur aggravant le risque d'érosion interne ;
- Ouvrage en crête (sans incidence sur le talus) : non identifié en tant que mur/maison encastré mais pris en compte au travers du facteur aggravant OUV (cf. infra)

Coefficients (multiplication) de Bligh dus au type de profil					
			Digue non renforcée	Digue renforcée coté Loire	Digue renforcée coté Val
Facteurs modifiant le critère de Bligh		Code	F 1	F 2	F 3
Anomalies	Profil de base	F	1	1	1
	Présence de Maison encastrée Cote Val	BatV	0.95	0.95	1
	Présence de Maison encastrée Coté Loire	BatL	0.95	1	0.95
	Présence de Maison encastrée des deux cotés	Bat2	0.9	1	1
	Présence de canalisation en position haute	CanH	0.69	0.67	0.73
	Présence de canalisation en position moyenne	CanM	0.31	0.36	0.4
	Présence de canalisation en position basse	CanB	0.19	0.27	0.29
	Présence de terriers non traversants en position haute	TerH	0.95	0.95	0.95
	Présence de terriers non traversants en position moyenne	TerM	0.95	0.95	0.95
	Présence de terriers non traversants en position basse	TerB	0.71	0.94	0.86
	Présence de terriers traversants	TT	0	0	0
	Végétation ligneuse isolée 1	VLI1	0.95	0.95	0.95
	Végétation ligneuse isolée 2	VLI2	0.9	0.93	0.93
	Végétation ligneuse clairsemée 1	VLC1	0.75	0.91	0.91
	Végétation ligneuse clairsemée 2	VLC2	0.7	0.85	0.86
	Végétation ligneuse généralisée 1	VLG1	0.6	0.66	0.7
	Végétation ligneuse généralisée 2	VLG2	0.55	0.6	0.65
	Absence d'horizon argilo-limoneux en couche d'assise de la digue	AbsLimor	0.7	0.8	0.78
	Paroi étanche	PET	10000	10000	10000

Autres précisions :

Dans le cadre des études, plusieurs facteurs favorisant l'apparition de l'érosion interne ont été intégrés.

- **FUI** : A ce jour, il n'a pas été constaté de fuite avérée de l'ouvrage. Néanmoins ce type d'observation est possible et il est recommandé de l'intégrer à CARDigue. Compte tenu des périodes et de la fréquences des visites, le personnel qui assurera le suivi de l'ouvrage en période de crue devra être sensibilisée sur ce point ; en cas de fuite avérée la probabilité d'apparition de l'érosion interne est considérée comme certaine : $F_{FUI} = 0$;

Il convient de noter que le coefficient IFU « indice fuite » est fixée à 0.2. Il correspond à d'éventuels indices de fuite (humidité anormale du talus côté val, fossé en eau, etc.).

- **DEP et/ou FOS** : La présence d'eau en pied de digue côté val dans des fossés ou étangs favorise le phénomène de boulangerie et d'érosion régressive en permettant aux particules de sortir librement en pied de digue lorsque le gradient hydraulique le permet sans que le phénomène soit constatable visuellement (phénomène sous-eau). Le risque d'érosion interne est accru au niveau de ces zones humides.

Nota 1 : Afin de tenir compte du caractère moins défavorable de la présence d'eau en pied de digue lorsque l'ouvrage est conforté par un massif filtrant côté VAL, il a été rajouté les facteurs DEP_F3 et FOS_F3.

Nota 2 : en cas de crue de la Loire, une remontée du niveau statique de la nappe alluviale est attendue. Ce phénomène, non pris en compte par défaut dans CARDigue, tend à réduire la charge hydraulique s'appliquant sur la digue, et donc à réduire les probabilités d'apparition de rupture par érosion interne. Aussi, sur les profils situés au droit d'une dépression (côté val), la cote Z6 du pied de digue côté val est réhaussée pour la ramener à une cote équivalente à celle des profils situés en amont et en aval de cette dépression.

