Document generated on 10/11/2024 11:07 p.m.

Revue des sciences de l'eau
Journal of Water Science

Une contribution expérimentale à l'étude de l'érosion d'une digue par submersion et son analyse
An experimental contribution to the study of the erosion of a dike by overtopping

N. E. Zerrouk and C. Marche

Volume 18, Number 3, 2005

URI: https://id.erudit.org/iderudit/705564ar
DOI: https://doi.org/10.7202/705564ar

See table of contents

Publisher(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

0992-7158 (print)
1718-8598 (digital)

Explore this journal

Cite this article

Zerrouk, N. E. & Marche, C. (2005). Une contribution expérimentale à l'étude de l'érosion d'une digue par submersion et son analyse. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, *18*(3), 381–401. https://doi.org/10.7202/705564ar

Article abstract

It has been recognized for several decades that the reliability of forecasts for flooding downstream from a dam failure depends not only on the local topography but also on the failure mode of the dam, specifically on the breach outflow hydrograph. It is therefore of primary importance that the mechanism of formation of the breach is anticipated with an acceptable degree of accuracy. Several approaches to model this phenomenon have been reported in the literature, but the results from these models do not appear to be reliable when the predicted values are compared with those deduced from observations carried out on real or simulated dam failures. Each failure of a dam generates a particular form of hydrograph that will have a specific impact on the affected population. The most frequent cause of failure of earthfill and rockfill dams is by overtopping of the crest, although in rockfill dams initial piping failure followed by partial collapse of the crest resulting in breach initiation has been observed. Once initiation of a breach has occurred, continuous development until complete failure occurs is virtually assured if sufficient energy from the reservoir volume is available to sustain the breaching process. For this reason, breach formation is recognized as one of the essential factors in the modeling of a dambreak.

To anticipate the real hazard from dam overtopping, a predictive model for breach initiation and development would be extremely useful. Currently, the majority of dam safety studies assume a standard scenario for the breach formation, development and final failure based on some norms established as a result of regression analyses on some actual failures. Modeling of the breach and therefore prediction of the outflow hydrograph do not take into account specific local data on the construction techniques and soil properties, mainly because currently available methods that attempt to incorporate these factors still do not provide reliable results. To contribute to the understanding of the mechanism of breach formation and to determine the details of the process, a test of erosion failure was performed and documented at the Hydrodynamics Laboratory of the École Polytechnique de Montreal. This test, coupled with the subsequent development of a numerical model incorporating the interactions of the hydraulics-erosion process, has formed the basis of a doctoral dissertation, the principal objective being to reproduce as accurately as possible the mechanisms involved in the formation of a breach (ZERROUK, 2004; ZERROUK et MARCHE, 2004).

This paper describes a test carried out under controlled laboratory conditions on a homogeneous dam composed of moraine, a material used in the construction of real dams with an extended non-cohesive granulometry. The test simulated the initiation and the start of the failure by dike overtopping known as a " fuse plug " i.e. a dike that, during an event of exceptional rain or extreme inflow, would be used to limit the volume retained in the reservoir. The test, carried out on a laboratory scale but extrapolated to prototype dimensions without similarity considerations, nevertheless allowed identification of the various mechanisms that intervene in the breaching process.

The results obtained on this experimental dike showed that the mechanism of formation and erosion of a breach is quite different from the mechanisms assumed in standard methods of computation of the rupture. Current models give undue weight to a single failure mechanism, independent of lateral slope instability, surface erosion or shear stress energy. The laboratory test however indicated the importance of turbulence and erosion in certain specific zones of the flow and highlighted the role of sidewall instability at the base of the breach, which erodes continuously leads to lateral instability.

Currently, engineers attempt to predict breach outflow based on the formation of the breach using physical properties of the component material such as the angle of friction, the slope angle of the breach channel and a factor for the rate of growth of breach width. The present authors recognize major deficiencies in this approach such as the use of assumptions for the breach geometry, the progression of the rupture, the use of material transport expressions based only on shear stress considerations (FREAD, 1984c) or the use of empirical 'adjustment' factors influencing the erosion of compacted cohesive soils (SINGH et SCARLATOS, 1989).

The data acquired from the experimental dike were used in a data-processing tool for comparative analysis called BREACH, in which five methods for predicting the formation of a breach by overtopping of dams composed of granular material were programmed (ZERROUK, 2004; ZERROUK et MARCHE, 2001). Starting with the same data obtained from the laboratory test, each of the models was applied and the results discussed with respect to whether the principal factor for breach evolution that is presumed predominant for the breaching process in the model, corresponds in fact to the mechanism observed during the test.

The analysis highlights the factors, ignored in the current models, which may in fact explain the mediocre results obtained for the predictions. It indicates that the characterization of the breach geometry is the major uncertainty in these models, which result in peak outflows and corresponding times never being simultaneously predicted correctly.

Tous droits réservés © Revue des sciences de l'eau, 2005

This document is protected by copyright law. Use of the services of Érudit (including reproduction) is subject to its terms and conditions, which can be viewed online.

https://apropos.erudit.org/en/users/policy-on-use/

érudit

This article is disseminated and preserved by Érudit.

Érudit is a non-profit inter-university consortium of the Université de Montréal, Université Laval, and the Université du Québec à Montréal. Its mission is to promote and disseminate research.

https://www.erudit.org/en/

REVUE DES SCIENCES DE L'EAU, Rev. Sci. Eau 18/3(2005) 381-401

Une contribution expérimentale à l'étude de l'érosion d'une digue par submersion et son analyse

An experimental contribution to the study of the erosion of a dike by overtopping

N. E. ZERROUK*, C. MARCHE

Reçu le 23 octobre 2003, accepté le 22 juillet 2005**.

SUMMARY

It has been recognized for several decades that the reliability of forecasts for flooding downstream from a dam failure depends not only on the local topography but also on the failure mode of the dam, specifically on the breach outflow hydrograph. It is therefore of primary importance that the mechanism of formation of the breach is anticipated with an acceptable degree of accuracy. Several approaches to model this phenomenon have been reported in the literature, but the results from these models do not appear to be reliable when the predicted values are compared with those deduced from observations carried out on real or simulated dam failures. Each failure of a dam generates a particular form of hydrograph that will have a specific impact on the affected population. The most frequent cause of failure of earthfill and rockfill dams is by overtopping of the crest, although in rockfill dams initial piping failure followed by partial collapse of the crest resulting in breach initiation has been observed. Once initiation of a breach has occurred, continuous development until complete failure occurs is virtually assured if sufficient energy from the reservoir volume is available to sustain the breaching process. For this reason, breach formation is recognized as one of the essential factors in the modeling of a dambreak.

To anticipate the real hazard from dam overtopping, a predictive model for breach initiation and development would be extremely useful. Currently, the majority of dam safety studies assume a standard scenario for the breach formation, development and final failure based on some norms established as a result of regression analyses on some actual failures. Modeling of the breach and therefore prediction of the outflow hydrograph do not take into account specific local data on the construction techniques and soil properties, mainly because currently available methods that attempt to incorporate these factors still do not provide reliable results. To contribute to the under-

1. École Polytechnique de Montréal, Département des Génies Civil et des Mines et Géologie, Case Postale 6079 Succursale Centre-ville, Montréal, QC H3C 3A7, Canada. Tel: (514) 340-4711 ext. 4414 - (514) 340-4711 ext. 4801, Telc: (514) 340-2989.

* Correspondance: nacer.zerrouk@polymtl.ca, claude.marche@polymtl.ca

** Les commentaires seront reçus jusqu'au 30 juin 2006.

standing of the mechanism of breach formation and to determine the details of the process, a test of erosion failure was performed and documented at the Hydrodynamics Laboratory of the École Polytechnique de Montreal. This test, coupled with the subsequent development of a numerical model incorporating the interactions of the hydraulics-erosion process, has formed the basis of a doctoral dissertation, the principal objective being to reproduce as accurately as possible the mechanisms involved in the formation of a breach (ZERROUK, 2004; ZERROUK et MARCHE, 2004).

This paper describes a test carried out under controlled laboratory conditions on a homogeneous dam composed of moraine, a material used in the construction of real dams with an extended non-cohesive granulometry. The test simulated the initiation and the start of the failure by dike overtopping known as a "fuse plug" i.e. a dike that, during an event of exceptional rain or extreme inflow, would be used to limit the volume retained in the reservoir. The test, carried out on a laboratory scale but extrapolated to prototype dimensions without similarity considerations, nevertheless allowed identification of the various mechanisms that intervene in the breaching process.

