

Rupture de barrage : validation des modèles numériques du Cemagref dans le cadre de CADAM

André Paquier

La comparaison des méthodes numériques de simulation des ruptures de barrages constitue une démarche essentielle pour l'amélioration des performances des opérations de modélisation. Après avoir décrit la démarche générale du programme européen de recherche CADAM (Concerted Action for Dam Break Waves), l'auteur présente ici les logiciels et les résultats obtenus par le Cemagref dans le cadre de ce programme. Cinq cas tests sont détaillés et les résultats sont commentés.

CADAM (Concerted Action for Dam Break Waves) a été une action concertée subventionnée par le 5^e Programme cadre de recherches développement de l'Union européenne qui visait à faire un point sur les méthodes disponibles pour modéliser les conséquences d'une rupture de barrage. Les principales tâches accomplies ont été, d'une part, la détermination d'un ensemble de cas tests représentant les différents processus ou situations rencontrés lors d'un tel événement et, d'autre part, la comparaison des résultats des différents modèles numériques entre eux et avec les données de référence.

Le travail (indiqué ci-après par le nom générique « CADAM ») commencé en 1996 sous l'impulsion du Laboratoire national d'hydraulique d'EDF avec la création d'un groupe de travail « Ondes de rupture de barrage » au sein de la section « Hydraulique fluviale » de l'AIRH (Association internationale pour la recherche en hydraulique) s'est poursuivie sur deux ans (1998-2000) dans le cadre de l'action concertée CADAM. Chacune des étapes de travail se terminait par un atelier (ayant eu lieu respectivement à Wallingford, Munich, Milan, Zaragoza) rassemblant, outre les participants du projet, de nombreux chercheurs et responsables de la gestion de ce type de risque, en majorité, ressortissants de l'Union européenne. Les participants eux mêmes provenaient de neuf pays (Royaume-Uni, Belgique, Allemagne, Espagne, Suède, Portugal, Italie, Pologne, France) et de seize universités, entre-

prises ou instituts de recherche. Les différents documents produits (actes des ateliers, rapport final du projet, guide, données relatives aux cas tests étudiés, etc), la plupart rassemblés dans un CD-Rom (CADAM, 2000) sont disponibles soit auprès de la Commission européenne soit sur le site web de Hydraulic Research Wallingford (www.hrwallingford.co.uk), pilote du projet. On pourra aussi se référer à diverses communications (par exemple Galland [1999]; Soares Frazao and Zech [1999]).

Le Cemagref a été un des premiers participants de cette action de recherche et a activement collaboré. Nous présentons ci-dessous plus spécifiquement les résultats obtenus par le Cemagref dans le cadre de CADAM. Après avoir décrit la démarche générale de CADAM et les logiciels utilisés par le Cemagref, cinq cas tests sont détaillés et les résultats obtenus par le Cemagref pour les ateliers de CADAM sont commentés.

Description de la démarche

Les risques consécutifs à la rupture d'un barrage sont dus à la propagation d'un volume d'eau important avec une grande vitesse. Ceci se traduit par des risques d'inondation tels que ceux qu'on rencontre lors d'une crue naturelle. Cependant, à proximité du barrage, les niveaux atteints peuvent être bien supérieurs, ce qui peut impliquer des zones inondables très vastes et les fortes vitesses peuvent engendrer des

Contact

André Paquier
Cemagref,
UR Hydrologie –
Hydraulique,
3 bis, quai Chauveau
CP 220,
69336 Lyon Cedex 09

destructions très importantes. Le phénomène-clé à modéliser est donc la propagation de l'onde de rupture. Toutefois, ce phénomène est fortement influencé par le mode de rupture du barrage et, plus particulièrement l'évolution au cours du temps des paramètres de largeur et hauteur de la brèche. Un barrage voûte en béton pourra ainsi s'effacer presque totalement en quelques minutes, voire quelques secondes (rupture dite « instantanée ») alors qu'un barrage en remblai pourra s'éroder progressivement pendant plusieurs jours sans que la largeur de la brèche ne dépasse une faible part de la largeur du barrage. Ce phénomène d'érosion progressive doit donc pouvoir être modélisé en détail. En revanche, pour une rupture instantanée, on peut effectuer seulement un calcul de propagation en supposant que la ligne d'eau initiale correspond à un instant où le barrage a disparu alors que l'eau ne s'est pas encore mise en mouvement; la surface libre présente alors une marche de hauteur égale au dénivelé avant la rupture.

