



HAL
open science

Diagnostic continu et analyse géo-localisée du risque appliqués aux digues du petit Rhône

P. Soulat, A. Bonnafé, J.G. Moulin, F. Montarros, T. Mallet, A.L. Martin, R.
Tourment

► To cite this version:

P. Soulat, A. Bonnafé, J.G. Moulin, F. Montarros, T. Mallet, et al.. Diagnostic continu et analyse géo-localisée du risque appliqués aux digues du petit Rhône. Dignes maritimes et fluviales de protection contre les submersions - 2ème colloque national - Dignes2013, Jun 2013, Aix-en-Provence, France. pp.202-208. hal-01122504

HAL Id: hal-01122504

<https://hal.science/hal-01122504>

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.

Diagnostic continu et analyse géo-localisée du risque appliqués aux digues du petit Rhône

Linear fine discretization diagnostic method applied to Rhône dikes

P. Soulat¹, A. Bonnafé¹, JG. Moulin¹, F. Montarros¹, T. Mallet², AL. Martin², R. Tourment³

¹Safege Ingénieurs Conseils, Aix en Provence, patrick.soulat@safège.fr

²Symadrem, Arles, thibaut.mallet@symadrem.fr

³Irstea, Aix-en-Provence, remy.tourment@irstea.fr

Résumé

L'opération de « Renforcement des digues du Petit Rhône » a pour objectif de construire des digues capables de résister à la rupture jusqu'à la crue millénaire du Rhône.

Dans ce contexte, le SYMADREM, maître d'Ouvrage, assisté d'un collègue d'experts comprenant Irstea, a confié à SAFEGE une mission d'études de diagnostic et de sécurisation des digues existantes du Petit Rhône, sur un tronçon de 15 km, situé en aval de l'écluse de Saint Gilles, dans le département du Gard.

Dans le cadre de sa mission, SAFEGE a mis en place une méthode de diagnostic des digues par une discrétisation détaillée du linéaire qui permet d'analyser, sur un tableur, l'ensemble des paramètres (géométrie des digues et du ségonal, hauteur, niveau des eaux, géotechnique, géophysique...) susceptibles d'influer sur les aléas de rupture auxquels la digue est soumise (surverse, glissement, érosion interne, affouillement externe) et d'évaluer les risques de rupture associés.

Cette modélisation détaillée a pu être réalisée par l'ampleur des données mises à disposition (modèle numérique de terrain, bathymétrie, relevés géophysiques et géotechniques, lignes d'eau extraites de modèle 2D, étude morphodynamique...). Pour le cas particulier du modèle mécanique, la correspondance entre sondages géotechniques et reconnaissances géophysiques en continu a été analysée. Un taux de correspondance a été défini et a permis d'établir un modèle « géotechnique » discrétisé sur la base des résultats de la géophysique.

Cette méthode, qui discrétise le linéaire de digue en tronçons élémentaires (800 tronçons de 20 m pour 15 km de digue) au lieu du découpage habituel en tronçons homogènes, a pour **avantages** une caractérisation systématique des risques de ruptures la compilation de tous les paramètres techniques dans un outil unique, outil utilisable par l'exploitant afin d'entretenir et surveiller l'ouvrage plus efficacement.

L'outil trouve cependant ses limites dans le manque de précision des interprétations géotechniques issues des

reconnaisances géophysiques et dans le manque de précision des calculs des risques de ruptures basés sur des formules empiriques ou simplifiées.

Dans l'article, la méthode utilisée est décrite et comparée à d'autres approches, dont une méthodologie de diagnostic de digues de protection développée au travers de différents projets de recherche (FloodProbe, ILH, DIGSURE).

Abstract

The purpose of the « petit Rhône » dike reinforcement project is to build dikes which can resist to a millennium flood of the "Rhône" river.

SYMADREM, dike maintenance operator, assisted by experts committee including Irstea, assigned a dike diagnostic review mission to SAFEGE and the reinforcement design of the existing dikes, on a 15 km section, downstream of Saint-Gilles lock.

