

Etat de l'art de la modélisation des ruptures par surverse de digues et barrages en remblai

State of the art in dykes and embankment dams failures by overtopping modelling.

Jean-Robert Courivaud

EDF R&D, LNHE
6, quai Wattier
78400 Chatou
Tel. 01 30 87 70 21
Fax 01 30 87 81 09
Courriel : jean-robert.courivaud@edf.fr

Résumé

Les ouvrages hydrauliques en remblai, digues ou barrages, ne sont généralement pas aptes à supporter un écoulement important de surverse. Ainsi chaque année dans le monde, y compris dans les pays occidentaux et en France, des digues ou barrages en remblai se rompent par surverse, mettant en danger des populations et causant des dommages économiques parfois considérables. Etre capable de prédire de manière fiable par la modélisation les paramètres caractérisant une rupture est donc un élément essentiel pour mettre en place les dispositifs d'alerte et de secours les plus efficaces. Face à ce défi, l'ingénieur est aujourd'hui encore assez démuné en outils de modélisation industriels fiables. Après avoir fait le point sur la compréhension actuelle des principaux processus physiques mis en jeu lors de la rupture par surverse d'un ouvrage en remblai, avec les zones d'ombre qu'il reste à éclaircir, nous présentons les différentes approches industrielles de modélisation qui s'offrent aujourd'hui à l'ingénieur : formules empiriques et modèles basés sur la physique, en insistant sur les incertitudes importantes de ces approches et la faiblesse de leur validation. Nous exposons ensuite les développements en cours dans le domaine des données de validation ainsi que quelques axes de recherche sur la modélisation. En guise de conclusion, nous donnons quelques recommandations relatives aux limites et à l'interprétation des résultats de ce type d'étude.

Abstract

Embankment dams or dykes are generally not able to endure a large overtopping flow. Thus several embankment dykes or dams fail by overtopping every year in the world even in Western countries and France, endangering populations and causing economic damages which are sometimes considerable. Being able to give a reliable prediction of failure characteristics by modelling is therefore essential to define alert and emergency systems. Faced with that challenge, engineers are still today relatively without any reliable industrial models. After a point on the present comprehension of the main physical processes and the grey areas which need to be cleared up, we present the different industrial modelling approaches that can be used by engineers: empirical relations and physically based numerical models. We point out the large uncertainties of these approaches and their lack of validation. Then we present current developments on validation data and some future research directions in modelling. As a conclusion we give some recommendations regarding

limits and interpretation of the results of that studies.

Mots-clés : digues, barrages en remblai, rupture par surverse, modélisation

Keywords : *dykes, embankment dams, failure by overtopping, modelling*

1. Les enjeux d'une prédiction fiable des ruptures de digues par surverse

Les événements de fortes crues qui se sont produits en Europe au cours des dernières années ont entraîné un grand nombre de ruptures de digues par surverse et/ou érosion interne, avec des conséquences parfois tragiques (digue d'Aramon, septembre 2002), et très souvent des dégâts matériels considérables. Dans plusieurs pays occidentaux (Etats-Unis, Canada, pays scandinaves notamment), on considère qu'une des conséquences possibles du changement climatique serait d'augmenter le risque d'événements de crues extrêmes dépassant les crues de dimensionnement des ouvrages et d'augmenter ainsi le risque de surverse et donc de rupture de ces ouvrages.

Face à ces risques touchant directement la sécurité des biens et des personnes, un certain nombre de questions se posent, relatives au comportement de l'ouvrage soumis à un événement de crue extrême :

- Est-ce que l'ouvrage va rompre ? Si l'on ne peut pas répondre par oui ou par non, peut-on néanmoins estimer une probabilité de rupture ?
- De quel temps d'alerte dispose-t-on pour sauver les populations et éventuellement les biens matériels ?
- Quel est l'hydrogramme de l'écoulement passant à travers la brèche ?
- Peut-on renforcer les ouvrages pour qu'ils résistent mieux à un écoulement de surverse ?

Si apporter des réponses fiables à ces questions paraît aujourd'hui indispensable, l'ingénieur ne s'en trouve pas moins, encore aujourd'hui, relativement démuné en terme d'outils pour y répondre. Nous allons présenter la situation de l'état de l'art, tant au niveau de la compréhension des processus physiques que de la modélisation, en insistant sur les voies qu'il paraît essentiel d'approfondir pour progresser.

2. Remarque préliminaire

Les ouvrages en remblai que l'on considère dans cet article sont soit des digues, soit des barrages en remblai. Il en découle que selon le type d'ouvrage, la surverse peut provenir soit d'un écoulement latéral (digues de canaux par exemple), soit d'un écoulement frontal (barrages ou certaines digues de protection contre les crues). L'état actuel des connaissances sur les processus qui gouvernent l'érosion d'un ouvrage en remblai soumis à un écoulement de surverse, qu'il soit frontal ou latéral, ne permet pas de distinguer des comportements fondamentaux sensiblement différents selon le type d'ouvrage.

Même si la situation actuelle des digues et barrages en remblai français laisse envisager des comportements différents entre des barrages en remblai relativement récents, munis de dispositifs d'étanchéité et de protection des parements et des digues souvent plus anciennes constituées généralement de matériaux homogènes sans dispositifs d'étanchéité, les cas de rupture qui se sont produits dans le monde depuis une centaine d'année et qui sont utilisés pour la compréhension et la modélisation de ces processus ne mettent pas clairement en évidence la nécessité d'introduire des différences dans les méthodologies pour traiter un problème de rupture de digue ou de rupture de barrage. On trouve en effet dans ces cas de rupture, parmi les barrages comme parmi les digues, des ouvrages anciens peu résistants à l'érosion ou au contraire des ouvrages récents construits dans les règles de l'art, des cas de surverse avec un volume d'eau retenu assez faible, ayant entraîné une baisse rapide du niveau d'eau dans la brèche, comme des cas de surverse avec un volume d'eau à l'amont très important qui a engendré un élargissement latéral et un débit maximum de brèche très élevés.