The results obtained on this experimental dike showed that the mechanism of formation and erosion of a breach is quite different from the mechanisms assumed in standard methods of computation of the rupture. Current models give undue weight to a single failure mechanism, independent of lateral slope instability, surface erosion or shear stress energy. The laboratory test however indicated the importance of turbulence and erosion in certain specific zones of the flow and highlighted the role of sidewall instability at the base of the breach, which erodes continuously leads to lateral instability.

Currently, engineers attempt to predict breach outflow based on the formation of the breach using physical properties of the component material such as the angle of friction, the slope angle of the breach channel and a factor for the rate of growth of breach width. The present authors recognize major deficiencies in this approach such as the use of assumptions for the breach geometry, the progression of the rupture, the use of material transport expressions based only on shear stress considerations (FREAD, 1984c) or the use of empirical "adjustment" factors influencing the erosion of compacted cohesive soils (SINGH et SCARLATOS, 1989).

The data acquired from the experimental dike were used in a data-processing tool for comparative analysis called BREACH, in which five methods for predicting the formation of a breach by overtopping of dams composed of granular material were programmed (ZERROUK, 2004; ZERROUK et MARCHE, 2001). Starting with the same data obtained from the laboratory test, each of the models was applied and the results discussed with respect to whether the principal factor for breach evolution that is presumed predominant for the breaching process in the model, corresponds in fact to the mechanism observed during the test.

The analysis highlights the factors, ignored in the current models, which may in fact explain the mediocre results obtained for the predictions. It indicates that the characterization of the breach geometry is the major uncertainty in these models, which result in peak outflows and corresponding times never being simultaneously predicted correctly.

Keys-words: *dambreak, earth-fill dam breach, breach erosion, forecasting, flood of failure, overtopped earthen dike, hydraulic testing flume, fuse plug.*

RÉSUMÉ

Dans cet article, on décrit un essai réalisé sous conditions contrôlées en laboratoire concernant l'initiation et le démarrage de la rupture par submersion d'une digue de revanche homogène et en moraine, un matériel utilisé dans les ouvrages réels, de granulométrie étendue et sans cohésion.

Les résultats obtenus sur cette digue expérimentale ont montré que le mécanisme de formation et d'érosion de brèche est très différent du mécanisme global et moyen de développement et de progression de la brèche adopté dans les modèles courants de calcul des ruptures de barrages. L'essai souligne l'importance de la turbulence et des pertes de charge locales dans certaines zones spécifiques de l'écoulement et met en évidence le rôle de l'instabilité des parois latérales de la brèche dont la base est sapée continuellement.

L'essai a été stoppé à un moment précis, soit lorsque l'accroissement rapide du débit de rupture était confirmé, afin de préserver les caractéristiques géométriques précises de la brèche en cours de formation. Les données ainsi recueillies sur la rupture de la digue d'essai sont utiles à tout développeur voulant valider sa compréhension physique de l'érosion de brèche ou un outil de calcul visant à reproduire ce mécanisme. Le texte présente aussi une analyse comparative effectuée par un outil informatique de prévision, BRECHE, et la confrontation des résultats produits selon cinq méthodes publiées durant les dernières décennies et reconnues.

Une appréciation des résultats obtenus par prévision et des nombreuses données issues de l'essai réalisé sur le modèle en laboratoire est présentée et discutée.

Mots clés : *rupture de barrage, brèche de barrage en terre, érosion de brèche, prévision, crue de rupture, digue en terre submergée, modèle réduit, digue fusible.*

1 - INTRODUCTION

Les ruptures de barrages sont des événements rares, mais au XXe siècle, il s'en est produit entre 10 et 40 chaque décennie. Certaines ruptures ont eu des conséquences très graves et plus de 8 000 pertes de vie leur sont directement attribuables depuis 1900. Parmi les causes de rupture les plus fréquentes pour les ouvrages en terre et enrochement, les statistiques permettent d'identifier clairement le déversement sur la crête comme cause principale de la rupture par formation d'une brèche, suivie par l'érosion interne du corps et des fondations du barrage engendrant ainsi la vidange de la retenue. Une crue de rupture se propage alors en aval en inondant la vallée.

Chaque rupture est susceptible d'engendrer une forme particulière de crue, et donc des impacts spécifiques sur les populations qu'elle pourrait affecter. Les faits montrent que la sévérité de la crue de rupture dépend directement du mode de rupture de l'ouvrage et d'autres aspects dont la topographie de la vallée. Parmi les différents modes de rupture constatés, celui initié par un écoulement de surverse est souvent considéré dans les plans de mesures d'urgence parce qu'il est fréquent et qu'il conduit aux conditions les plus critiques. Notons que les ruptures de barrage initiées par une érosion interne (renard) engendrent elles aussi après un temps court un écoulement par une brèche de déversement quand la partie supérieure du tunnel traversant le barrage s'écroule. Selon les caractéristiques de l'ouvrage et de la retenue, il engendre

une évolution spécifique et une forme finale particulière de la brèche. Prévoir le danger réel que représente un barrage en remblai en cas de surverse exige la prévision préalable de son mécanisme d'érosion. Dans la majorité des études de sécurité actuelles, ce mécanisme et son déroulement sont supposés et ne tiennent pas compte des données locales spécifiques parce que les techniques qui pourraient tenir compte de ces données sont encore peu fiables. Vu l'importance que présente ce facteur sur la crédibilité des estimations d'impacts potentiels de rupture, les recherches sur la formation de brèches dans des ouvrages subissant des déversements sont devenues prioritaires dans beaucoup de pays et contribueront à court terme à mieux évaluer la sécurité d'un ouvrage ou d'un aménagement. Dans un certain nombre de programmes en cours, elles sont à la fois de type expérimental et numérique.

Le Laboratoire d'Hydrodynamique de l'École Polytechnique de Montréal conduit actuellement un tel programme. Il comporte quatre volets. Le premier vise à faire le point sur les techniques et méthodes existantes pour prédire la brèche et son rythme d'ouverture. Le deuxième a pour objectif de comparer la qualité de ces techniques en regard de certaines ruptures d'ouvrages ayant eu réellement lieu et dont le déroulement a été observé ou a pu être reconstitué. Le troisième volet consiste à mettre au point un modèle de prévision simultanée de la formation de la brèche et de l'onde de crue initiée en aval. Le quatrième est de confronter les prévisions obtenues des méthodes conventionnelles et de celle en cours d'élaboration à des observations faites en laboratoire sur certaines digues d'essais. Certains des résultats concernant le premier volet ont déjà été publiés (ZERROUK, 2004 ; ZERROUK et MARCHE, 2001). Pour contribuer à ces volets, un programme d'essais de rupture par érosion a été réalisé et documenté par le laboratoire. Ses buts sont de mieux comprendre le mécanisme de la formation d'une brèche et de pouvoir cerner les détails de son processus. L'un des essais réalisés a fourni un ensemble de données très complet et il est décrit de manière détaillée dans le texte qui suit parce qu'il peut constituer une base de données intéressante pour tous les chercheurs du domaine. Réalisé sur une digue constituée de moraine, il simule la rupture par érosion de crête d'une digue dite « de revanche », c'est-à-dire une digue qui, durant un événement de pluie exceptionnelle ou de forte hydraulicité seulement, servirait à contenir les eaux du réservoir.

L'analyse des résultats de l'essai permet une meilleure compréhension du déroulement de la rupture. L'essai, réalisé en laboratoire mais exploité en grandeur réelle et sans similitude, permet de bien identifier les différents mécanismes mis en jeu. Ses observations peuvent donc ici encore être comparées aux prévisions obtenues des techniques classiques. Regroupées dans un outil informatique (BRECHE) présenté précédemment par les mêmes auteurs (ZERROUK, 2004 ; ZERROUK et MARCHE, 2001), cinq de ces méthodes de prévision de formation d'une brèche par érosion de submersion pour des ouvrages en matériau granulaire y sont programmées. Ce sont les méthodes de CRISTOFANO (1965) et d'HARRIS et WAGNER (1967), ainsi que les celles des modèles numériques BEED (SINGH et QUIROGA, 1987 ; SINGH et SCARLATOS, 1989 ; QUIROGA et SINGH, 1987), BREACH (FREAD, 1984a et 1984b) et DAMBRK (FREAD, 1984c et 1988).