- **OUV** : Ce code est utilisé pour les ouvrages « encastrés » (type pile de pont côté val ou maison en crête) qui sont susceptibles de réduire l'emprise de la digue au niveau de son implantation, ce qui se traduit par une augmentation du gradient hydraulique et donc favorise l'apparition de l'érosion interne ; contrairement aux maisons et murs encastrés, le raccourcissement de chemin hydraulique n'est pas pris en compte explicitement au niveau de la géométrie
- **D20** : En général, le risque associé à un terrier augmente avec son diamètre et sa profondeur. De ce fait, il a été jugé pertinent de classer, lors des VTA, les terriers, à dire d'expert, en 3 catégories D5/D15/D30. Les plus gros terriers sont considérés comme les plus problématiques vis-à-vis du risque d'érosion interne. De fait, il est recommandé, à dire d'expert, d'y associer un facteur aggravant spécifique.
- **GLI** : la préexistence d'une zone de glissement peut favoriser l'apparition du phénomène d'érosion interne. En effet la ligne de glissement peut constituer une zone d'écoulement préférentiel.
- Il a bien été noté que le parement amont n'est pas réputé jouer un rôle d'étanchéité ; néanmoins a contrario une dégradation marquée de celui-ci peut être le signe ou un élément précurseur d'une décompaction des matériaux en arrière immédiat et donc d'une possible augmentation de la perméabilité locale. Une étude spécifique sur ce point pourrait être menée. Dans l'attente il est proposé de retenir un coefficient défavorable DEG « dégradation » de 0.95.

Autres facteurs aggravant à porter sur Bligh		
Description du facteur	Code	coef
Fuite	FUI	0
Indices de fuite	IFU	0.2
fossé en eau	FOS	0.8
dépression en eau	DEP	0.7
fossé en eau_profil F3	FOS_F3	0.95
dépression en eau_profil F3	DEP_F3	0.8
ouvrage encastré ou traversant	OUV	0.9
remblais / ancienne brèche (pm)	BRE	1
dégradation	DEG	0.95
glissement	GLI	0.7
diamètre des terriers > 20 cm	D20	0.5
Fontis	FON	0.3

Cas particulier des ouvrages du val de Guétin :

Le val de Guétin se particularise par la présence de deux murs de soutènements côté val à proximité immédiate d'habitations et un déversoir qui selon le MOA montre des signes de dysfonctionnement en période de crue.

Afin de tenir compte des retours du MOA et des observations effectuées lors des VTA deux paramètres ont été rajoutés par rapport aux études précédentes :

- Le premier, DEG_DEV, a pour objet la prise en compte des dysfonctionnement constatés du déversoir et l'incidence sur le niveau de sûreté du déversoir ;

- Le deuxième, MSD, a pour objet de tenir compte de l'absence de système de drainage côté val. La résurgence d'eau côté val, lorsqu'elle n'est pas maîtrisée, peut entraîner un « lessivage » de l'ouvrage et de fait l'apparition d'érosion interne et/ou de signes d'instabilité.

La facteurs retenus sont présentés ci-dessous :

Autres facteurs aggravant à porter sur Bligh		
dégradation déversoir	DEG_DEV	0.7
mur sans drainage	MSD	0.5

Dans le cadre de la présente étude, une modification a également été apportée au mode de calcul du coefficient global d'érosion interne. En effet, lors des précédentes études il avait été mis en évidence que le mode de calcul (le min des facteurs défavorables) induisait ponctuellement la non prise en compte de certains facteur aggravants (par exemple un profil concerné par une canalisation ponctuelle au milieu d'une zone végétalisée ne ressortait pas comme plus problématique que l'ensemble du linéaire malgré l'aspect « cumulatif » de ces deux facteurs.