La description des principaux processus physiques qui gouvernent une érosion par surverse, présentée ci-après, reste donc valable pour l'ensemble des ouvrages en remblai.

En ce qui concerne les modélisations, qu'il s'agisse de formules empiriques ou de modèles numériques basés sur la physique, les travaux de développements de ces outils ont jusqu'à présent principalement porté sur les ruptures de remblai subissant un écoulement frontal de surverse. Aucune modélisation spécifique n'ayant été développée pour les cas de digues subissant un écoulement latéral de surverse, l'ingénieur est donc amené à adapter l'utilisation des outils existants à ce cas particulier. Des éléments seront présentés ci-après sur ce point.

3. Le problème physique à résoudre

Le problème physique à résoudre est la prédiction de l'évolution dans le temps et l'espace d'un écoulement de surverse sur un ouvrage en remblai donné, susceptible de subir une érosion. Dans ce type de situation, l'ouvrage est soumis à deux types d'écoulement : un écoulement externe, dit écoulement de surverse, qui court sur la crête et le parement aval de l'ouvrage et un écoulement interne qui se développe plus ou moins dans le corps de l'ouvrage en fonction des caractéristiques de celui-ci : nature du matériau, compactage, présence de défauts, etc. On connaît mal aujourd'hui la façon dont l'écoulement interne participe au processus d'érosion du parement aval lors d'une surverse.

L'écoulement passe en régime torrentiel à l'amont immédiat de la crête de l'ouvrage (cf. Photo 1). Sa vitesse est alors de l'ordre de 1 m/s. Si le débit spécifique passant au dessus de la crête est suffisamment important, la vitesse de l'écoulement de surverse au pied du parement aval atteint environ 10 m/s, engendrant alors un processus d'érosion.

Les conditions d'écoulement de surverse (hauteur, durée, débit spécifique de la surverse) qui génèrent une érosion importante du parement aval, voire la formation d'une brèche sont, en fonction du type de remblai, très mal connues d'un point de vue quantitatif et pratiquement inexistantes dans la littérature.

Des valeurs de hauteurs de surverse critiques, à partir desquelles commence l'érosion du parement aval, ont été proposées en fonction d'une description des barrages en trois catégories (Froehlich D., 1995, cf. réf [2] et tableau 1 ci-après).



Photo 1 : Zone de passage en régime torrentiel dans un écoulement de surverse (cf. réf [1]).

Qualité de construction du barrage	Description du barrage	Hauteur de surverse critique
Bonne	Parements amont et aval en bon état, pratiquement pas de fuites, pas de tassement notable	0,6 m
Moyenne	Fuites modérées, quelques tassements en crête, quelques érosions sur les parements	0,3 m
Mauvaise	Fuites importantes, érosions sur les parements, des affaissements significatifs sur la crête, fissurations dans le remblai	0,0

Tableau 1 : Hauteurs de surverse critiques

Il doit être noté que les valeurs du tableau 1 ci-contre correspondent à des hauteurs de surverse critiques de début d'érosion du parement aval et non à des hauteurs de surverse critiques de formation d'une brèche.

On conservera comme ordre de grandeur que la plupart des ouvrages en remblai récents (par ex. ceux construits après la seconde guerre mondiale dans les pays développés) peuvent supporter un écoulement de surverse de 0,3 m à 0,5 m durant quelques heures avant de rompre.

Il existe quelques cas d'ouvrages qui ont résisté à un écoulement de surverse très important sans qu'il n'y ait de rupture : c'est notamment le cas du barrage de Trairi, au Brésil, qui était une digue de 19 m de haut, et qui a supporté une surverse de 1,2 m de haut durant 5 heures sans rompre (cf. réf [4]).

Lorsqu'une érosion s'initie, elle se produit généralement au droit d'un ou de plusieurs points bas de la crête de l'ouvrage, ou également en des zones de convergence de l'écoulement sur le parement aval (discontinuités, zones plus érodables, ...).

L'érosion va ensuite se poursuivre en deux grandes phases (Wahl T., 1998, cf. *réf* [3]) :

- une première phase dite d'initiation de la brèche, qui débute lorsque démarre l'érosion du parement aval et s'achève lorsque l'érosion a atteint l'arête amont de la crête de l'ouvrage ;
- une seconde phase dite de formation de la brèche qui débute à la fin de la phase d'initiation et s'achève lorsque la brèche a atteint ses dimensions finales.

On doit noter que l'on parle de rupture de l'ouvrage seulement dans le cas où l'érosion entre dans la phase de formation de la brèche (i.e. une section transversale complète de la crête est emportée). Tant que l'on reste dans la phase d'initiation de la brèche, l'ouvrage subit une érosion, mais il conserve sa capacité à retenir l'eau qui est en amont.

La première phase d'initiation de la brèche se caractérise par une érosion qui démarre généralement au voisinage du pied du parement aval et qui progresse ensuite vers l'amont, sous la forme d'une érosion régressive. Ce processus décrit généralement bien l'érosion des remblais en matériaux cohésifs. Pour les remblais constitués d'enrochements, l'érosion peut également s'initier au niveau de l'arête aval de la crête et se propager vers l'aval en descendant sur le parement.