À partir du même ensemble de données caractérisant cet essai de laboratoire, chacune des méthodes est appliquée et les résultats sont discutés en évaluant si le facteur principal d'évolution qu'elle privilégie, correspond à un mécanisme observé durant l'essai. Une comparaison du rendement des diffé-

rentes lois et méthodes couramment proposées pour prévoir la formation d'une brèche dans un ouvrage en moraine est donc possible. Elle permet de qualifier les différentes visions adoptées par leurs auteurs et de juger de leur pertinence dans la nouvelle technique recherchée.

L'analyse fournit aussi les pistes nécessaires pour le développement subséquent d'un modèle numérique de couplage hydraulique-érosion apte à reproduire le plus fidèlement possible les mécanismes impliqués simultanément ou successivement dans la formation de la brèche (ZERROUK, 2004; ZERROUK et MARCHE, 2004). Les informations particulières déduites par exemple de la zone du parement aval durant l'essai permettent de comprendre pourquoi il est difficile de modéliser simplement cette zone de l'écoulement. Les observations analysées permettent d'identifier des mécanismes complémentaires qui pourraient compléter les mises en équation actuelles, minimiser les erreurs cumulées et préserver la vraisemblance de la crue annoncée. La brèche est reconnue comme un des facteurs essentiels dans la modélisation des ruptures de barrage. Lors des études hydrauliques de sécurité des barrages, une part importante des informations acquises porte sur la crue de rupture et sa propagation dans les zones à risque. Lorsque la prévision est réalisée par voie numérique, le modèle utilisé calcule l'hydrogramme de rupture à l'ouvrage puis la propagation et le laminage de la crue de rupture dans la vallée. Le deuxième calcul est influencé par le premier et conditionné par l'hypothèse de brèche. Dans chaque modèle de rupture, la fonction permettant l'estimation de l'hydrogramme de crue sortant de la brèche est l'une des plus importantes.

Les ingénieurs s'efforcent de prédire les caractéristiques des débits pouvant sortir de la retenue par la brèche en formation en s'appuyant sur les propriétés physiques des matériaux comme l'angle de frottement, l'angle de pente du canal ou le facteur d'élargissement de la brèche. Ce faisant, chacun privilégie un mécanisme de détérioration unique, que ce soit l'instabilité des pentes, l'érosion particulaire ou l'énergie d'arrachement. Les auteurs cités leur reconnaissent des insuffisances majeures comme l'utilisation d'hypothèses géométriques imposant la progression de la rupture, le recours à des lois de transport solide basées uniquement sur la théorie de la contrainte de cisaillement (FREAD, 1984c) ou la méconnaissance profonde des facteurs influençant l'érosion des sols cohésifs compactés (SINGH et SCARLATOS, 1989).

2 – LA DIGUE D'ESSAI ET SA RUPTURE

2. 1 Montage expérimental

Comme tous les essais du programme expérimental, l'essai a eu lieu dans le laboratoire d'hydrodynamique du département des génies civil, géologiques et des mines de l'École Polytechnique de Montréal, Québec. La digue a été construite dans un canal en béton de 56,5 m de long, 2,44 m de large et 1,80 m de hauteur selon le schéma de la figure 1. Au niveau de la digue, le mur du canal est équipé d'une ouverture vitrée qui permet d'observer l'évolution de la brèche latéralement (figure 2). La longueur du canal offre la possibilité de constituer un réservoir de retenue de 550 m^3.

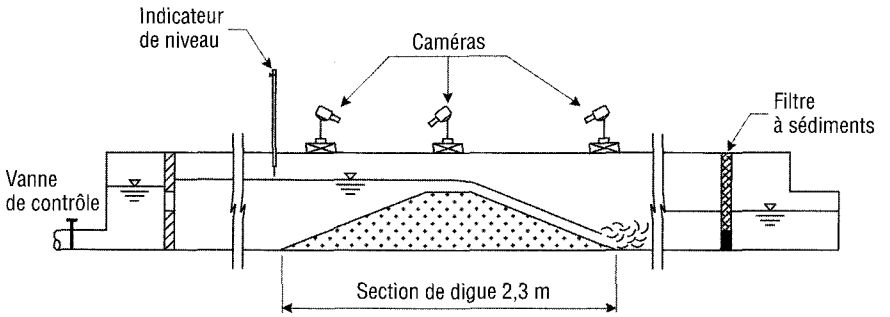

Figure 1 Schéma du montage de la digue d'essai.
Diagram showing the testing flume.

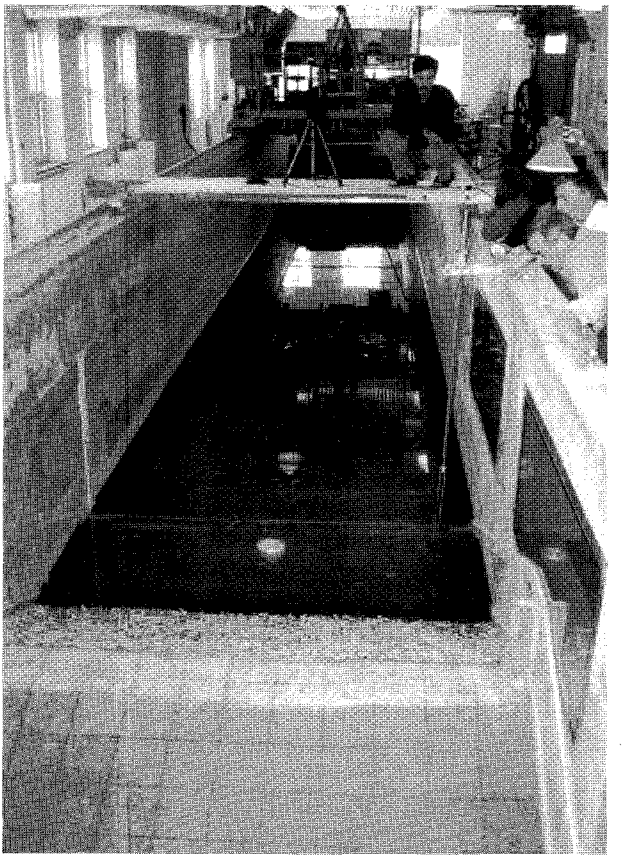

Figure 2 Le barrage durant sa mise en eau dans le canal d'essai.
The dam during the priming of the flume channel.

Durant l'essai, le canal a été alimenté par un circuit de pompage. La conduite d'amenée au canal est équipée d'un débitmètre qui permet de contrôler le débit à la valeur désirée et d'en faire les ajustements. Un enregistrement permet d'obtenir avec précision l'évolution du niveau de la retenue amont.

Pour suivre pas à pas le processus de formation de brèche, trois caméras vidéos munies d'affichage du temps ont été installées sur l'aire d'essai. La première, immédiatement en aval de la digue, a permis de suivre l'évolution de la profondeur et de la largeur de la brèche. La deuxième, située sur le côté vitré du canal, filmait au niveau de la digue, et montrait la surface de l'écoulement et le développement détaillé de la brèche. La troisième caméra installée en amont de l'ouvrage a fourni des informations sur les vitesses d'approche de l'écoulement ainsi que sur l'érosion régressive du parement amont de la digue dans la zone de contrôle des débits de rupture.

Des flotteurs introduits continuellement dans le réservoir, ont permis d'évaluer la vitesse et l'accélération des particules passant la brèche jusqu'au premier front d'érosion. Ils ne pouvaient plus être exploités plus en aval en raison d'une turbidité et d'une turbulence trop importantes de l'écoulement.

Deux filtres constitués de géotextiles ont été placés en amont et en aval de la digue d'essai pour isoler la zone d'essai, retenir d'éventuels débris et éviter la recirculation des sédiments érodés.

2. 2 Géométrie et composition de la digue

La géométrie de la digue expérimentale constitue un modèle réaliste des digues en terre courantes. Elle est schématisée à la figure 3.