During this mission, SAFEGE set up a dike diagnostic method using a linear fine discretization for analysing, on a spreadsheet, parameters that take place in dike failure mechanisms (geometry of the dike, height, water level, geotechnical and geophysical parameters,...), and for assessing different failure risks (overflow, landslide, piping, external erosion).

The discretization has been possible thanks to the important quantity of available data (Digital Terrain Model, bathymetry, geophysical and geotechnical measurements, water levels, morphodynamic behaviour study...). In the particular case of mechanical model, correspondence between geophysical and geotechnical soil tests have been analysed. A rate has been defined and used to set up a geotechnical model based on geophysical results.

The method benefits are: its accuracy (800 points on a 15 km section) compared with the usual homogeneous section method, the compilation of all technical parameters in a single spreadsheet, and the possibility for operators to use this tool during dike existence and to make surveillance program easier. The limitations of the method come from the lack of accuracy of the geophysical results compared with

geotechnical soil tests and from lack of accuracy of failure risk calculation compared with finite element analysis.

All along this article, the method is compared with other approaches developed through different research projects (FloodProbe, ILH, DIGSURE).

Présentation de l'opération

Suite à la crue majeure du Rhône des 3 et 4 décembre 2003, qui a provoqué 4 brèches dans les ouvrages de protection du Delta du Rhône, causant l'inondation de plus de 12 000 personnes et générant un montant de dommages de 700 millions d'euros, les pouvoirs publics ont engagé un vaste plan de lutte contre les inondations, intitulé « Plan Rhône ».

C'est dans ce contexte que le SYMADREM s'est porté Maître d'Ouvrage des opérations du Plan Rhône sur son périmètre de compétences.

L'opération de « Renforcement et décorsetage limité des digues du Petit Rhône » est une des actions prioritaires définies dans le schéma de gestion des inondations du Rhône aval établi par l'Etat.

Compte tenu de la consistance des études de diagnostic et de conception à réaliser, un découpage en 9 lots a été opéré par le SYMADREM :

- ✓ Lot 1 : Etude morphodynamique et étude hydraulique - Etude de dangers - Dossiers réglementaires ;
- ✓ Lots 2 à 7 : Etudes Préliminaires et d'Avant-projets pour le renforcement et le décorsetage limité des digues en rive gauche et rive droite du Petit Rhône, divisées en 6 secteurs géographiques ;
- ✓ Lot 8 : Etude environnementale (inventaire faune/flore et étude d'impact) ;
- ✓ Lot 9 : Etude d'enjeux dans les plaines d'inondation, avec une analyse coût bénéfice des ouvrages projetés.

Titulaire du lot 3, qui se caractérise par un linéaire important (15 km), SAFEGE a établi l'outil de diagnostic présenté dans cet article. Cet outil s'est construit en exploitant l'ensemble des données disponibles : résultats des reconnaissances géotechniques et géophysiques et des données disponibles: levés bathymétriques, Modèle Numérique de Terrain, étude morphodynamique, étude hydraulique.... Il a pour objectif de caractériser, suivant une décomposition de la digue en tronçons élémentaires de 20 mètres les différents modes de rupture auxquels la digue est soumise (surverse, érosion interne, glissement et affouillement externe). L'analyse des risques a été effectuée pour 4 scénarios de crue (crue de 1994, d'occurrence 50 ans ; crue de 2003 d'occurrence 100 ans ; crue de 1856 d'occurrence entre 100 et 500 ans ; crue d'occurrence 1000 ans)

Présentation du « crible »

Dans le cadre de cette étude, SAFEGE a mis en place une méthode de diagnostic par une discrétisation détaillée du linéaire de digue qui permet d'analyser sur un tableur l'ensemble des paramètres (géométrie de la digue et de son environnement, hauteur, niveau des eaux...) susceptibles d'influer sur les aléas de rupture auxquels la digue est sujette.