Dans la plupart des cas, cette phase d'initiation de la brèche est caractérisée, selon un profil transversal de l'ouvrage, par une érosion en marches d'escalier, correspondant à une succession de profils quasi verticaux où l'écoulement est un jet plongeant et de vasques horizontales (Wahl T, 1998 cf. *réf* [3]). Ces marches d'escalier se développent à l'intérieur de « couloirs » d'érosion, bordés par des sections moins rapidement érodées. Ces processus ont été bien mis en évidence, à la fois sur des cas réels de rupture de barrages (surverse sans rupture du barrage de Trairi, cf. *réf* [4], cas de rupture du barrage d'Euclides da Cunha, cf. *réf* [5]), sur des essais à grande échelle (programme norvégien d'essais de rupture de remblais à grande échelle, cf. photo 2 ci-après) et sur des modèles physiques à petite échelle (essais réalisés par HR Wallingford dans le cadre du projet européen IMPACT notamment).



Photo 2 : Erosion du parement aval durant la phase d'initiation de la brèche (cf. réf [1])

La phase de formation de la brèche peut être divisée en deux parties :

- une première période d'approfondissement vertical de la brèche sur une largeur limitée, généralement de l'ordre de la hauteur de l'ouvrage. Cette phase d'approfondissement s'arrête soit au niveau du toit des fondations si celles-ci sont peu érodables soit à l'intérieur même des fondations, voire jusqu'au bed-rock si les fondations sont érodables.

- Une seconde période où la brèche poursuit son expansion latéralement jusqu'à ce que la section de passage s'équilibre avec le débit (cf. photo 3 ci-après). Durant cette phase d'élargissement, les parois de la brèche sont généralement pratiquement verticales.



Photo 3 : Brèche dans ses dimensions finales (cf. réf [1])

La forme trapézoïdale de la section des brèches, telle que souvent mentionnée dans la littérature est généralement due à des éboulements qui ont eu lieu après la fin de cette phase d'élargissement. La vitesse d'élargissement de la brèche, qui peut atteindre quelques mètres par minute dépend très fortement des paramètres suivants :

- o Cohésion des matériaux constituant le remblai ;
- o Erodabilité des fondations ;
- o Volume d'eau retenu en amont.

Ainsi, les cas les plus défavorables sont ceux où l'on trouve à la fois un matériau de remblai peu cohésif, des fondations facilement érodables et un volume d'eau retenu en amont important. En revanche, dans le cas où le remblai présente un noyau épais très cohésif, une fondation très résistante à l'érosion et un volume d'eau retenu faible permettant une baisse rapide du niveau à l'amont, la brèche pourra garder une largeur limitée et entraînera un débit maximum à l'aval beaucoup plus faible.

4. Les approches industrielles actuellement à la disposition de l'ingénieur et leurs insuffisances

Deux types d'approches ont été développés pour prédire les caractéristiques des ruptures d'ouvrages en remblai, par surverse ou érosion interne :

- des formules empiriques qui déterminent les paramètres de brèche (débit maximum de brèche, largeur de brèche, durée de formation de la brèche, pente des parois de la brèche) à partir d'un nombre très limité de paramètres, généralement la hauteur du remblai et le volume du réservoir (ces formules ont été conçues initialement pour des cas de surverse ou d'érosion interne de barrage).
- Des modèles numériques qui déterminent l'hydrogramme de brèche à l'aide de modélisations déterministes cherchant à représenter les processus physiques réels.

4.1 Les formules empiriques de paramètres de brèche

Les formules empiriques publiées dans la littérature (Courivaud J.-R., 2003 cf. réf [6]) permettent de déterminer les paramètres de brèche suivants :

- débit maximum de brèche (Q_p). Les formules sont de la forme :
$$Q_p = \alpha H^\beta V^\delta$$
, avec H : la hauteur du remblai, V : le volume du réservoir et α , β , δ des coefficients empiriques calés par régression linéaire (généralement dans des espaces log-log) sur des échantillons de cas réels de rupture de barrage.
- Durée de formation de la brèche (T_f) : les auteurs ont soit fourni de simples encadrements (ex. : 0,25 heure $\leq T_f \leq$ 1 heure d'après Singh et Snorrason, 1982), soit fourni des formules qui dépendent de la hauteur du barrage et/ou du volume du réservoir. Ces formules ont été établies selon une démarche analogue à celle utilisée pour les formules de débit maximum de brèche.
- Largeur finale de la brèche (B) : les auteurs ont soit fourni des encadrements dépendant de la hauteur du barrage, soit établi des formules dépendant de la hauteur du barrage et du volume du réservoir, analogues aux formules de débit maximum de brèche.
- Pente latérale de brèche (Z) : la plupart des auteurs ne donnent que des estimations ou des encadrements pour ce paramètre.

Parmi ces paramètres de brèche, les plus importants vis à vis de la sécurité des biens et des personnes sont la durée de formation de la brèche et le débit maximum de brèche. La durée de formation de brèche a des implications directes dans la définition des temps et procédures d'alerte, tandis que le débit maximum de brèche est un paramètre important pour le calcul de la propagation de l'onde de rupture vers l'aval. Les formules empiriques de durée de formation de brèche ne sont utilisées que pour avoir une idée très grossière de ce paramètre, la plupart des auteurs s'accordant sur le fait qu'elles présentent des incertitudes très

importantes (Wahl T., 1998, cf. réf [3]).