De fait, dans le cadre de la présente étude, il est recommandé de calculé le coefficient global selon la formule suivante :

$$C_{\text{global}} = C_{\text{profil}} * C_{\text{paroi}} * \text{Facteur } x^+ * \text{Facteur } x^- * \min(C_{\text{VEG}}, C_{\text{BAT}}, C_{\text{GEOTECH}})$$

Enfin, dans le cadre d'une évolution ultérieure du modèle, il est recommandée de réaliser des études/réflexions complémentaires sur certains paramètres en vue d'une intégration formelle dans CARDigue:

- l'incidence d'anciennes brèches ou des dégradations du parement maçonné amont ;
- **l'incidence de la charge hydraulique sur le risque représenté par** les canalisations et les terriers (canalisations prises en compte dès lors qu'elles sont submergées de 0.5m tandis que les terriers sont pris en compte dès qu'il son atteint par le niveau d'eau) ;
- les facteurs potentiellement favorable vis-à-vis de l'apparition de l'érosion interne ou vis-à-vis du risque de rupture une fois l'érosion interne établie.

Il pourrait s'agir de simulation avec un logiciel de modélisation par éléments finis des écoulements tels que SEEP ou PLAXFLOW, pour déterminer pour chaque paramètre, en fonction des différents hydrogrammes de crue, la ligne de saturation et les gradients en résultant en pied côté val.

A ce jour, dans l'attente, il est proposé les paramètres suivants :

Attribut	code couleur	Saisie ou choix possible "Désordre_description"	Correspondance SIRS	Facteurs améliorants vis-à-vis Surverse
				TADI et PDI côté VAL
Renforcement		Enrochements libres	REN	oui
		massif filtrant	REN	
		gabions	REN	oui
		Palplanches	REN	oui
		genie vegetal	REN	oui
		Epaulement amont etanche	REN	
		Epaulement côté val sans massif drainant	REN	
		Parement maconné côté TER	REN	oui
		Parement maconné côté RIV	REN	
		deversoir	REN	oui

Autres Facteurs améliorants à porter sur Bligh		
Description du facteur	Code	coef
corps de digue argileux	CDA	1.1
palplanches	PLP	1.3
Epaulement amont étanche	EAE	1.1

Cas où plusieurs anomalies / facteurs améliorants sont rattachés à un même profil :

Afin d'intégrer un effet cumulatif et de mieux faire ressortir les tronçons problématiques, la formule calculant le Bligh modifié ne retient pas que l'anomalie la plus défavorable (minimum des facteurs retenus) mais le produit de l'ensemble des facteurs.

2.3.2 Probabilité de rupture une fois l'érosion interne établie $P(e_i)$

Il est proposé de retenir les barrières de sécurité suivantes, déjà envisagées dans les précédentes études.

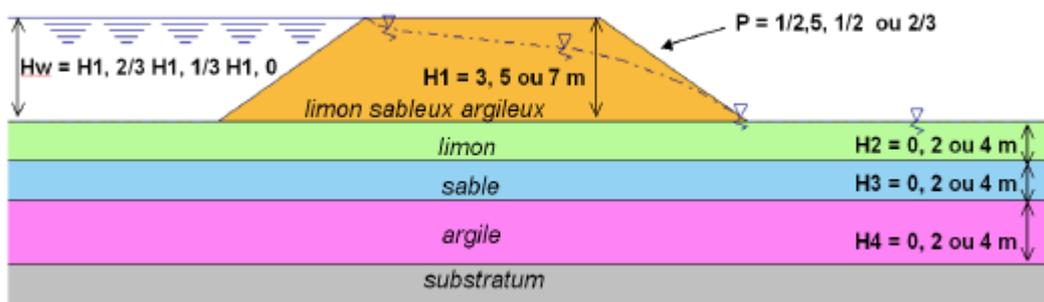
Renforcements en pied côté Val (facteur)		
Type de renforcement	Code	coef
Tapis drainant	TADR	0.1
Puits de décharge	PUI	0.01