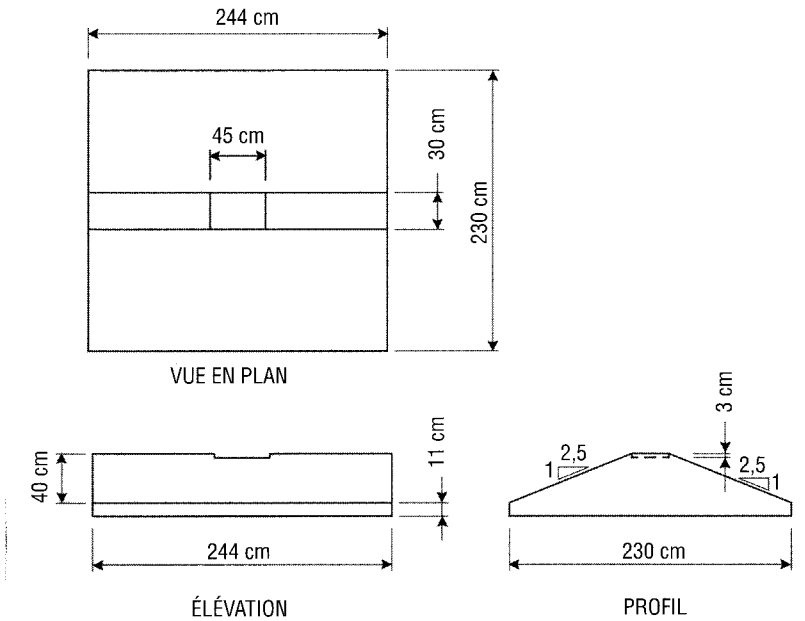

Figure 3 Coupe type de la digue d'essai.
Typical section of the trial dike.

La digue occupe toute la largeur du canal et sa hauteur initiale était de 51 cm, sa largeur de crête était de 30 cm et sa largeur en pied de 230 cm. Ses pentes amont et aval étaient de 2,5H/1V.

La digue a été réalisée avec une crête horizontale mais afin de permettre la formation d'une brèche intéressante à analyser, une légère dépression de forme triangulaire a été créée, de 45 cm de largeur et de 3 cm de profondeur par rapport au niveau horizontal nominal de crête. Nous pensons que le seul effet de l'enlèvement du matériel au centre de la crête est de centrer le démarrage de la brèche pour éviter les effets de bord et qu'il n'affecte pas le processus d'érosion.

Pour éviter de possibles courants préférentiels et s'assurer de la liaison entre l'ouvrage et les murs du canal, les contours muraux de la digue ont été encadrés à l'aide de lisses de bois de 65 cm de largeur collées et étanchéifiées (figure 2). De telles infiltrations auraient pu engendrer une rupture indésirable par érosion interne durant la mise en eau ou l'essai.

La moraine est le matériau le plus utilisé au Canada pour la construction de digues en remblai comme en témoignent les digues du complexe La Grande au Québec (CIGB, 1989 ; CHICHE, 1982). Son choix, et particulièrement celui de la moraine de LG2, était tout indiqué pour la construction de la digue d'essai et garantissait un essai réaliste. Ce matériau d'origine glaciaire est un mélange de gravier, de sable, de silt, et d'une faible proportion d'argile dont le poids spécifique est 2 200 kg/m^3. La granulométrie est très étalée et la cohésion est négligeable dans ce matériau. Le diamètre moyen des grains est de 0,25 mm, l'angle de frottement interne est de 36° et la porosité de 0,4. Pour les besoins de l'essai, le matériau a été compacté par couches de 10 cm avec un optimum proctor de 6 % d'humidité. La compaction a été obtenue en utilisant un marteau mécanique équipé d'une plaque de compactage carrée de 40 cm de côté. Chaque couche a été scarifiée après compactage pour assurer l'adhésion avec la couche suivante.

À la fin de la construction et dans le but de simuler la présence d'une couche de protection de surface dont la présence est habituelle sur une digue, une mince couche de finition constituée d'agrégats de 18 mm de diamètre a été étendue sur le talus amont et son observation a été exploitée en grandeur réelle et sans similitude. Cette couche a permis d'évaluer la force tractrice sur le parement amont de la digue. Pour permettre de meilleures observations visuelles et vidéos de l'évolution de la brèche, un quadrillage de 20 cm de côté a été marqué à l'aide de poudre traçante bleue sur le talus aval (figure 2).

2. 3 Essai et formation de la brèche de rupture

L'essai de rupture par submersion a été réalisé sous un débit d'apport constant et le remplissage du réservoir créé par la digue s'est fait en 30 minutes. Cette manière de mettre en eau l'installation permettait de ne pas saturer le matériau de la digue conformément à la situation qui prévaut pour les digues de revanche lors d'une situation exceptionnelle.

À la fin de la mise en eau, l'eau commence à déverser sur la crête de l'ouvrage et est canalisée par une première rigole formée au centre de la digue. Une brèche se crée presque instantanément au centre de la digue. Le matériau y est arraché et lavé très rapidement et les eaux sont très chargées en sédiments fins (figure 4).

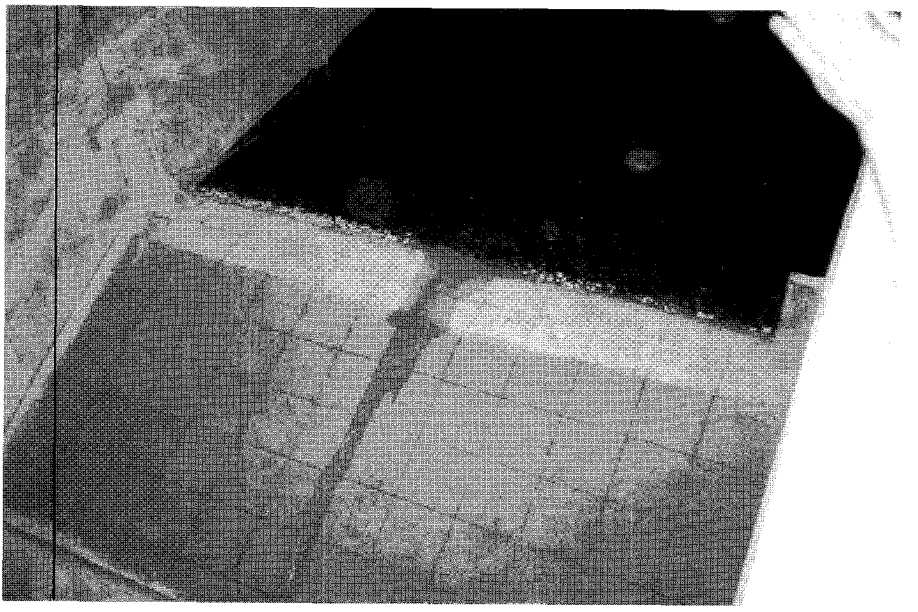

Figure 4 Écoulement de l'eau par-dessus la crête le talus aval du barrage juste après le déversement (t = 17 s).

Flow of water over the crest and on the downstream slope of the dam just after overtopping (t = 17 s).

Le creusement de la brèche de rupture peut se décrire en quatre étapes de débordement sur l'ouvrage.

Au début, l'érosion du parement aval crée des escaliers et des cavités dont la position remonte progressivement le parement. La première cavité se forme en dessous de la jonction parement aval-crête. L'érosion régresse et atteint cette jonction après 48 secondes.

En seconde étape, le profil en escalier du parement aval se confirme avec l'apparition nette d'une deuxième puis d'une troisième cavité. La distance séparant chaque cavité est de 0,17 m. Le niveau, augmentant lentement dans le réservoir amont accroît la largeur d'érosion. Le débit déversé en augmentation lui aussi accroît le taux d'érosion. Sur la crête l'érosion régresse en formant un déversoir circulaire alimentant le canal de brèche nettement formé maintenant dans le parement aval.

Lors de la troisième étape, le recul de la section de contrôle est encore insuffisant pour qu'augmente significativement le débit déversé sur la digue. Le niveau du réservoir croît encore légèrement et une deuxième amorce de brèche apparaît sur le côté gauche de l'ouvrage. Son développement se fait de manière similaire à la brèche principale qui continue cependant à drainer la majeure partie du débit. Le creusement atteint le parement amont et entraîne la protection du talus. L'axe de la brèche principale reste centré mais l'écoulement large à la crête alimente pendant 30 secondes deux brèches indépendantes qui se rejoignent 3 minutes environ après le début du déversement (figure 5).