Les formules de débit maximum de brèche sont les plus utilisées parmi les formules empiriques de paramètres de brèche. Il s'agit de formules dont les coefficients ont été calés par régression linéaire à partir d'échantillons de cas réels de rupture de barrage par surverse et par érosion interne. Ces formules ont l'avantage de ne faire appel qu'à deux paramètres d'entrée, généralement bien connus : la hauteur du barrage et le volume du réservoir. Elles sont donc très simples et très rapides à utiliser. En revanche, elles présentent un certain nombre de faiblesses importantes qui conduisent à des incertitudes très élevées et un manque sévère de fiabilité (ce qui leur a valu l'appellation en anglais de *quick and dirty formulae*) :

- les échantillons de données qui ont servi à caler leurs coefficients sont généralement restreints à une dizaine de cas de ruptures de barrages en remblai. Les valeurs de débit maximum de brèche de ces cas réels de rupture sont elles-même parfois peu fiables. De manière générale, les auteurs qui ont établi ces formules n'ont pas apporté la preuve dans leurs publications d'une critique rigoureuse des données de leurs échantillons.
- Les échantillons de données mélangent des cas de ruptures de remblai par surverse et par érosion interne. Est-il cohérent, compte tenu des différences entre ces deux processus, d'établir des formules de débit maximum de brèche à la fois valables pour des ruptures par surverse et des ruptures par érosion interne ? Cette question n'est pas traitée dans la plupart des publications.
- Les formules empiriques publiées jusqu'à présent ne tiennent compte que de deux paramètres : la hauteur du remblai et le volume du réservoir. Elles ne tiennent aucun compte des facteurs suivants qui sont très influents sur le débit maximum de brèche : la cohésion et le compactage du matériau qui constitue le remblai, l'érodabilité de la fondation, la possibilité de formation de plusieurs brèches, le volume de la crue entrante.

La variabilité de quatre formules empiriques de débit maximum de brèche a été analysée (Courivaud J.-R., 2003, cf. réf [7]). Elle est illustrée par les figures 1 à 4 ci-après. Sur chaque figure, chaque point correspond à un couple de valeurs [X = débit maximum de brèche d'un cas de rupture déterminé par la formule, Y = débit maximum de brèche de référence du cas correspondant]. Pour aider à l'interprétation de ces points, la droite $y=x$, sur laquelle se trouveraient tous les points dans le cas idéal où les valeurs de débit maximum de brèche de référence et calculées seraient égales, a été représentée sur chaque figure.

Cette comparaison a été réalisée à partir d'un échantillon de onze cas réels de ruptures de barrage en remblai par surverse, pour lesquels les valeurs des paramètres hauteur du barrage, volume du réservoir et débit maximum de brèche ont fait l'objet d'une critique et d'une validation approfondie. D'autre part, cet échantillon de onze cas de rupture comporte à la fois des grands et des petits réservoirs (volume variant de $0,62 \text{ hm}^3$ à 695 hm^3) et des hauteurs de barrages variant de 15,2 m à 57,3 m. Il contient à la fois des ouvrages construits avec des moyens modernes et des ouvrages construits essentiellement « à la main ».

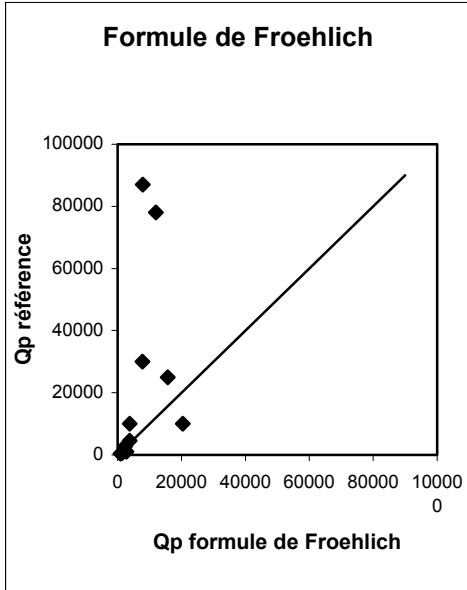


Figure 1 : Variabilité de la formule de Froehlich.