Action du gestionnaire en épisode de Crue (facteur)		
Action du gestionnaire	Code	coef
Absence de surveillance et/ou organisation non adaptée	ASONA	1
Surveillance mais organisation non adaptée	SONA	0.9
Surveillance et Organisation Adaptée	SOA	0.5
Surveillance et Organisation Adaptée et Renforcée	SOAR	0.1

2.4 PHÉNOMÈNE (SCENARIO) DE GLISSEMENT DE TALUS

CARDigue estime le risque de glissement par l'intermédiaires d'abaques fonction de la charge hydraulique côté Loire et élaborés pour différentes configurations géométriques et lithologiques de la digue.

Pour mémoire les caractéristiques de sol retenus sont les suivantes :



sol n°	1	2	3	4
γ	18	18	18	18
Γ_{s1}	1	1	1	1
c	5	5	0	10
Γ_c	1.1	1.1	1.1	1.1
ϕ	30	27	32	25
Γ_ϕ	1.1	1.1	1.1	1.1

Tableau 6 : Caractéristiques de sol retenues pour la modélisation

Avec

- γ : le poids volumique des matériaux
- ϕ : l'angle de frottement
- c : la cohésion
- Γ_{s1} , Γ_c et Γ_ϕ sont des coefficients pondérateurs expliqués dans la partie I.4.b.iii

Les sondages et essais réalisés sur les 7 vals mettent en évidence des caractéristiques géotechniques plus « faibles » que celles prises en compte dans l'étude paramétrique précitée (il y a ainsi un risque de sous estimation de l'aléa de rupture par glissement). Un récapitulatif des sols rencontrés sur les 7 vals et de leurs paramètres mécaniques est fourni au § suivant.

L'utilisation de CARDigue a par ailleurs mis en évidence des effets de seuil important compte tenu du nombre limité de configuration géométrique. Le choix « par excès » de la configuration la plus proche du cas considéré va toutefois dans le sens de la sécurité.

En outre, la ligne de saturation prise en compte pour l'étude paramétrique n'est pas cohérente avec la nature de sol ; en toute rigueur il conviendrait de prendre en compte 3 lignes de saturation distinctes pour un corps de digue sableux, limoneux ou argileux.

Pour l'aléa relatif à la stabilité, dans l'attente de reprise de l'étude paramétrique, BRLi a retenu des facteurs correctifs pour tenir compte de la nature réelle du corps de digue par rapport à celui considéré pour l'étude paramétrique.

Facteur correcteur pour corps de digue argileux cohésif	CDAC	1.1
Corps de digue mixte (=sablo-argileux)	CDM	1
Facteur correcteur pour corps de digue argileux peu frottant	CDAPF	0.95
Facteur correcteur pour corps de digue sableux compact	CDSC	0.9
Facteur correcteur pour corps de digue sableux peu compact	CDSPC	0.85

CDAC : corps de digue argileux cohésif

CDM : corps de digue mixte

CDAPF : corps de digue argileux peu frottant

CDSC : corps de digue sableux compact

CDSPC : corps de digue sableux peu compact

Etude paramétrique retenue en fonction de la Configuration de la digue

Les reconnaissances géotechniques ont mis en évidence des natures et caractéristiques de sol différentes de celles prises en compte pour réaliser les modélisations et établir les formules de d'interpolation utilisées dans CARDigue (cf. §1.4.b de rapport de stage de fin d'étude : Géotechnique appliquée aux études de dangers des digues de la Loire et autres infrastructures).

Ce constat nous a conduit à nous interroger sur les limites des formules d'interpolation. D'une manière générale la démarche suivie, nous semble pertinente mais :

- les modélisations réalisées ne permettent pas de faire évoluer la nature et les caractéristiques du corps de digue (tandis qu'il est acté page 28, alinéa 10 et 11, « 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 »
- les modélisations réalisées ne permettent pas de tenir compte de la charge hydraulique appliquée ;
- la ligne de saturation retenue est extrêmement défavorable et ne tient pas compte de la nature éventuellement argileuse de l'ouvrage ;
- l'exploitation des résultats a mis en évidence des effets de seuil importants entre ouvrages de 3 ou 3.1m de haut par exemple.