Les principales difficultés pour la réalisation du diagnostic des 15 km de digues sont l'étendue spatiale du système et le caractère hétérogène d'un ouvrage séculaire ayant subi de multiples changements au cours du temps (rechargements, brèches, réparations, rehaussement ...). Ces considérations contribuent à rendre l'analyse des risques par l'expertise hasardeuse, comme dans tous les cas de diagnostics de digues anciennes de protection contre les crues et les submersions.

Pour pallier à ces difficultés, il a été choisi de réaliser un modèle dans lequel les paramètres physiques des composants de l'ouvrage et de son environnement sont analysés de la façon la plus exhaustive possible. En ce sens, l'approche rejoint et valide l'approche développée dans le projet de recherches Européen FloodProBE, qui a défini une méthodologie générale de diagnostic de digues centrée sur les données et leur traitement pour obtenir le résultat d'un diagnostic.

Ainsi, la granularité du système étudié conduit à décomposer l'ouvrage « digue » en une somme de tronçons élémentaires.

Le modèle a été dénommé « crible » afin d'insister sur la dimension discrète du modèle et la faculté de ce dernier à analyser la stabilité de l'ouvrage selon plusieurs critères.

Le *crible* permet d'évaluer :

- un facteur de sécurité pour les aléas glissement et érosion interne sur chaque tronçon élémentaire pour les différentes occurrences de crue,
- une probabilité par mécanisme de rupture, par aléa par tronçon élémentaire par occurrence de crue (4 aléas, 800 tronçons, 4 crues),
- une probabilité globale de rupture pour chaque tronçon élémentaire pour chaque crue (800 tronçons pour 4 crues),
- une probabilité qu'il y ait au moins une rupture sur le linéaire considéré par crue (4 crues)
- une probabilité globale de rupture sur l'ensemble du linéaire, traduisible en occurrence de rupture.

L'évaluation des aléas de rupture a été réalisée sous forme probabiliste et par la méthode d'analyse fiabiliste de la sûreté de fonctionnement (méthode AMDE) couplée à la méthode par expertise.

Outre la faculté du modèle final à fournir une probabilité d'occurrence d'une défaillance sur l'ouvrage, le *crible* permet de localiser la défaillance avec la précision donnée au maillage du modèle physique (liée à la précision des

données).

Le *crible* permet également de synthétiser l'ensemble des données disponibles (géométriques, topographique, géotechniques, géophysique, hydrauliques) et pourra être utilisé par l'exploitant pour la surveillance et l'entretien de la digue.

La difficulté majeure réside dans la représentativité des valeurs moyennes données aux paramètres internes affectés au droit de chaque nœud du modèle (représentatif d'un tronçon de la digue) – ces mêmes paramètres internes étant déterminant dans l'évaluation de la résistance de l'ouvrage.

Géométrie

La première étape pour la constitution du *crible* consiste à exploiter les données topographiques (modèle numérique de terrain en 3D) à intervalle régulier sur l'ensemble du linéaire de la digue. Dans notre cas les 16,2km de digue ont été discrétisés tous les 20-m.

Les paramètres géométriques (ou topographiques) sont disponibles avec une précision pluri-centimétrique.

Le choix de l'intervalle dépend de la précision du levé topographique disponible. Dans notre cas la densité des points topographiques est de 20 m, ce qui nous a amenés à découper le modèle en tronçons d'un intervalle équivalent afin d'exploiter au maximum les données disponibles. Cela montre que le *crible* est d'autant plus intéressant que les données sur lesquelles il se base sont étoffées.

Les coordonnées (x,y,z) des points permettant de caractériser la coupe en travers de la digue sont exportées à partir du modèle numérique de terrain vers un tableur Excel.

Les caractéristiques géométriques de chaque section en travers de la digue sont ensuite calculées de façon automatique par le *crible*.

Ligne d'eau

La deuxième étape consiste à intégrer les lignes d'eau et les vitesses des scénarios de crues considérées dans le *crible*.

Géotechnique et géophysique

La troisième étape consiste à intégrer les conditions géotechniques sur chaque tronçon élémentaire représentatif. Cette étape est la plus délicate.