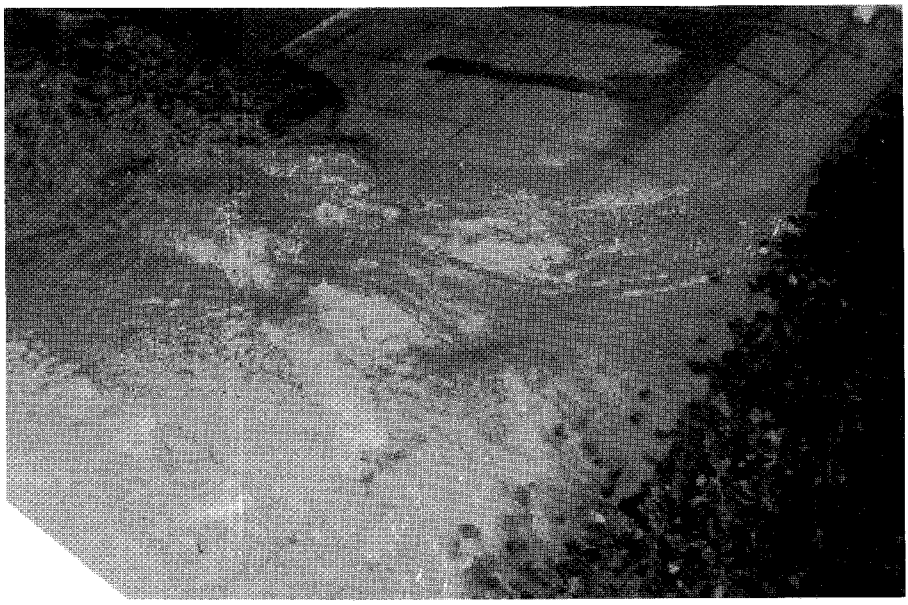

Figure 5 L'écoulement est torrentiel et une troisième déverse apparaît en rive droite (t = 175 s).

The flow is rapid and a third overtopping flow appears on the right-hand side (t = 175 s).

Durant l'étape finale, la fusion des deux brèches indépendantes stabilise le plan d'eau amont en permettant une équivalence des débits d'apport et de déversement. L'érosion de la crête se poursuit et l'abaissement de la section de contrôle engendre une baisse progressive du réservoir. Le débit de rupture n'augmente plus et tend à nouveau vers la valeur de l'apport contrôlé introduit en amont. L'essai est stoppé à 600 s avec la fermeture des vannes afin de conserver aussi intact que possible l'état de la brèche (figure 6).

Les relevés effectués après l'essai ont permis de connaître avec précision la géométrie du canal de la brèche résultant de cette érosion de surverse comme le montre la figure 7.

À partir de prises de vue complémentaires, il était possible de reconstituer l'évolution du profil longitudinal du canal de brèche le long de l'axe central du canal. Les différentes étapes du creusement sont montrées à la figure 8.

Selon les mesures réalisées après l'essai, différents profils longitudinaux dans le canal de brèche ont été calculés à 0 m, 1,2 m, 1,3 m, 1,4 m et 1,5 m du mur droit. Ils sont superposés sur la figure 9 et montrent que si le fond du canal varie beaucoup à la hauteur du parement aval dans la direction transversale, ce n'est pas le cas sur la crête et dans la zone du parement amont, là où se situe la section de contrôle gouvernant le débit de rupture.

Figure 6 État de la brèche finale à l'arrêt de l'essai, montrant ainsi l'érosion en escalier.

State of final breach of the trial dike, showing the stepwise erosion.

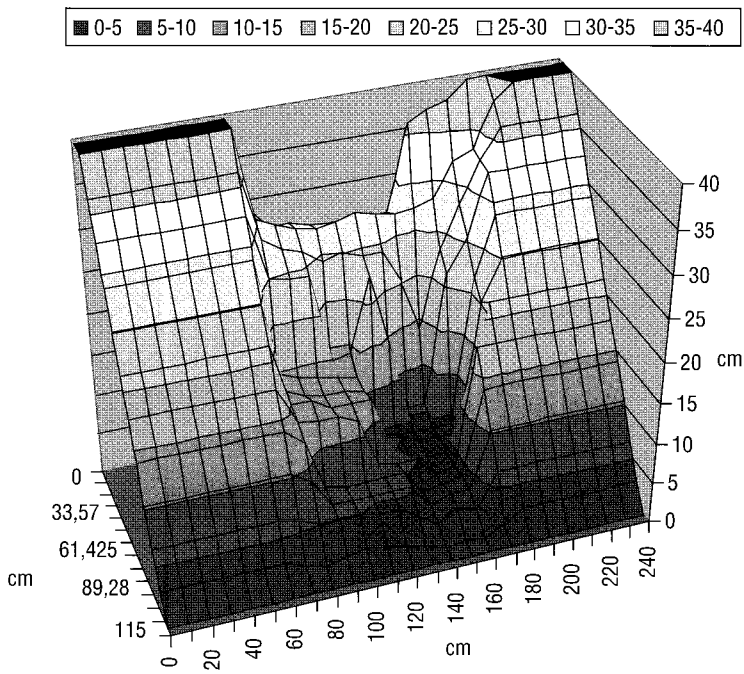

Figure 7 Vue aval en 3D de la brèche finale de la digue d'essai.

Downstream view in 3D of the final breach of the trial dike.

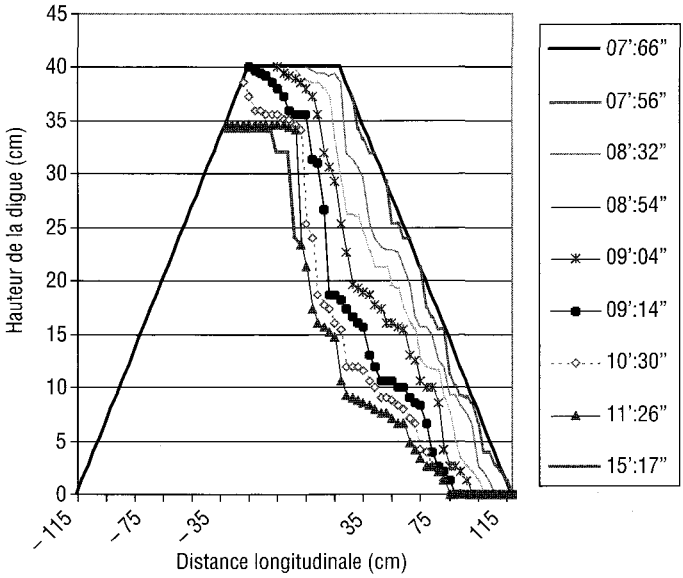

Figure 8 Profils longitudinaux successifs de la brèche de la digue d'essai.

Successive longitudinal sections of the breach of the trial dike.

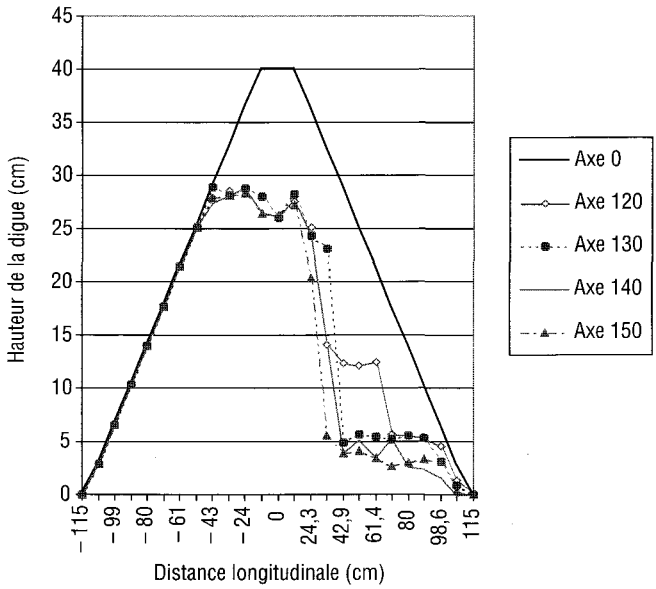

Figure 9 Coupes longitudinales de la digue d'essai selon différents axes transversaux.

Longitudinal sections of the trial dike according to different transverse axes.