Ces observations s'expliquent en partie par le nombre limité de modélisation effectuées (une centaine).

De fait, il est recommandé de réaliser des modélisations géotechniques afin de vous fournir les éléments permettant d'enrichir et d'améliorer la qualité et la pertinence des formules d'interpolation de CARDigue.

Sur la base de notre expérience locale, des données géotechniques recueillies lors des EDD et d'une manière générale de l'expérience de BRLi dans le domaine des expertises et maîtrise d'œuvre en digue et barrages en remblais, il est recommandé de réaliser des modélisations de la stabilité du talus côté val, sur les principes suivants :

- 6 corps de digue distincts et 5 type de sols de fondation

			gh (kN/m ³)	K (m/s)	F ⁱ (°)	C' (kPa)
Corps de digue :	Argileux	CDA1	18	1.00E-07	25	8
		CDA2	18	1.00E-07	25	4
	Limoneux	CDL1	18	1.00E-06	30	4
		CDL2	18	1.00E-06	25	0
	Sableux	CDS1	18	1.00E-05	30	0
		CDS2	18	1.00E-05	35	0
Fondation :	Argileuse	FOA1	18	1.00E-08	25	8
		FOL1	18	1.00E-07	25	4
	Limoneuse	FOL2	18	1.00E-06	30	4
		FOS1	18	1.00E-05	30	0
	Sableuse	FOS2	18	1.00E-04	35	0

- 4 pentes de talus côté val : 2.5H/1V, 2H/1V, 1.5H/1V, 1H/1V
- Des charges hydrauliques variables en fonction de la hauteur de l'ouvrage :
 - o Pour un ouvrage de 2m de haut : 0, 1 et 2m ;
 - o Pour un ouvrage de 3.5m de haut : 0, 1, 2.25 et 3.5m ;
 - o Pour un ouvrage de 5m de haut : 0, 1, 2.5, 3 et 4.5m ;
 - o Pour un ouvrage de 6.5m de haut : 0, 1, 2.5, 3, 4.5 et 6m.

Soit : 6 x 5 x 4 x 18 = 2160 modélisations.

Confortement :

A ce jour, un seul facteur favorable existe, la présence d'enrochement. Or :

- d'autres paramètres peuvent être pris en compte :
 - o les massifs filtrants (cf. ci-dessus) ;
 - o les palplanches ;
 - o les renforcement de type génie végétal ;
 - o les épaulements côté val en matériaux frottant ;
 - o la présence d'un parement maçonné.
- La notion de côté (val/Rivière) n'est pas prise en compte.

De fait, il est recommandé d'intégrer 2 tableaux complémentaires permettant de prendre en compte :

- Les facteurs favorables/défavorables côté Loire :
- Les facteurs favorables/défavorables côté Val.

Et de mettre à jour les modes de calcul de CARDigue.

2.5 PHÉNOMÈNE (SCENARIO) D'ÉROSION EXTERNE (AFFOUILLEMENT)

Principe général :

L'érosion externe est possible :

- au niveau du talus côté Loire ;
- au niveau du pied de levée côté Loire.

CARDigue prend uniquement en compte l'érosion en pied de levée. De ce fait, d'un point de vue géométrique, il a été retenu les facteurs aggravants au droit en pied de talus et sur le talus en partie basse.

A ce jour, il est recommandé de menée une réflexion sur l'état des parements en maçonnerie et l'influence potentielle concernant le risque d'érosion externe des talus en partie médiane ou haute.