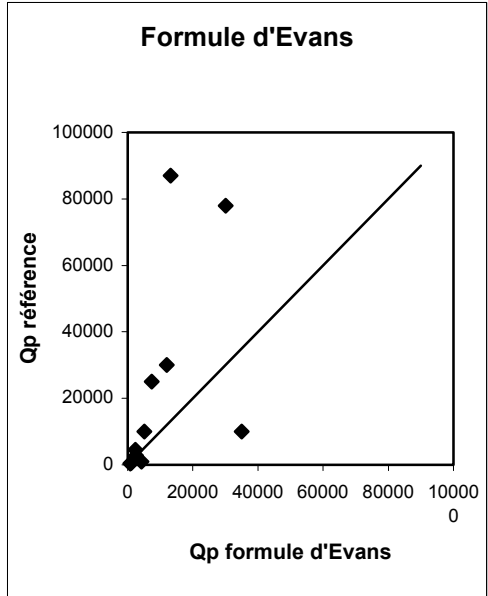


Figure 2 : Variabilité de la formule d'Evans

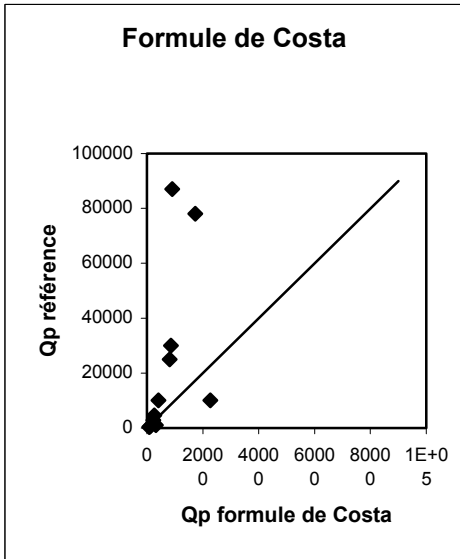


Figure 3 : Variabilité de la formule de Costa

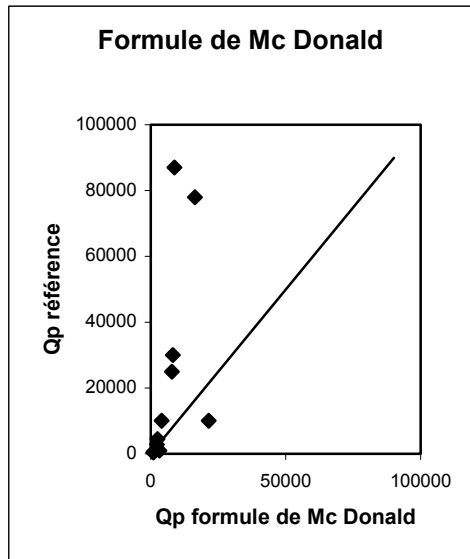


Figure 4 : Variabilité de la formule de Mc Donald

Ces figures mettent en particulier en évidence une tendance générale à sous-estimer les débits maxima de brèche, cette sous-estimation étant particulièrement importante pour les forts débits. La non prise en compte des différences de comportement des matériaux du remblai et de la fondation face à l'érosion est l'un des facteurs explicatifs prépondérants de ces sous-estimations.

L'application de ce type de formule au cas d'une brèche par surverse dans une digue n'a pas fait l'objet de développement d'une méthodologie générale bien définie. L'ingénieur confronté au problème de l'estimation du débit maximum de brèche à travers une digue soumise à une surverse doit donc imaginer au cas par cas une méthodologie satisfaisante pour appliquer ces formules. Deux exemples de méthode sont présentés ci-après, mais ils ne prétendent pas répondre à tous les cas de figure et ne dispensent pas d'une réflexion adaptée à chaque configuration.

Les formules empiriques de débit maximum de brèche font généralement appel à seulement deux paramètres : la hauteur du remblai et le volume du réservoir. Dans le cas d'une surverse de digue, il n'y a généralement plus de notion de réservoir comme pour un barrage. La difficulté consiste donc à trouver un moyen cohérent sur le plan de la physique pour remplacer le paramètre volume de réservoir par un volume équivalent, calculé à partir des données connues de l'écoulement amont.

Si l'on considère le cas d'une digue soumise à un écoulement de surverse venant d'une rivière en crue, deux exemples de calcul du volume équivalent pour les formules empiriques sont donnés ci-dessous.

1^{er} exemple

On considère que le volume équivalent est égal au volume d'eau s'écoulant à travers la brèche durant sa phase d'extension, V_B .

Soient T_i et T_f respectivement les temps de début de l'érosion et de fin d'extension latérale de la brèche. $T_f - T_i$ peut être estimé par des formules empiriques, par exemple par la formule de l'USBR ou la formule de Von Thun et Gillette (Courivaud J.-R., 2003, cf. réf [6]).

Si l'écoulement n'est pas retenu à l'aval de la digue par d'autres ouvrages, V_B peut

être estimé par la formule :
$$V_B = \int_{T_i}^{T_f} Q_{\text{tubedecourant}}(t) dt$$

$Q_{\text{tube de courant}}$ est la part du débit de la crue passant à travers la brèche. Elle peut être estimée assez précisément à l'aide d'un modèle numérique bidimensionnel par le calcul du débit dans une section de contrôle située en amont. En l'absence de modèle numérique bidimensionnel, on pourra généralement estimer un ordre de grandeur réaliste de ce débit en fonction de la configuration du lieu.

2^{ème} exemple

Comme dans le premier exemple, on considère que le volume équivalent est égal au volume d'eau s'écoulant à travers la brèche durant sa phase d'extension, V_B .

On suppose ici une configuration où une zone de stockage se trouve à l'aval de la digue. Cette zone de stockage est encadrée par des remblais dont l'altitude du point bas est supérieure à l'altitude de la crête de la digue.

En conséquence, toute l'eau qui va s'écouler à travers la brèche durant sa phase d'extension va rester dans la zone de stockage sans pouvoir s'écouler à l'extérieur jusqu'à ce que les niveaux d'eau à l'amont et à l'aval de la brèche s'égalisent. A ce moment là, l'écoulement à travers la brèche s'interrompra puisqu'il n'y aura plus de différence de niveau d'eau.

Durant toute la phase d'extension de la brèche, on fait l'hypothèse que le niveau d'eau de surverse est constant, égal à Z_{surverse} .

$$V_B \text{ sera alors déterminé par : } V_B = \min \left(V_{\text{zone de stockage}}, \int_{T_i}^{T_f} Q_{\text{ubedecourant}}(t) dt \right), \text{ avec :}$$

$V_{\text{zone de stockage}} = S_{\text{zone de stockage}} \cdot H_{\text{zone de stockage}}$, et :

$S_{\text{zone de stockage}}$, la superficie de la zone de stockage,

$H_{\text{zone de stockage}}$, la hauteur d'eau moyenne dans la zone de stockage.

$H_{\text{zone de stockage}} = Z_{\text{surverse}} - Z_{\text{fond zone de stockage}}$

4.2 Les modèles basés sur la physique

L'approche des modèles numériques basés sur la physique consiste à représenter à l'aide d'une modélisation mathématique déterministe les principaux processus physiques mis en jeu lors de la rupture d'un ouvrage en remblai par surverse et à calculer ainsi l'évolution dans le temps des principaux paramètres que l'on recherche : débit à travers la brèche et largeur de brèche.

Il existe un très grand nombre de modèles de ce type à travers le monde, dits industriels dans la mesure où ils sont soit diffusés, soit utilisés en interne pour des études appliquées par les organismes qui les ont développés. Ce grand nombre de modèles industriels basés sur la physique présente cependant les caractéristiques voisines suivantes :

- des écarts importants entre les hypothèses physiques contenues dans ces modèles et les processus réels ;
- une faiblesse générale, voire parfois l'absence, de leur validation.