La propagation de l'onde créée par une rupture instantanée étant le processus le plus dangereux et le plus difficile à simuler, la plus grande part des efforts de CADAM a été centrée sur ce type de propagation. Le reste (correspondant à l'atelier de Munich) a été plus spécialement consacré à la simulation de la rupture progressive d'un remblai en terre en découplant ce phénomène de la propagation.

Le principe retenu pour l'action concertée était la confrontation entre une référence commune et les résultats obtenus à partir des modèles développés par chacun des partenaires et une référence commune. Trois types de référence possibles ont été identifiés selon les cas étudiés :

1) Une solution analytique ou pseudo-analytique. Il s'agit de cas simples généralement en canal rectangulaire. Sept cas de ce type ont été étudiés. Les cas les plus connus correspondent à une rupture instantanée avec fond sec à l'aval. Historiquement, ils ont donné lieu aux solutions analytiques dites de Ritter (sans frottement) (Ritter, 1892) et de Dressler (avec frottement) (Dressler, 1952).

2) Le résultat de mesures dans un canal de laboratoire. Même si la géométrie reste globalement celle d'un canal rectangulaire, il est possible de prendre en compte des singularités topographiques. La référence n'est plus aussi indiscutable qu'une solution analytique mais les

cas sont plus réalistes : frottement, topographie différenciée. Dix cas de ce type ont été étudiés. On peut rattacher à ce type de cas, les trois cas de rupture progressive de barrage étudiés.

3) Le résultat d'observations lors d'événements réels de rupture de barrage. Outre la rareté des événements, leur caractère imprévisible fait que peu d'observations sont, en général, disponibles. En revanche, le processus de propagation se produit dans toute sa complexité : singularités topographiques de différentes tailles, instabilités de l'écoulement conséquentes, transport de sédiments, variation topographique en cours d'événement. Ce type de cas qui était le plus délicat et, logiquement, intervenait en dernier, n'a pu être étudié qu'une seule fois sur la rupture du barrage de Malpasset (France).

L'étude d'un cas comportait :

1) Quelques semaines avant l'atelier, l'envoi d'un jeu de données aux différents partenaires intéressés par la modélisation ;

2) Le retour, à l'organisateur du cas, des résultats obtenus par chacun des partenaires (ce sont ces résultats qui sont présentés ci-après) ;

3) La fourniture à chaque partenaire de la référence du cas ;

4) Lors de l'atelier, présentation de la synthèse des résultats par l'organisateur du cas et, éventuellement, commentaires complémentaires par chacun des partenaires modélisateurs. Selon les circonstances, la synthèse générale du cas avait lieu tout de suite ou était reportée à l'atelier suivant après que des calculs supplémentaires eussent été effectués.

Les logiciels développés par le Cemagref

Les logiciels testés par le Cemagref lors des différentes étapes de CADAM ont été :

1) Pour la propagation de l'onde, RUBAR 3 unidimensionnel et RUBAR 20 bidimensionnel (Paquier, 1998a) ;

2) Pour la rupture progressive d'un remblai, RUPRO et RUBAR 20 TS (Paquier, 1998b).

Les trois logiciels (RUBAR 3, RUBAR 20 et RUPRO) sont utilisés par des bureaux d'études spécialisés avec l'assistance du Cemagref. Pour les cas de petits barrages où, a priori, les risques

sont plus limités, le Cemagref a développé le logiciel CASTOR, d'une utilisation plus facile. Ce logiciel unidimensionnel utilise une méthode de calcul de propagation simplifiée qui a été validée par comparaison avec les résultats de RUBAR 3 (Paquier, 1994).

RUBAR 3 et RUBAR 20 résolvent les équations de Saint Venant respectivement unidimensionnelles (1D) et bidimensionnelles (2D) par un schéma numérique explicite en volumes finis. La méthode de résolution choisie permet le traitement de discontinuités dans la ligne d'eau tels que ressauts¹ ou mascarets². Une telle possibilité est indispensable pour représenter correctement la vitesse d'avancée du front faisant suite à une rupture instantanée de barrage. Nous avons également bâti un code de calcul dans lequel nous avons couplé aux équations de Saint Venant une équation de convection-diffusion avec un terme source-puits, ce qui permet de modéliser le transport de sédiments par suspension et l'évolution consécutive des dépôts et érosions. En 2D, la méthode de résolution utilisée par le code correspondant (RUBAR 20 TS) est similaire à celle de RUBAR 20.

RUPRO détermine l'hydrogramme au droit du barrage lors d'une rupture progressive. Le calcul d'érosion du remblai par surverse ou renard est très simplifié; les principaux paramètres caractérisant le matériau sont uniquement un diamètre de sédiments (taille de grain moyenne pour le matériau constitutif du remblai) et un coefficient de frottement moyen de l'écoulement sur ou à travers le barrage. Une résolution couplée (par une méthode de Runge – Kutta) permet d'obtenir l'évolution du débit liquide et du débit solide.