2. 4 Constatations importantes

Après une première période de déversement de 100 à 120 secondes, un resserrement de l'écoulement est observé au niveau des premières zones d'érosion. C'est ce resserrement de l'écoulement qui contrôle le débit de la brèche. Sur toute la partie aval de la brèche en érosion l'écoulement est torrentiel. Dès ce moment, l'approfondissement de la brèche principale est moins rapide qu'au début contrairement à son élargissement qui se fait par un travail de sape des berges latérales et l'entraînement des agrégats de la couche protectrice du parement amont permet de juger de l'intensité de la contrainte de cisaillement exercée dans la brèche. Les écoulements de sape sous les parois de brèche restent importants et les tourbillons créés par la turbulence de l'écoulement entraînent le matériau du pied de ces parois. Les paliers jouent un rôle de dissipation d'énergie qui affecte directement la stabilité et l'intégrité de la base des parois. Un dégagement progressif de galettes de ce matériau contribue à maintenir la raideur des parois latérales de la brèche. Les sections transversales de la brèche au sommet de la digue prennent progressivement une forme approximativement rectangulaire. Le rapport de leur hauteur à leur largeur est de l'ordre de 4 à 5.

Ce resserrement n'est presque plus visible après l'essai sur les profils comparés de la brèche selon différents axes établis à la figure 10. Les photographies analysées montrent alors que la forme de la brèche à la fin du processus d'érosion est relativement trapézoïdale et que son fond est plat. L'érosion a finalement fait disparaître les étranglements temporaires observés pendant de courts instants. Le parement aval est constitué de plusieurs escaliers dont les contremarches sont quasi verticales.

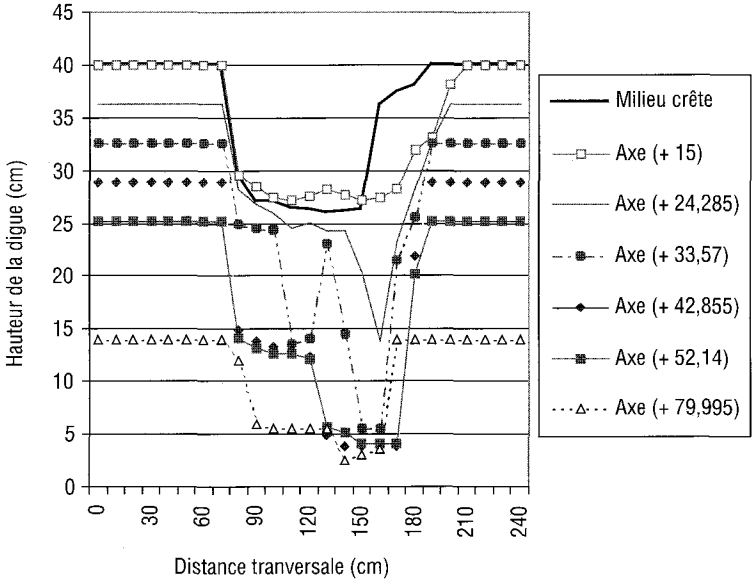

Figure 10 Largeur de la brèche finale à différents axes du talus aval de la digue d'essai.

Width of the final breach along different axes of the downstream slope of the trial dike.

L'évolution de la largeur de la brèche dans la crête de la digue d'essai est montrée à la figure 11. Quelle que soit la position considérée sur la crête, la largeur croît rapidement au début du creusement mais tend à se stabiliser. Cependant l'essai a été arrêté pour sauvegarder l'état de la brèche, et on ne dispose que d'un temps d'évaluation limité pour observer cette stabilisation qui se fait aux environs de 0,4 à 0,5 m, soit à *une valeur de l'ordre de la hauteur de l'ouvrage et non de 3 à 4 fois cette hauteur selon certaines normes en usage*. Cette largeur ne représente sans doute pas la largeur ultime d'une brèche si le réservoir en amont est important.

Les écoulements observés se faisant sur fonds mobiles très rapidement mobilisés, ils présentent aussi certaines particularités.

Lorsque l'eau se déverse sur la digue, les érosions ont lieu lorsque les grandes vitesses locales de l'eau créent une sollicitation hydrodynamique (contrainte de cisaillement) qui excède la résistance du matériau composant la surface de la digue (contrainte de cisaillement critique). Le processus d'érosion semble initié en un point de discontinuité de pente ou de composition de la surface solide. L'érosion initiale peut donc commencer en beaucoup d'endroits et de manière pratiquement aléatoire. L'énergie destructrice des eaux augmente considérablement sur le talus aval du barrage, là où les pentes sont les plus raides. Les fortes vitesses et les contraintes de cisaillement très grandes y créent un grand potentiel d'érosion.

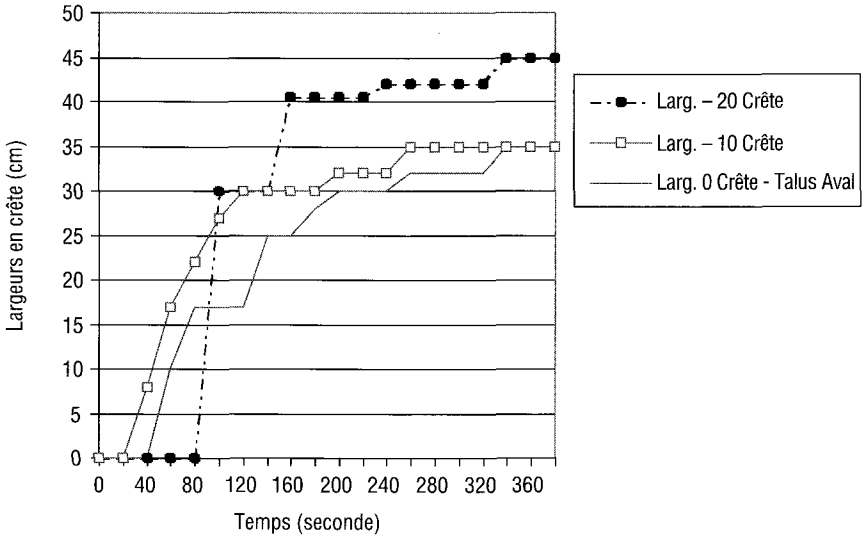

Figure 11 Largeur de la brèche finale en crête de la digue d'essai à différentes étapes de temps.

Width of final breach in the crest of the trial dike at different time steps.

À la suite de la première rupture de la surface solide un petit ressaut hydraulique a lieu et une entaille d'affouillement commence immédiatement en aval du ressaut. Dans les instants qui suivent, plusieurs discontinuités de surface se développent de manière similaire et produisent un écoulement en cascade.

La tendance naturelle de l'écoulement est d'atteindre un état d'équilibre le long du talus aval, constitué de zones d'accélération et de ralentissement. Il en résulte une distribution non uniforme de la contrainte de cisaillement le long de l'axe d'écoulement ayant pour résultat la formation d'un certain nombre de ressauts.

Depuis la crête de la digue vers l'aval, à chaque escalier la lame d'eau décolle légèrement du thalweg et crée une chute libre revenant en contact avec le talus aval à sa base. Il en résulte une érosion plus rapide à l'endroit de la chute créant ainsi un bassin dans le talus limité par un plateau horizontal. Ce palier, jouant le rôle d'un seuil, va engendrer à son tour une autre chute et un autre palier plus bas sur le talus aval. En réalité, il semble que l'écoulement crée lui-même son propre dissipateur d'énergie en escalier.

La distance de 0,17 m observée au début de l'essai entre les cavités en développement correspond à une optimisation de cette perte d'énergie, mais change ensuite selon la valeur du débit déversé de l'écoulement.

Durant l'essai le réservoir est alimenté continuellement en flotteurs (billes de propylènes) et il était possible de mesurer leur vitesse d'approche, de déterminer leur trajectoire et leur temps de parcours par chronophotographie. Des vitesses d'approche de 10 cm/s ont été calculées, qui augmentent rapidement jusqu'à atteindre 60 cm/s au passage de la crête de digue. La vitesse d'écoulement sur le talus aval est plus changeante et est plus difficile à mesurer lorsque la brèche commence à se former. Cependant on a pu l'estimer à 15 cm/s environ pour la première lame d'eau sur le talus aval et confirmer qu'elle augmentait au fur et à mesure de l'accroissement du débit de brèche pour atteindre un maximum de 130 cm/s trois minutes après le début de la formation de la brèche. Elle diminue alors progressivement jusqu'à devenir presque constante avec 50 cm/s vers la fin de l'essai.