Les modèles existants, à l'exception du modèle américain SITES (Temple D.M. & Hanson G., 1994, cf. *réf* [8] et Temple D.M. & Moore J., 1994, cf. *réf* [9]), ne représentent pas le processus d'érosion régressive dans la phase d'initiation de la brèche. La plupart des modèles représentent l'érosion du barrage avec les lois du transport par charriage en rivière. Certains modèles, comme le modèle américain BREACH (Fread D.L., 1988, cf. *réf* [10]) utilisent une loi de transport solide plus adaptée aux fortes pentes, telle la loi de Smart, mais les limites d'utilisation de ce type de lois restent toujours très éloignées des conditions d'un écoulement de

surverse, caractérisé par des jets plongeants et des écoulements de l'ordre de 10 m/s en pied de parement aval. Par ailleurs, le transport par charriage, qui correspond à un entraînement des grains (sables ou graviers) au fond du lit d'une rivière, est très éloigné des processus d'arrachements de blocs entiers de matériaux qui ont lieu lors d'une rupture de barrage. Enfin, les conditions hydrodynamiques des écoulements interne et de surverse et leurs conséquences sur les processus d'érosion sont pas ou mal représentées par les modèles industriels actuels.

Hormis l'éloignement entre leurs hypothèses physiques et les processus réels, les modèles industriels actuels souffrent également tous d'un manque de validation. Pour certains modèles, les dossiers de validation se limitent à des comparaisons à d'autres modèles du même type et à des vérifications sur des cas schématiques, pour d'autres modèles, la validation s'est basée sur les données de modèles réduits réalisés en laboratoire à petite échelle, sans pouvoir quantifier les effets d'échelle, et lorsqu'une validation est tentée sur des données de cas réels, elle consiste souvent à comparer les données de la rupture du barrage de Teton (érosion interne) à un modèle développé pour représenter une rupture par surverse.

Dans le cadre du projet européen CADAM (cf. *réf* [11]), une intercomparaison de modèles a été réalisée à partir des données d'un modèle réduit de rupture réalisé en laboratoire. Le modèle réduit représentait un remblai en sable d'environ 30 cm de haut. Les débits maximum de brèche mesurés étaient de l'ordre de 20 à 30 l/s. L'intercomparaison a mis en évidence des écarts variant jusqu'à 1 à 4 entre modèles numériques et essai de laboratoire. Mais que peut-on conclure de ce type de validation ? Quel lien y a-t-il entre les processus observés sur le modèle réduit, pour des débits de 20 l/s et les cas réels de rupture de barrage ou de digues, avec des débits atteignant 80 000 m³/s ?

Actuellement, les effets d'échelle ne sont pas encore bien connus, mais on peut raisonnablement avoir des doutes sur la conservation du rapport entre forces de cohésion et forces d'arrachement des grandes échelles jusqu'aux petites échelles. Des travaux dans ce domaine sont réalisés actuellement par HR Wallingford dans le cadre du projet européen IMPACT, en comparant des essais de rupture par surverse et par érosion interne réalisés à grande échelle (remblais de 5 à 6 m de haut) et des essais à petite échelle (remblais de 30 à 40 cm de haut). Les résultats de ces travaux permettront peut-être de discriminer les processus que les modèles réduits sont aptes à reproduire quantitativement, des processus qui ne peuvent être étudiés qu'à l'échelle 1.

5. Les développements en cours dans le domaine des données de validation

La constitution de données de validation fiables et complètes est aujourd'hui un point de passage obligé pour parvenir à développer des outils de modélisation des ruptures de remblais par surverse industriels et fournissant des incertitudes

maîtrisées et acceptables. Ces données de validation ont deux fonctions principales :

- permettre une analyse des processus en faisant ressortir les phénomènes prépondérants ; montrer l'étendue des configurations différentes de barrages et de cas de ruptures pouvant exister dans la réalité ; développer le sens physique du modélisateur et en particulier donner une vision pertinente du degré de précision qu'il est justifié d'attendre des modèles numériques.
- Permettre une validation rigoureuse des modèles numériques comme des formules empiriques, à partir d'un échantillon étendu de données complètes et fiables.

Idéalement, ces données de validation devraient être de deux types différents :

- des données de cas réels de rupture d'ouvrages en remblai par surverse. Ces données présentent l'avantage de pouvoir tester les modèles sur des cas comparables à ceux pour lesquels ils sont utilisés de manière industrielle, c'est à dire calculer les paramètres de rupture pour des cas réels, à l'échelle 1, en prenant en compte leur diversité et leur complexité. La difficulté est de parvenir à constituer des cas tests de validation complets et fiables.
- Des données d'essais à grande échelle. L'avantage de ces essais est d'être très bien documentés et de fournir des données très fiables. En revanche, ces essais nécessairement réalisés en nombre limité et ayant des dimensions également limitées, ne peuvent pas, à eux seuls, fournir une vue d'ensemble de la disparité et de toute la complexité des cas réels.

Dans le cadre de son effort de recherche dans ce domaine, EDF a travaillé dans ces deux directions en engageant le développement d'une base de données de cas réels de rupture de barrages en remblai et de digues par surverse, par érosion interne et de barrages en remblai ou de digues ayant surversé sans rompre. Cette base de données, réalisée dans le cadre d'un projet international encadré par CEATI/DSIG¹ contiendra à la fois des données de cas réels et les données du Projet norvégien « Stability and Breaching of Embankment Dams ». Ce projet norvégien a consisté à réaliser, entre octobre 2001 et septembre 2003, sept essais de rupture par surverse ou érosion interne d'un remblai de 5 à 6 m de haut.