Cas avec solution analytique

L'exemple détaillé ci-dessous a été un des premiers traités (Working group on dam break modelling, 1996). C'est un cas type très couramment utilisé pour la validation des codes de calcul. On se place dans un canal rectiligne rectangulaire à fond plat de largeur constante suffisamment long pour s'affranchir de l'influence des conditions aux limites. Les conditions initiales sont constituées par un canal sec sur la moitié aval et un plan d'eau horizontal immobile sur la moitié amont. Ceci forme ainsi une marche perpendiculaire à l'axe du canal. À partir du temps $t = 0$, cet état évolue pour donner lieu

à l'avancée d'un front (figure 1). Seul le cas sans frottement permet d'obtenir une solution analytique (solution dite de Ritter [Ritter, 1892]) qui est la suivante :

$$\begin{cases} h = \frac{h_{amont}}{9} \left(2 - \frac{x}{ct} \right)^2 \\ v = \frac{2c}{3} \left(1 + \frac{x}{ct} \right) \end{cases} \text{ où } c = \sqrt{g h_{amont}} \text{ pour } -c < \frac{x}{t} < 2c$$

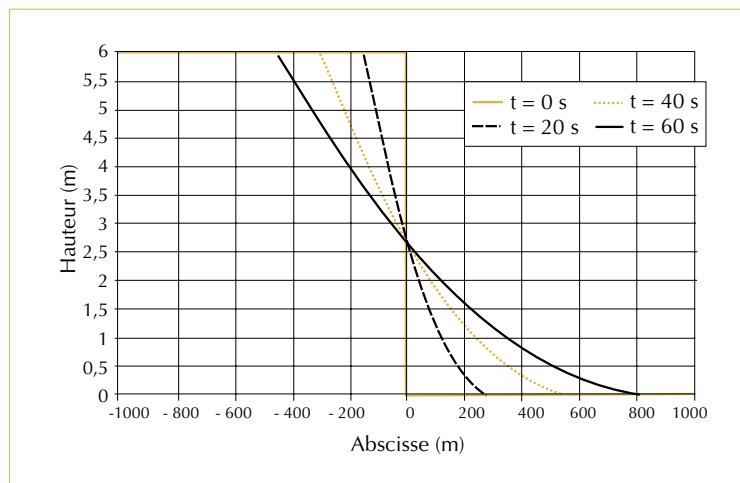
Le cas test correspond à cette situation avec les paramètres suivants : largeur du canal de 1 mètre et hauteur d'eau amont h_{amont} de 6 mètres. On examine le résultat au temps $t = 50$ secondes, avant que les conditions aux limites ne jouent un rôle.

Le calcul est intrinsèquement unidimensionnel et pour les logiciels qu'ils soient 1D ou 2D, le test porte sur la résolution du problème de Riemann 1D (discontinuité dans l'axe du canal). La précision sur les résultats dépend évidemment du pas d'espace. Les figures 2 et 3 (p. 14) comparent les résultats du calcul pour les pas d'espace de 10 m et 100 m avec la solution analytique. Dans les deux cas, le pas de temps est fixe (respectivement 0,5 s et 5 s) mais est choisi pour maintenir un nombre de Courant maximal inférieur à 0,5 à tout pas de temps³. Le pas d'espace de 100 mètres a été ici utilisé pour bien mettre en évidence les imperfections du schéma numérique de résolution mais se révèle trop grand pour le problème traité. Pour le pas d'espace de 10 mètres, aussi bien RUBAR

1. Le ressaut hydraulique est un dénivelé de la surface de l'eau marquant le passage du régime torrentiel au régime fluvial. Il est habituellement fixe et se situe au pied d'un seuil.

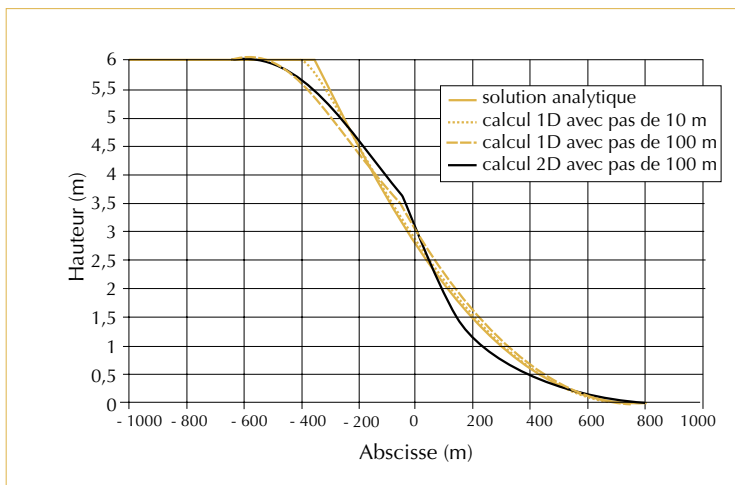
2. Le mascaret est un front d'eau qui se forme parfois lors de la remontée de la marée dans un estuaire.