Les paramètres hydro-géotechniques sont difficiles à retranscrire de manière continue dans le modèle physique. En effet, même si les sondages par prélèvement donnent des valeurs relativement fiables, ils ont l'inconvénient d'être ponctuels et donc insuffisamment représentatifs de l'ouvrage dès qu'on s'éloigne de quelques mètres (voire quelques décimètres) du point de prélèvement. Par ailleurs, les travaux de reconnaissances géophysiques ont bien mis en évidence le caractère très hétérogène des remblais et fondations existant. Néanmoins, la comparaison des panneaux de résistivités électriques et les sondages in situ (CPT et carottés) a révélé un taux de correspondance positive d'environ 75%, c'est-à-dire que dans 75% des cas les sondages CPT et les sondages

carottés confirment en nature et en altimétrie les sols reconnus par géophysique électrique.

Nous sommes donc partis du principe que les caractéristiques géophysiques relevées en continu étaient suffisantes pour caractériser en continu le modèle physique du point vue géotechnique.

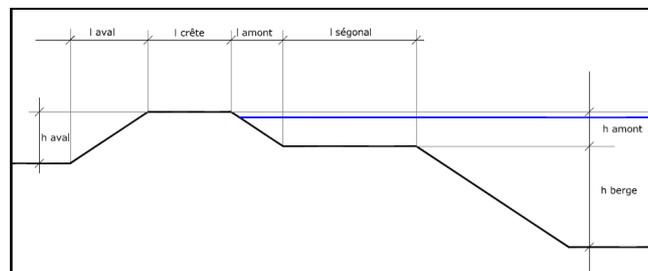


FIGURE 1: CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUE IMPORTEES DU MNT

Dès lors il s'agissait d'effectuer une lecture minutieuse des profils électriques et de synthétiser la lecture en une succession de modèles de sol (codés) en fonction des couleurs des couches identifiées. Cette succession de modèles de sol codés pouvaient ensuite être réinjectée dans le modèle.

Outre l'imprécision propre aux sondages géophysiques, la méthode de retranscription des données géophysiques est simplificatrice puisque d'un profil géophysique continu nous étions obligés de répartir les données selon des classes synthétiques. Des approximations sont donc commises. Néanmoins les tendances géotechniques sont respectées, et, si l'on résume l'ouvrage digue à son remblai, son assise et ses fondations, cette granularité de l'ouvrage « digue élémentaire » s'avère bien plus fine que l'assimilation de l'ouvrage « digue » à plusieurs tronçons homogènes.

Le *crible* indique pour chaque profil métrique (tous les 20 m), la tendance géotechnique lue à partir des panneaux électriques, eux-mêmes étalonnés à partir des sondages in situ (CPT, carottés).

Chaque profil du *crible* est ainsi codifié par 3 lettres de gauche à droite :

- ✓ 1^{ère} lettre : Corps de digue (remblai)
- ✓ 2^{ème} lettre : Sol de fondation, soubassement direct (0 à -5m)
- ✓ 3^{ème} lettre : Sous-sol (-5 à -10m)

TABLEAU N°1 : CODIFICATION DES TENDANCES GEOTECHNIQUES A LA LECTURE DES PANNEAUX ELECTRIQUES

Code	Couleur correspondante sur panneau électrique	Sol en place interprété
B	Bleu	Sables fins à moyens
V	Vert	Sables fins limoneux

		proches sables
J	Jaune, orange	Sables fins limoneux proches limons
R	Rouge, violet	Limons argileux

Les codes de 3 lettres à partir des 4 lettres G, B, V J entraînant un trop grand nombre de profils types possibles rencontrés tout au long des 16 km de digues, ces profils ont été encore agrégés autour de 4 grandes familles essentielles :

- Les profils nommés « FF » : il s'agit d'un remblai de sols fins posé sur des sols fins plutôt imperméables ; ce cas de figure comprend également les profils pour lesquels des sols plus grossiers de type B sont retrouvés plus en profondeur,
- Les profils nommés « GF » : il s'agit d'un remblai de sols plus grossiers (sables) posé sur des sols fins,
- Les profils nommés « FG » : il s'agit d'un remblai de sols fins posé sur des sols plus grossiers (sables), y compris les cas pour lesquels des sols plus fins sont retrouvés à plus grande profondeur,
- Les profils nommés « GG » : il s'agit d'un remblai de sols sableux posé sur des sols grossiers.