5.1 Base de données de cas réels de ruptures de barrage conçue pour la validation des modèles

La base de données de cas réels de rupture de barrage développée actuellement par EDF est conçue spécifiquement pour servir à la validation des modèles numériques et des formules empiriques. Elle est constituée de « fiches » décrivant chaque cas de rupture, cas réel ou essai à grande échelle. Etant dédiée à la validation, cette base contiendra exclusivement des cas suffisamment bien

¹ CEATI : Canadian Electricity Association Technology ; DSIG : Dam Safety Interest Group.

renseignés pour fournir à la fois les données d'entrée et les données de validation des modèles, ce qui, de fait, limitera le nombre de cas présents dans cette base. Une vingtaine de cas, incluant les essais norvégiens à grande échelle, est prévue pour la version de cette base de données qui sera disponible fin 2005.

Cette base de données se distingue des bases existantes par deux particularités :

- afin d'assurer le maximum de fiabilité aux données qu'elle contient, cette base mentionne l'ensemble des valeurs fournies par les différentes sources bibliographiques disponibles pour chacun des paramètres décrivant chaque cas. Ceci permet de fournir une idée assez précise du degré de fiabilité des valeurs fournies pour un même paramètre et d'identifier des erreurs ou des incohérences entre les valeurs fournies par les différentes sources bibliographiques.
- Pour chaque cas, une partie « discussion » permet de fournir, à partir d'éléments parfois objectifs, parfois subjectifs, un jugement sur la valeur la plus probable de chaque paramètre avec un indice de confiance associé.

Ces deux caractéristiques permettent d'assurer la fiabilité des données des cas tests de validation qui en seront extraites.

Une première version de cette base a été réalisée sous forme d'un fichier Word (Courivaud J.-R., 2002, cf. *réf* [11]). Ses versions ultérieures seront accessibles via internet et disposeront d'une interface de recherche et d'un accès sécurisé.

5.2 Projet norvégien d'essais de stabilité et de ruptures de barrages à grande échelle

En 2001, un consortium norvégien composé de producteurs d'électricité, de bureaux d'ingénierie et d'universités, a lancé un projet de recherche intitulé "Stability and Breaching of Embankment Dams" destiné à réaliser des essais à grande échelle de rupture et de stabilité de remblais. Ce projet a également reçu le soutien financier de l'Union Européenne, via le projet IMPACT, et de plusieurs compagnies d'électricité européennes et canadiennes, dont EDF.

Huit essais, dont un essai de stabilité (sans rupture), deux essais de rupture par érosion interne et cinq essais de rupture par surverse ont été réalisés entre octobre 2001 et octobre 2003. Pour chaque essai, un remblai de 5 à 6 m de haut et de 30 m de long a été construit sur un site localisé à l'aval d'un barrage dont les vannes permettaient de contrôler le débit entrant dans la retenue formée pour les essais. Différents types de remblais ont été testés :

- remblais homogènes composés entièrement de moraine (mélange de matériaux à dominante cohésive, composant typique des noyaux des barrages norvégiens et canadiens) ;
- remblai homogène composé entièrement de sable ;
- remblais homogènes en enrochements ;
- remblais zonés, disposant d'un noyau en moraine et de recharges amont

et aval en enrochements.

Ces remblais ont été construits par couches selon les mêmes règles que les ouvrages réels.

Les données résultant de ces essais sont :

- plans des remblais.
- caractéristiques des matériaux composant les remblais.
- photographies et vidéos.
- Hydrogrammes amont et aval.
- Mesures de niveau d'eau à l'amont et à l'aval fonction du temps.
- Mesures de pressions intersticielles.
- Mesures de capteurs de position, permettant d'identifier l'instant où s'est produit l'érosion en plusieurs points du remblai.

Ces essais ont engendré une très grande quantité de données qui sont encore en cours de dépouillement et d'analyse. On peut cependant déjà énoncer certains résultats apportés par ces essais :

- dans la phase d'initiation de la brèche (érosion du parement aval) : le processus dominant est l'érosion régressive du parement aval, avec la formation de marches d'escalier, correspondant à une succession de profils quasi verticaux où l'écoulement est un jet vertical plongeant et de vasques horizontales. Ces marches d'escalier se développent à l'intérieur de « couloirs » d'érosion, bordés par des sections moins rapidement érodées.
- Dans la phase de formation de la brèche (expansion latérale), les essais semblent mettre en évidence (hypothèse à confirmer à l'heure actuelle) une érosion par l'écoulement à la base des parois verticales de la brèche. Cette érosion de la partie inférieure des parois de la brèche entraîne, au dessus, des zones en surplomb, qui tombent ensuite en bloc dans l'écoulement où elles sont diluées et emportées vers l'aval. Ces chutes de blocs en surplomb se sont généralement enchaînées de manière pratiquement alternée entre les deux côtés de la brèche.
- Dans le cas des remblais zonés, il semble que la vitesse d'élargissement de la brèche ait été conditionnée principalement par la progression de l'érosion du noyau. Pour l'ensemble des essais, nous disposerons de mesures des vitesses d'élargissement de brèche.

6. Les développements en cours dans le domaine de la modélisation : approches simplifiées ou modèles complexes ?

Afin d'améliorer la fiabilité des modèles numériques destinés à prédire les caractéristiques de la rupture d'ouvrages en remblai par surverse, deux approches de développement peuvent être envisagées :

- le développement de méthodes simples semi empiriques ou

conceptuelles, basées sur des hypothèses physiques fortes, très rapides à mettre en œuvre et donc peu chères ;

- le développement de modélisations fines des processus physiques et donc complexes, utilisant des méthodes numériques lourdes, plus longues à mettre en œuvre et donc plus chères mais visant des résultats plus précis.

Le principal défi du développement d'une méthode simple est de parvenir à concentrer un ensemble de processus complexes en un nombre très limité d'hypothèses physiques ou de représentations très simples, afin d'éviter l'écueil d'une incertitude trop importante. Pour cela, le modèle simple doit être nourri par des estimations fiables de phénomènes importants : conditions de surverse entraînant la formation d'une brèche ou vitesse d'élargissement de brèche par exemple.