Enfin l'analyse des mesures des niveaux d'eau et des débits durant l'essai permet de connaître l'évolution du débit déversé. Les hydrogrammes d'entrée et de sortie sont représentés à la figure 12. Le débit maximal de rupture a atteint durant cet essai 4 fois le débit d'apport constant au réservoir.

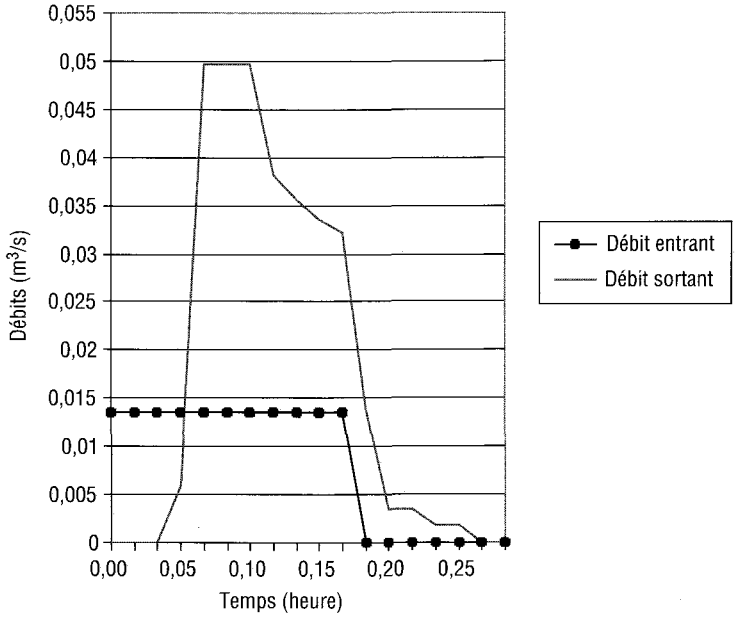

Figure 12 Hydrogrammes d'entrée et de sortie de la brèche lors de l'essai sur la digue.

Breach inflow and outflow hydrographs during the trial.

3 - BILAN DES DIFFÉRENTES PRÉVISIONS NUMÉRIQUES DE LA RUPTURE DE LA DIGUE D'ESSAI

Les cinq méthodes de prévision reconnues et intégrées au programme de prévision BRECHE ont été utilisées pour prédire les caractéristiques de la brèche et le débit maximal déversé sur la digue expérimentale en observation durant une rupture par submersion.

L'application de chaque méthode à la simulation de la formation de cette brèche nécessite dans chaque cas le choix, par l'usager, des paramètres spécifiques représentant le mieux possible les données disponibles. La sensibilité des résultats vis-à-vis des valeurs choisies est parfois grande pour cette raison, deux résultats sont fournis ci-dessous pour chaque méthode. Leur développement simulé de la brèche et la situation observée durant et à la fin de l'essai sont comparés et les résultats obtenus sont comparés dans les tableaux 1 et 2.

Tableau 1 Comparaison des valeurs obtenues en mode prédictif.

Table 1 *Comparison of the obtained values in predictive mode.*

Sources	Caractéristiques de la brèche			
	Largeur au fond (m)	Largeur en crête (m)	Débit maximal (m^3/s)	Temps de Formation (h)
Cristofano	0,95[a]	1,006[a]	0,0733	*0,051*
Harris et Wagner	0,95[b]	0,46	0,0141	0,006
Breach	*0,20*	*0,471*	0,0262	0,042
Beed	0,036	0,370	0,0135	0,675
Dambrk	1,72	1,72	*0,0324*	0,3223
Observations	**0,95**	**1,006**	**0,0383**	**0,133**
Erreur minimale	79 %	53 %	15 %	61 %

[a] : La méthode CRISTOFANO ne prédit pas l'élargissement de la brèche ; les largeurs au fond et en crête sont celles observées.
[b] : La méthode de HARRIS et WAGNER ne donne pas la largeur au fond puisque la forme de brèche est une parabole.

Tableau 2 Comparaison des meilleures valeurs obtenues par les méthodes optimisées.

Table 2 Comparison of the better values obtained by the optimized methods.

Sources	Caractéristiques de la brèche			
	Largeur au fond (m)	Largeur en crête (m)	Débit maximal (m^3/s)	Temps de Formation (h)
Cristofano	0,95[a]	1,006[a]	0,0830	0,106
Harris et Wagner	0,95[b]	0,46	0,0201	*0,136*
Breach	*0,967*	1,200	0,0853	0,041
Beed	1,028	*1,093*	0,080	0,038
Dambrk	1,79	2,47	*0,0327*	0,3223
Observations	**0,95**	**1,006**	**0,0383**	**0,133**
Erreur minimale	2 %	8 %	14 %	2 %

[a] : La méthode CRISTOFANO ne prédit pas l'élargissement de la brèche ; les largeurs au fond et en crête sont celles observées.
[b] : La méthode de HARRIS et WAGNER ne donne pas la largeur au fond puisque la forme de brèche est une parabole.

Les tests antérieurs effectués par la méthode de CRISTOFANO ont montré que le paramètre le plus important était, dans cette approche, l'angle de frottement pour lequel CRISTOFANO suggère des valeurs comprises entre 10° et 15°. Comme la méthode de CRISTOFANO ne fournit aucune hypothèse d'élargissement de brèche, nous avons établi une croissance de largeur conforme à celle mesurée lors de l'essai expérimental. La prévision effectuée en retenant un angle de frottement de 12,5° nous donne les résultats indiqués au tableau 1. Dans les mêmes conditions d'élargissement de la brèche, et en choisissant un angle de frottement de 20° qui tienne compte de la compaction du matériau, nous obtenons une meilleure simulation (tableau 2).

Dans la méthode de HARRIS et WAGNER, le paramètre le plus important semble être l'angle de pente du fond du canal de brèche. Selon les recommandations et études des auteurs, il peut varier autour de 15°, mais peut être beaucoup plus faible dans certains cas. Les calculs de prévision ont pris en compte

un angle de 12°. Les résultats sont donnés au tableau 1. Il est possible d'améliorer cette prévision en retenant un angle de 0,8° (tableau 2). La méthode de HARRIS et WAGNER ne donne pas la largeur de fond puisque la forme de brèche est une parabole.

Selon les calculs réalisés par le modèle BREACH de FREAD, c'est le taux d'élargissement de la brèche qui affecte surtout les résultats. Son rôle est transmis par le facteur Br dont l'auteur suggère une valeur de 2 à 2,5. En retenant Br = 2,5, le tableau 1 montre les caractéristiques comparées de la brèche prédite. L'optimisation est possible en augmentant énormément la valeur de Br, toutes les autres modifications aux paramètres n'ayant à toute fin pratique, aucun effet. En adoptant Br = 85, l'optimisation améliore la forme de la brèche mais diminue la validité du débit prédit (tableau 2). Il se peut qu'un effet d'échelle soit à l'origine de cet écart important entre les valeurs optimisées et la recommandation courante pour Br.

Selon le modèle BEED de SINGH, c'est ici encore le facteur d'élargissement de la brèche qui affecte le plus les résultats fournis. Les auteurs de cette méthode recourent dans leurs applications à des valeurs allant de 0,4 à 0,5. En choisissant une largeur initiale de 0,5 m, le tableau 1 résume les résultats obtenus. Le processus prédit est donc très long par rapport à celui observé. Une amélioration dans la prévision de la largeur finale de la brèche est obtenue en choisissant une largeur initiale de 0,2 m tel que le modèle calcule un facteur d'élargissement de 13,33. On obtient alors des valeurs de débit de pointe de et un temps de rupture, qui sont loin des valeurs observées (tableau 2).

Basé sur les formules empiriques suggérées par l'auteur à partir d'analyse statistique de ruptures passées, et un coefficient de forme (z)V de 1H qui identifie la pente latérale de la brèche, les résultats sont montrés au tableau 1. Le résultat change peu (tableau 2), même en modifiant la forme de la brèche en retenant un facteur de forme de 1,376, représentant l'inverse de la tangente de l'angle de frottement de 36° du matériau de la digue d'essai.