Probabilité d'apparition :

Cette probabilité est évaluée en fonction de la seule la largeur du franc-bord (agression hors crue) et de la présence ou non de facteurs aggravants.

Concernant les sollicitations morphodynamiques, notamment les courants sécants, celles-ci peuvent avoir une incidence sur la localisation des brèches. De fait, il a été intégrée dans le cadre de la présente étude un facteur permettant de retranscrire les conclusions des études morphodynamique.

Facteurs aggravants		
Nature du facteur aggravant	Code	coef.
sollicitations morphodynamiques importantes	SMI	100
sollicitations morphodynamiques modérées	SMM	50
sollicitations morphodynamiques faibles	SMF	10

Le tableau page suivante récapitule les désordres pris en compte comme facteurs aggravants :

Attribut	code couleur	Saisie ou choix possible "Désordre_description"	Correspondance SIRS	Facteurs aggravants l'affouillement du pied côte Loire	Facteurs améliorants vis-à-vis Erosion externe côté Loire?
				TAD côté RIV (milieu et pied de digue)	PDI et bas TADI côté RIV
		leve topographique	AUTRE		
Canalisation/conduite		Canalisation Conduite (CAN)	CAN	OBSL	
		Canalisation Conduite Hors Service	CHS	OBSL	
OHT		OH traversant ouvert	OHT	OBSL	
		OH traversant avec marteliere	OHT	OBSL	
		OH traversant avec clapet anti-retour	OHT	OBSL	
Ouvrage encastré		ouvrage encastré	BAT	OBSL	
		Bâtiment	BAT	OBSL	
		Mur de soutènement	MUR	OBSL	
		Culée	OUV	OBSL	
Corps divers		Ecluse	OUV	OBSL	
		pylone	POT	OBSL	
		borne	BOR	OBSL	
		Barrière	COR	OBSL	
		banc	COR	OBSL+ERD	
		muret	CLO	OBSL	
		escalier	ESC	OBSL	
		route/piste	CNS	OBSL	
		cloture	CLO	OBSL	
		piezo	PZO	OBSL	
		Barbacane	BAR	OBSL	
Vegetation		ouvrage divers	COR	OBSL	
		regard	REG	OBSL	
		Corps divers n'affectant pas la structure	CNS	OBSL	
		Arbre (VLI)	VEG	OBSL	
		Arbre incline (VLI)	VEG	OBSL	
		Arbre Arrache (VLA)	VEG	OBSL+ERD	
		SOU (Souche)	VEG	OBSL	
		Souche VLI (SOUVLI)	VEG	OBSL	
		Souche VAB (SOUVAB)	VEG	OBSL	
		Vég Arbustive brousaille (VAB)	VEG	OBSL	
dégradation de surface		haie (VAB)	VEG	OBSL	
		Vég Ligneuse clairsemée (VLC)	VEG	OBSL	
		Vég Ligneuse généralisée (VLG)	VEG	OBSL	
		érosion ravinement	RAV	ERD	
		Erosion/affouillement	ERV	ERD	
		Piétinement	PIE	ERD	
Hors profil		Ornière	PAS	ERD	
		désordre divers	DIV	ERD	
		point bas banquette	PTBB		
		point bas crête	PTBC		
		crete bombée	CEB		
		interruption banquette	INB		
		Fossé	FOS	ERD	
		Depression, Etang, Zone d'emprunt	DEP		
		fosse en eau	FEE	ERD	
		depression, zone d'emprunt en eau	DEP		
Desordres geotechniques		remblai/recharge (ancienne breche?)	RCH		
		Terrassements/deblais	DEB	OBSL+ERD	
		Gliss/bascul (TV remaniee)	MVT	ERD	
		gliss basculement (bourelets)	MVT	ERD	
		Glissement	MVT	ERD	
		Gliss/bascul (tass/affai)	MVT	ERD	
		tassement affaissement	MVT?	ERD	
		Basculement	MVT	ERD	
		GRAND GLISSEMENT	MVT	ERD	
		Fontis	FON	ERD	
		Fuite	FU		
		indice de fuite	IFU		
Terriers		terrier D5	TRR	ERD	
		terrier D15	TRR	ERD	
		terrier D30	TRR	ERD	
Desordres structurels		Fissure	FIS		
		Basculement	MVT		
		Altera/corros	ALT		
		Déchaussement maçonnerie	DEC	DEC	
		Decollement	DEC		
		mauv contact ouv	DEC		
		Déjointement	DEJ		
		destruction	DES		
		Autre désordre structurel	DES		
		Devers defens	DES	ERD	
Renforcement		Eros ar defense	ERD		
		Enrochements libres	REN		oui
		massif filtrant	REN		
		gabions	REN		oui
		Palplanches	REN		oui
		genie vegetal	REN		oui
		Epaulement amont etanche	REN		
		Epaulement côté val sans massif drainant	REN		
		Parement maçonné côté TER	REN		
		Parement maçonné côté RIV	REN		oui
	deversoir	REN		oui	