F : représente les matériaux fins présentant une cohésion (limons, argile,...)

G : représente les matériaux sans cohésion (sables, graves,...)

En résumé, la difficulté pour l'ingénieur résidait dans sa faculté à donner un caractère géotechnique à chaque classe de résistivité électrique, puis à faire une lecture fidèle des panneaux électriques pour enfin retranscrire la série de codes de 3 lettres en série de codes de 2 lettres. En respectant minutieusement ces étapes, l'œil de l'ingénieur pénètre progressivement la chaîne structurelle du système digue linéaire en retranscrivant celle-ci en une série de codes qui soit la plus représentative possible du système dans son ensemble. En outre, cette analyse exhaustive des données permet de relever d'éventuelles singularités de l'ouvrage et de son environnement.

Analyse des aléas de rupture

La quatrième étape consiste à estimer les 4 aléas de rupture retenus (surverse, érosion interne, glissement et affouillement externe) pour les 4 scénarios de crues considérés, soit à l'aide de formules mathématiques (à base de modèles physiques ou empiriques) disponibles dans la littérature, soit au moyen d'éléments qualitatifs (à dire d'expert), ce qui encore une fois correspond au cadre de méthodologie de diagnostic développé dans FloodProBE).

Cette étape s'accompagne de tests de sensibilité des paramètres, ainsi que d'un étalonnage sur des événements connus.

La difficulté majeure réside dans la manière de calculer les facteurs de sécurité au droit de chaque ouvrage « digue élémentaire ». Comme il est impossible de réaliser un modèle numérique 2D au droit de chaque profil en travers, notre choix s'est tourné vers la sélection des équations mathématiques dans lesquelles le modèle 2D est agrégé et pouvant régir à elles seules les phénomènes internes susceptibles de dégrader chacun des composants de chacun des ouvrages « digues élémentaires ».

Le calcul automatique nécessite une formulation simple pour l'estimation du facteur de sécurité pour chacun des scénarios. Nous avons donc utilisé des formules empiriques qui peuvent être critiquables, mais qui permettent d'évaluer les tendances de chaque aléa en fonction des différents paramètres connus et aussi du retour d'expérience.

Les probabilités de ruptures, par crue, sont évaluées à partir de facteurs de sécurité. Pour évaluer une probabilité annuelle de rupture de la digue, les probabilités de rupture par crue ont été croisées avec les probabilités de survenance des crues.

La classification du risque qui a été retenue est présentée dans le tableau ci-dessous :

TABLEAU N°2 : CLASSIFICATION DU RISQUE

Quasi certain	$> 2.10^{-2}$
Très fort	1.10^{-2} à 2.10^{-2}
Fort	1.10^{-3} à 1.10^{-2}
Moyen	1.10^{-4} à 1.10^{-3}
Faible	1.10^{-5} à 1.10^{-4}
Très faible	1.10^{-6} à 1.10^{-5}
Quasi nul	$< 1.10^{-6}$

Erosion Interne

Ce critère rend compte du risque d'érosion interne de type régressive, dans une couche de sable perméable sous un remblai plus imperméable. La méthode consiste à déterminer une hauteur d'eau critique au delà de laquelle le risque d'érosion interne est avéré.

Le *crible* est paramétré pour calculer la hauteur critique selon Seillmeijer lorsqu'une des couches de la fondation ou de l'assise est classée G (matériau sans cohésion de type sable, grave...).

Un facteur de sécurité vis à vis de l'aléa érosion interne est calculé, à chaque profil, par le *crible* en comparant la hauteur critique calculée, à la hauteur d'eau de la crue considérée.