Le développement de modélisations complexes devra parvenir à lever plusieurs verrous scientifiques :

- définition de lois d'érosion adaptées aux conditions d'écoulement de surverse et de brèche et également représentation réaliste des conditions hydrodynamiques.
- Couplage entre érosion externe sur le parement aval et érosion interne, due à l'écoulement à l'intérieur de l'ouvrage qui joue un rôle encore méconnu mais sans doute déterminant.
- Jeu de données d'entrée accessibles pour une utilisation industrielle : un modèle qui nécessite des données d'entrée que l'on n'est jamais capable de fournir ne peut pas être industriel.

Les modélisateurs, qu'ils soient engagés dans le développement de modèles simples ou complexes, doivent garder à l'esprit que la précision de leur modélisation sera nécessairement bornée par la précision des données de validation. Or l'examen des données de validation disponibles actuellement, montre que dans les cas de rupture ayant entraîné des débits maxima de brèche supérieurs à 1000 m³/s, on ne connaît au mieux que des ordres de grandeur fiables de ces débits. Ce qui signifie par exemple, pour un cas de rupture dont on connaît l'ordre de grandeur du débit maximum de brèche de 10 000 m³/s, que l'on est incapable de savoir si la valeur précise de ce débit était plutôt de 9000 ou de 11 000 m³/s.

Quelque soit le type de modélisation poursuivi, il est donc clair qu'actuellement, le seul objectif réaliste est de fournir des ordres de grandeur fiables des hydrogrammes de brèche, volumes déversés à l'aval, temps de formation de brèche. Fournir des débits à 10 m³/s près ou des temps à la minute près n'a aujourd'hui aucun sens. Il existe donc actuellement un écart important entre la précision des modélisations d'hydraulique fluviale, y compris les calculs d'ondes de submersion ou d'inondation et la précision des modélisations de brèches. L'étude de la sensibilité des calculs d'inondation à l'aval aux variations des hydrogrammes de brèche est donc un point clé qui devrait être étudié rigoureusement.

7. En guise de conclusion : quelques recommandations

L'ingénieur chargé d'une étude de rupture d'un ouvrage en remblai est donc actuellement pris entre deux contraintes contradictoires : d'un côté la nécessité de fournir des résultats aussi précis que ceux rencontrés habituellement dans les études d'hydraulique fluviale et de l'autre il ne dispose que d'outils prédictifs peu fiables qui fournissent des résultats entourés d'incertitudes importantes.

Bien que les recherches en cours permettent déjà de mieux comprendre certains processus physiques majeurs dans la rupture de remblais par surverse et laissent entrevoir une nouvelle génération de modèles plus performants d'ici quelques années, quelques idées fortes doivent guider les études actuelles :

- le seul objectif réaliste est d'obtenir des ordres de grandeur fiables des paramètres recherchés ; toute précision excessive n'a aucun sens.
- Les modèles basés sur la physique et les formules empiriques étant encore peu fiables, il ne faut pas hésiter à les intercomparer et à se raccrocher à des raisonnements simples mais très physiques. Il paraît important d'essayer d'encadrer le débit maximum de brèche en faisant un grand nombre de simulations permettant de faire varier les paramètres les plus sensibles et les moins bien connus. Ainsi peut-on obtenir comme résultat de l'étude non pas un hydrogramme de brèche mais un faisceau d'hydrogrammes qui permettra ensuite d'effectuer une étude de sensibilité sur les calculs d'inondation à l'aval.

8. Références bibliographiques

- [1] Projet Norvégien « Stability and Breaching of Embankment dams ». CD Rom des photos 2001-2002-2003.
- [2] Froehlich David C., 1995, "Embankment Dam Breach Parameters Revisited", *Water Resources Engineering*, Proceedings of the ASCE Conference on Water Resource Engineering, San Antonio, Texas, August 14-18, 1995, p.887-891.
- [3] Wahl, Tony L., 1998, "Prediction of Embankment Dam Breach Parameters A Literature Review and Needs Assessment", DSO – 98-004, Dam Safety Research Report, U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Dam Safety Office.

- [4] <http://www.dnocs.gov.br/barragens/Barragem%20do%20Grande%20do%20Norte/trairi.htm>
- [5] Bulletin CIGB n°82 : “Sélection de la crue de projet”
- [6] Courivaud J.-R., 2003, « Rupture des barrages en remblai par surverse – Synthèse de l’état de l’art sur la compréhension des processus physiques et sur la modélisation ». Rapport EDF HP-76/2002/002/B.
- [7] Courivaud J.-R., 2003, « Modélisation simplifiée de la rupture d’un barrage en remblai par surverse : formule empirique du débit maximum de brèche ». Rapport EDF HP-76/03/031/A.
- [8] Temple D.M. & Hanson G., 1994, “Headcut Development in Vegetated Earth Spillways”, *Applied Engineering in Agriculture*, vol. 10, n°5, 1994, American Society of Agricultural Engineers, p. 677-682.
- [9] Temple D.M. & Moore J., 1994, “Headcut Advance Prediction for Earth Spillways”, presented at the *1994 ASCE International Winter Meeting*, Paper n°94-2540, Atlanta, December 13-16, 1994, 19 p.
- [10] Fread D.L., 1988 (revised 1991), “BREACH: An Erosion Model for Earth Dam Failures”, National Weather Service, NOAA, Silver Spring, Maryland.
- [11] Projet européen CADAM (Concerted Action on Dambreak Modelling). CD Rom des résultats finaux. Septembre 2000.
- [12] Courivaud J.R., 2002, « Base de données de cas réels de ruptures de barrage en remblai par surverse. Version 1.0 ». Rapport EDF HP-76/02/061/A.