Le tableau 1 montre les résultats strictement prédictifs, les choix de paramètres ayant été faits indépendamment des résultats expérimentaux. Le tableau 2 montre le meilleur ajustement obtenu après confrontation avec les résultats expérimentaux, sans toutefois modifier les données physiques du cas.

Le fait que le test ait été arrêté pour sauvegarder la forme de la brèche a sans doute affecté la largeur finale de cette dernière et des différences majeures entre les résultats des méthodes de prévision et les observations peuvent en résulter.

4 – CARACTÉRISTIQUES NÉCESSAIRES D'UNE NOUVELLE MODÉLISATION

Les méthodes les plus courantes de prévision des brèches de rupture par dépassement de crête mettent chacune souvent l'accent sur un des mécanismes observés durant les essais. Pourtant elles ne réussissent pas à prévoir

correctement toutes les caractéristiques de la rupture. Les erreurs montrées au tableau 1 indiquent que la forme même de la brèche anticipée est peu fiable et qu'elle ne s'améliore qu'après optimisation (tableau 2) réalisée grâce aux résultats de l'essai. Ce manque de qualité dans la prévision est sans doute attribuable à la complexité des synergies entre les différents mécanismes que l'observation directe permet de bien identifier. Un modèle prédictif plus performant devrait donc tenir compte au moins de certains de ces mécanismes.

Parmi ceux-ci, celui de l'évolution de l'écoulement sur la crête, dont l'action dès les premiers instants sur le haut du parement aval apparaît comme déterminant pour localiser et stabiliser la position du sillon, est à prioriser. Il permet de comprendre comment se concentrent localement les contraintes d'arrachement que l'écoulement engendre et comment se sature progressivement le matériel constituant les surfaces de parement progressivement sollicitées.

Puis le régime torrentiel des eaux sur le parement aval lui-même ne reste pas uniforme. Malgré le fond initialement rectiligne, la pente raide du fond rend l'écoulement instable et la surface de l'eau prend la forme d'une succession de vagues périodiques. Puis apparaissent des secteurs plus rapidement érodés par ces vagues et naissent les escaliers contribuant alors à une dissipation localisée d'énergie.

Enfin, l'élargissement du sillon de brèche est relié à des dissipations locales importantes d'énergie et se fait par saccades. Il résulte d'actions combinées d'érosion particulaires et de bris de pente entraînant des blocs complets rendus instables.

Les essais du type de celui décrit plus haut montrent aussi que si le chenal d'écoulement serpente parfois pendant son approfondissement et que sa largeur peut être très variable d'un point à un autre, la section, qui pendant la plus grande partie de l'essai contrôle le débit de la rupture, évolue en conservant un fond plat et des pentes raides, confortant ainsi le modèle classique de la brèche rectangulaire pour la première phase de la formation. Ce faisant, lorsque l'objectif premier de la prévision reste l'hydrogramme de la crue de rupture éventuelle de l'ouvrage par déversement, un calcul unidimensionnel, basé sur le débit spécifique, reste justifiable.

5 - CONCLUSION

Les ruptures par érosion de surverse sont les plus fréquentes pour les ouvrages en terre selon les statistiques disponibles du XXe siècle. La sévérité des crues de rupture incite les propriétaires d'ouvrages et les organismes de contrôle à se doter d'une prévision de l'inondation probable induite en cas de rupture pour penser et mettre en place les mesures d'urgences adéquates.

Il est reconnu depuis plusieurs décennies que la fiabilité de la prévision de la crue de rupture dans la vallée dépend outre la topographie de cette vallée, de la fiabilité de l'hydrogramme de rupture prévu à l'ouvrage, donc de la justesse avec laquelle le mécanisme de formation de la brèche est anticipé. Plu-

sieurs méthodes de calcul abordent cet aspect mais semblent peu fiables si on compare les valeurs prédites et celles déduites d'observations effectuées sur des ruptures réelles ou simulées d'ouvrages.

Des tests de rupture en conditions contrôlées sont couramment effectués au laboratoire d'hydrodynamique de l'École Polytechnique de Montréal pour valider certaines des techniques de prévision actuellement utilisées mais aussi les développer et apprendre de l'observation les mécanismes complexes qui gouvernent l'évolution des événements.

L'un de ces tests à grande échelle est décrit ici puis a servi à une confrontation entre les résultats obtenus par cinq méthodes différentes de prévision connues.

L'analyse met en évidence les facteurs qui, n'étant pas pris en compte dans les modèles actuels, expliquent peut-être le succès très moyen des prévisions actuelles. Elle permet de constater aussi que c'est la caractérisation géométrique de la brèche qui présente le plus d'incertitude tandis que le débit maximal prédit ne correspond jamais au juste temps de formation de la brèche et vice versa. Toutefois, l'observation devrait être étendue à d'autres essais sur des ouvrages de largeur différente par exemple.

Des effets d'échelles sont à considérer dans ce genre de test, tant du point de vue de la mise en place du matériau que de son comportement et devraient être pris en compte par tout lecteur voulant poursuivre l'interprétation. Mais rappelons que les résultats du test sont utilisables à leur vraie dimension et fournissent une base documentaire pour tous ceux qui seraient intéressés à valider leurs outils de calcul et de prévisions. Selon nos propres analyses, ils ne contredisent pas les résultats déjà disponibles en littérature mais sont très particuliers sur deux aspects: en regard du sol utilisé (moraine) tout d'abord pour lequel nous ne disposons d'aucun comparatif, puis parce que les conditions de l'essai s'apparentent à la réalité du début d'érosion lorsque le débordement ne fait que commencer. Cette phase est la plus critique car c'est celle qui introduit finalement le plus d'erreur sur le temps total de formation de la brèche. Notons aussi que le test ne tient pas compte de tout effet que pourrait avoir la couverture végétale courante sur le talus aval qui devrait ralentir l'érosion, du moins au début.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

C.I.G.B., 1989. La Moraine, Matériau de remblai et de fondation. *Tech. Act. Bulletin* 69. Commission Internationale des Grands Barrages.

CHICHE S., 1982. Érosion interne de la moraine dans les barrages en terre. Mémoire Maîtrise en Ingénierie (M.Ing.). École Polytechnique de Montréal, Québec, Canada.

CRISTOFANO E. A., 1965. Method of Computing Erosion Rate for Failure of Eartfill Dams. U. S. Bureau of Reclamation, Denver, CO.

FREAD D. L., 1984a. A Breach Erosion Model for Earthen Dams. *Report G-85-3*, General Series, Utah Research Laboratory, 281-310.

FREAD D. L., 1984b. DAMBRK: The NWS Dam Break Flood Forecasting Model. National Weather Service (NWS) *Report*, NOAA, Silver Spring, MA.

FREAD D. L., 1984c. A Breach Erosion Model for Earthen Dam. National Weather Service (NWS) Report, NOAA, Silver Spring, MA.

FREAD D. L., 1988. The NWS DAMBRK Model. *Theorical Background I User Documentation*, National Weather Service (NWS), NOAA, Silver Spring, MA.

HARRIS G. W., WAGNER D. A., 1967. Outflow form Breached Earth Dams. Unpublished B. Sc. Thesis. Department of Civil Engineering, University of Utah, Salt Lake City, UT.

QUIROGA C. A., SINGH V. P., 1987. A Dam-Breach Erosion Earthfill Model: II – Application. *Water Resources Management*, 1, 199-221.

SINGH V. P., QUIROGA C. A., 1987. A Dam-Breach Erosion Model: I – Formulation. *Water Resources Management*, 1, 177-197.

SINGH V. P., SCARLATOS P. D., 1989. Breach Erosion of Eartfill Dams and Flood Routing : BEED Model. Misellaneous Paper EL-79-6, *Military Hydrology Report 17*, Environnemental Laboratory, U.S. Army Engineer waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.

ZERROUK N. E., 2004. Étude hydraulique et géotechnique de la formation de brèches dans un barrage en terre. Th. Ph. Doct. (Génie Civil). École Polytechnique de Montréal, Québec, Canada, 298 p.

ZERROUK N. E., MARCHE C., 2001. Les prévisions des brèches de rupture des barrages en terre restent difficiles. *Can. J. Civil Eng.*, 28, pp. 120-132.

ZERROUK N. E., MARCHE C., 2004. Une modélisation théorique nouvelle de la rupture par submersion d'une digue en terre et sa validation. *Can. J. Civil Eng.*, 31, pp. 797-812.