La sensibilité du paramètre D (épaisseur de la couche perméable) a été évaluée sur la variabilité du résultat :

- multiplier par 4 l'épaisseur D de la couche de sable (passer de 1 m à 4 m) diminue de 30% cette hauteur critique (aggravation),
- à épaisseur D égale, diminuer la perméabilité k d'un rapport de 10 (de 10^{-5} à 10^{-6} m/s par exemple) revient à multiplier par 2 la hauteur critique

(amélioration).

Le modèle a été « étalonné » sur une rupture de digue qui a eu lieu en novembre 2002, au droit du Mas de Claire Farine. Au cours de l'évènement, l'érosion interne, sans présence de facteur aggravant (terriers ou canalisations traversantes) a été avérée selon les témoignages, à la fois au droit de la brèche elle-même, et auparavant 20 m en amont.

La charge hydraulique lors de la crue de 2002 est estimée à 3.35 m au droit de la brèche. Les sondages révèlent dans cette zone, une frange sableuse de 1,5 mètre maximum dans les sols de fondation.

D'après l'enquête, les pieds amont et aval de la digue voyaient une végétation anormale, ce qui est néanmoins un facteur aggravant.

Une charge hydraulique critique de 3.34 m est déterminée par le « crible » soit une charge d'eau équivalente à celle qui a sollicité la digue lors du sinistre.

Le facteur de sécurité calculé pour l'érosion interne est ensuite ramené à une probabilité de rupture, selon le tableau n°2 ci-après :

TABLEAU N°2 : PROBABILITES ASSOCIEES AU FACTEURS DE SECURITE

Facteur de sécurité	Probabilité associée
< 0.5	1
0.5 à 1	1 à 0,5
1.0 à 1.1	0.5 à 0.1
1.1 à 1.2	0.1 à 0.05
1.2 à 1.3	0.05 à 0.001
1.3 à 1.4	0.01 à 0.001
1.4 à 1.5	0.001 à 0.0001
> 1.5	0.0001

Afin de rendre le résultat de l'évaluation des risques de rupture plus visuel, une cartographie de l'aléa de rupture a été réalisée en caractérisant chaque gamme de risque par une couleur.

Glissement

Concernant l'aléa de glissement de talus, une expression très simplifiée de la méthode de Fellenius (glissement plan le long de la ligne de charge) a été utilisée pour déterminer un facteur de sécurité.

Une pondération a été ajoutée pour tenir compte des pentes de talus de la digue et de la berge et de la largeur du ségonal.

Notons que :

- 4% du linéaire présente une pente de talus aval supérieure à 3H/2V.
- 5% du linéaire présente une pente de talus amont supérieure à 3H/2V.

Le modèle, comme l'historique de l'ouvrage, montre que la digue est peu sensible au glissement d'ensemble.

L'analyse du glissement, réalisée au travers du *crible* fournit un facteur de sécurité à chaque profil. La probabilité de rupture est déduite du facteur de sécurité de la même façon que pour l'érosion interne.

Affouillement externe

L'aléa érosion externe est avéré dès les crues mobilisant les berges, c'est-à-dire pour des occurrences fréquentes, d'ordre annuel ou biannuel. Aucune donnée hydraulique n'étant disponible pour ces évènements, cet aléa a été caractérisé par une approche plus qualitative que quantitative, prenant en compte les divers éléments aggravant le risque d'érosion externe.

Les paramètres influant le phénomène d'érosion externe sont :

- la longueur de ségonal ;
- la nature du sol ;
- l'orientation des courants, dépendant du positionnement de la digue par rapport au cours d'eau (en intrados, en extrados, ...);
- les singularités géométriques (elles s'observent sur le terrain et traduisent les évolutions morphologiques ; une fosse comme une zone d'atterrissement en sont des exemples).