- Coefficients affectant la probabilité de base -

Renforcement du pied de digue côté Loire			Facteurs aggravants			Durée de la crue (facteur)	
Nature de renforcement	Code	coef.	Nature du facteur aggravant	Code	coef.	Crue	coef.
Palplanches	PAL	1E-04	Fosse en Loire	FOL	50	Q20	1
Enrochements	ENR	0.001	Erosion du pied de digue (autre que celle du fleuve)	ERD	20	Q50	1
Fascine	FASC	0.1	Déchaussement de maçonneries	DEC	30	Q70	1
Parafouille	PARA	0.001	Obstacle, Point dur en pied de digue	OBSL	50	Q100	1
			Erosion et obstacle	OBSL+ERD	60	Q170	1
			Erosion longitudinale due au fleuve	ERF	100	Q200	1
			sollicitations morphodynamiques importantes	SMI	100	Q500	1
			sollicitations morphodynamiques modérées	SMM	50	Q1000	1
			sollicitations morphodynamiques faibles	SMF	10		

Probabilité de rupture :

Par homogénéité avec les études d'ores et déjà réalisée, les dispositions présentées ont été reconduites dans le cadre de notre étude. Ce point n'appelle donc pas de remarques complémentaires.

Durée de la crue

A ce jour la durée de la crue n'intervient pas lors de la détermination de l'aléa d'apparition. Il est recommandée de mener une réflexion sur ce point.

2.6 PHÉNOMÈNE (SCENARIO) DE SOULÈVEMENT DE FONDATION COTE VAL

Probabilité d'apparition :

Le calcul actuel de la longueur L1 ne tient pas compte de la proximité de la digue à la Loire. Or L1 est nécessairement inférieure à la longueur de franc-bord L0 et la surestimation de L1 conduit à sous estimer les sous pressions sous la couche peu perméable et donc le risque de soulèvement hydraulique.

De fait, il est proposé de retenir comme dans les études précédentes $L1_{\text{corrigée}} = \min(L0, L1_{\text{initiale}})$.

Par ailleurs, en cas de remous côté val, sa cote est prise en compte dans la charge hydraulique utilisée pour calculer la sous pression sous l'assise peu perméable : $H = Z_{\text{Loire}} - Z_{\text{remous}}$ et non $H = Z_{\text{Loire}} - Z_6$.

A noter que tel que le prévoit CARDigue, lorsque des données précises de poids volumique et de perméabilité sont disponibles, celles-ci ont été substituée au valeur par défaut.

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

Probabilité de rupture :

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. La probabilité de rupture due à un soulèvement hydraulique est donc ramené à un recalcul de l'aléa de rupture par érosion interne. Pour ce recalcul, on applique une modification sur le critère de Bligh (brut) 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.

$$\text{Bligh Soul Hydrau} = \text{Bligh brut} \times$$

0.8