Nous avons considéré que la longueur du ségonal est le paramètre prépondérant concernant l'affouillement externe. En effet, l'évolution morphologique du lit est souvent marquée par une réduction progressive du ségonal aux abords des digues les plus sujettes à l'affouillement externe. En outre, au vu de la forme relativement constante de la section du lit mineur du Petit Rhône, plus la longueur de ségonal est grande, moins les vitesses sont importantes, ce qui diminue le risque d'érosion.

La longueur de ségonal est donc associée à une probabilité, puis corrigée par deux coefficients multiplicatifs afin de prendre en compte les autres paramètres influant l'érosion externe.

L'estimation de la probabilité de rupture par érosion progressive de la digue consécutivement à l'affouillement externe du ségonal pour une crue est présentée dans le tableau ci-après:

TABLEAU N°3 : PROBABILITES DE RUPTURE PAR EROSION EXTERNE DU SEGONAL

Longueur de ségonal Ls	Probabilité de rupture sans facteur aggravant
Ls > 10 m	< à 1/10000
10 m > Ls > 5 m	1/100 à 1/1000
5 m > Ls	1/100

Deux paramètres de requalification (Nsol et Nsit) ont été définis.

Afin d'exploiter les possibilités du *crible* et d'observer l'effet de l'accumulation de paramètres aggravants, l'influence des différents paramètres est traduite par les lois mathématiques arbitraires présentées ci-après.

Nature des matériaux (Nsol) :

Les sols fins (F) étant cohésifs, ils s'érodent moins facilement que les sols non cohésifs (G). Ceci est valable pour le remblai comme pour l'assise. Ainsi, un remblai et une assise constitués de matériaux fins et cohésifs s'érodent moins facilement qu'un remblai de matériaux fins sur des fondations plus grossières. Ce paramètre a été pris en compte par le moyen d'un facteur correctif tenant compte de la nature du sol.

TABLEAU N°4 : PARAMETRE DE REQUALIFICATION (NATURE DU SOL)

Critère Nsol	Paramètre de requalification Nsol	Définition
	0.1	Dégradation faible
	0.5	Dégradation moyenne
	1	Dégradation forte

Phénomènes d'érosion ou d'accumulation (Nsit) :

Ce paramètre renseigne sur la tendance à l'érosion, notamment au regard des observations de terrains et des dispositions intrados/extrados ou restrictions de sections (fonctions des vitesses d'attaques des écoulements en crues).

TABLEAU N°5: PARAMETRE DE REQUALIFICATION (EROSION-ACCUMULATION)

	Paramètre requalification Nsit
Accumulation	0.01
Mixte : profil escalier	10
Érosion berge basse	100
Erosion berge haute	100

Il s'agit du paramètre le plus qualitatif car, pour le phénomène d'érosion externe, le retour d'expérience (acquis par l'observation du terrain) renseigne mieux que des approches mathématiques. Le paramètre de requalification est évalué selon le type d'érosion observé.

La probabilité est ainsi définie pour chaque profil selon l'expression suivante :

Probabilité de rupture = Nsol x Nsit x Probabilité de rupture sans facteurs aggravants.

Surverse

Dans le cas de la surverse, compte-tenu :

- des linéaires largement surversants dès les faibles occurrences (période de retour de la crue : 50 ans) ;
- de la nature des crêtes et parement aval des remblais ;
- de l'historique des brèches (surverse très probable lors de l'événement de 2003),

Il a été considéré que toute surverse entraîne une rupture de l'ouvrage : la probabilité de rupture est donc égale à 1.

La probabilité de rupture de la digue par effet de surverse dépend directement :

- de l'occurrence de la crue (et donc de la ligne d'eau)
- Des seuils de revanche de sécurité classiquement admis sur les endiguements
- Des surcotes dues au vent définies par le calcul du Fetch effectif (pour les secteurs sensibles au vent de Sud-Est) ;
- De la précision du modèle hydraulique (calage) et de sa sensibilité.

TABLEAU N°6 : PROBABILITES DE RUPTURE PAR SURVERSE

Critère revanche R	Probabilité de rupture
R > 1 m	< 1/1000
1 > R > 0.5	1/100 à 1/1000
0.5 > R > 0.3	1/2 à 1/100
0.3 > R > 0	1 à 1/2
R < 0	1

Un outil de suivi de l'ouvrage

L'objectif premier du *crible* est le diagnostic de la digue afin d'en évaluer les risques de ruptures.

Cependant, il pourra aussi être utilisé par l'exploitant de la digue pour mieux connaître son ouvrage. En effet, le *crible* constitue une base de données permettant d'accéder rapidement aux principaux paramètres géométrique et géotechnique de l'ouvrage en un point donné (pas de 20m).

A titre d'exemple, l'exploitant pourra en quelques minutes, retrouver les paramètres tels que : la hauteur d'eau pour les 4 crues de références, largeur en crête, hauteur de la digue, pente des talus, largeur du ségonal, la tendance géotechnique de la fondation et de la digue...

En un point donné, l'outil permet aussi de localiser le sondage géotechnique le plus proche, qui a été réalisé.

Les profils considérés dans le *crible* sont repérés en x, y, z ainsi que en point kilométriques (selon le système de PK en place sur le Rhône), ce qui permet de localiser facilement un point d'intérêt.

Le caractère continu de l'outil proposé réside :

- ✓ dans la discrétisation en tronçons élémentaires, par rapport au grand linéaire de l'ouvrage,
- ✓ dans la possibilité, pour l'exploitant, de faire vivre l'outil de façon continue dans le temps, en l'enrichissant des données et autres reconnaissances recueillies au fur et à mesure de la vie de l'ouvrage,

Les limites de l'outil *crible* résident dans la moindre précision des sondages géophysiques par rapport aux essais géotechniques (carottés et essais au pénétromètre statique), et la moindre précision des calculs de risques de ruptures par rapport à une modélisation aux éléments finis.

En effet, les reconnaissances géophysiques ne permettent pas d'investiguer la couche superficielle (sur une épaisseur qui est fonction de l'écartement des électrodes dans le cas de panneaux électriques). Il convient donc d'adapter les reconnaissances géophysiques au degré de précision souhaité pour le diagnostic.

Les résultats obtenus avec l'outil *crible* permettent d'analyser la tendance et la variation du risque d'un tronçon à l'autre de la digue et non pas de donner une estimation précise du risque de rupture en un point donné.

Conclusion

L'intérêt du *crible* réside dans son caractère systématique de détermination des risques de ruptures après discrétisation du linéaire en tronçons élémentaires (800 tronçons de 20 m dans le présent cas), par rapport au découpage habituel en tronçons homogènes définis a priori (avant le diagnostic), la compilation de tous les paramètres techniques dans un seul et

même graphique, ainsi que la possibilité de continuer à utiliser cet outil durant la vie de l'ouvrage pour faciliter sa surveillance. Néanmoins un découpage en tronçons homogènes défini APRES la collecte des données, sur la base d'une segmentation dynamique permettrait d'arriver au même résultat que le *crible*, mais en nécessitant l'utilisation d'un outil spécifique, tel celui établi par l'association de SIRS Dignes avec le projet DIGSURE.

Le *crible* offre à l'ingénieur et l'exploitant un outil de détermination automatique et systématique du risque de rupture géo localisé tout le long de la digue.

L'interface permet à son utilisateur de visualiser graphiquement et directement le niveau de risque selon un code couleur et pour différents modes de rupture.

Le travail de l'utilisateur consiste préalablement à collecter et interpréter les données topographiques, bathymétriques, hydrauliques, géotechniques et géophysiques.

Du niveau de continuité et de précision des différents relevés dépendra les performances du *crible*. Ainsi le développement d'un tel outil de criblage et de géolocalisation du risque va de pair avec les développements technologiques des méthodes de relevés topographiques et géophysiques à grand rendement en termes d'acquisition de données.

L'outil pourra être utilisé par l'exploitant de la digue pour accéder rapidement aux données caractérisant l'ouvrage et en améliorer sa connaissance, facilitant ainsi la surveillance et la gestion de l'entretien.