3. Le nombre de Courant est défini comme le produit du rapport du pas de temps sur le pas d'espace par la somme de la vitesse et de la célérité des ondes. Il doit être limité pour assurer la stabilité du calcul; cette limite ne peut être supérieure à 1 pour un schéma explicite.

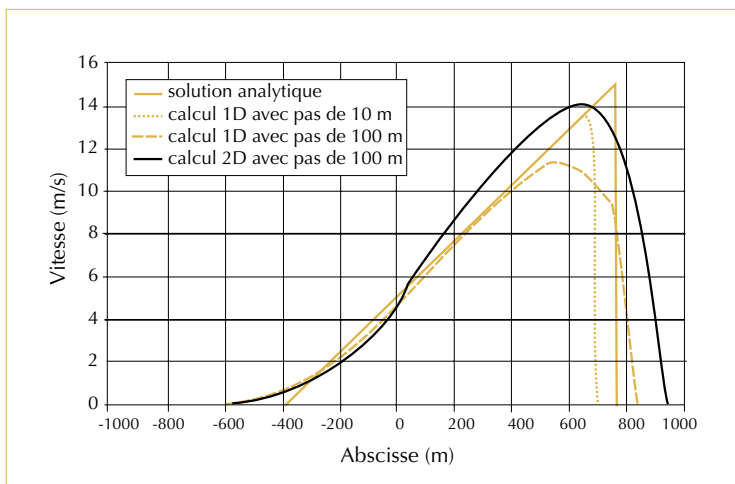


▲ Figure 1 – Évolution des hauteurs d'eau au cours du temps pour la solution analytique.

3 unidimensionnel (dont seuls les résultats figurent sur les figures 2 et 3) que RUBAR 20 bidimensionnel donnent des solutions très proches de la solution analytique. Sur la figure 3, on observe le décalage sur la position du front, qui dépend de la précision sur les hauteurs d'eau et, à un moindre degré, du pas de temps. Dans tous les cas, il est possible de faire coïncider (à chaque instant) la position calculée de l'avancée extrême du front avec la solution analytique mais au prix d'une détérioration de l'estimation de la vitesse maximale. À l'opposé, en présence de frottement, on observe que la position du front dépend peu des paramètres précédents.



▲ Figure 2 – Comparaison des hauteurs d'eau calculées avec la solution analytique.



▲ Figure 3 – Comparaison des vitesses calculées avec la solution analytique.

Expérience avec un obstacle triangulaire

L'expérience a été effectuée au Laboratoire de recherches hydrauliques du Châtelet (Belgique) sous la direction du Pr Hiver de l'Université libre de Bruxelles (CADAM, 1998). Nous restons dans le cas d'un canal rectangulaire rectiligne de largeur constante (0,74 m dans ce cas) mais le fond plat est interrompu sur toute la largeur du canal par un obstacle triangulaire. Le sommet du triangle haut de 0,4 m est à 13 m de la vanne, l'amont du triangle étant à 10 m et l'aval à 16 m. Les conditions initiales sont assez proches du cas précédent puisqu'on simule la rupture instantanée d'un barrage en ouvrant brutalement (0,5 secondes environ) une vanne verticale. Ceci donne donc de même un plan d'eau initial amont (hauteur d'eau : 0,75 m) horizontal et une portion aval de canal sèche. Les principales différences avec le cas précédent sont le frottement au fond et la présence de l'obstacle qui bloque l'avancée du front et crée une réflexion partielle de l'onde. La condition aval est une chute à 22,5 m de la vanne tandis qu'à l'amont (à 15,5 m de la vanne), on trouve un mur contre lequel l'onde peut se réfléchir. Le coefficient de Strickler a une valeur estimée de $80 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

Les résultats expérimentaux sont constitués par les limnigrammes sur l'axe du canal aux distances 2, 4, 8, 10, 11, 12, 13, 16 et 20 m comptées à partir de la vanne. Bien que la réalité ne soit plus strictement unidimensionnelle (du fait du frottement qui ralentit l'écoulement près des parois du canal), on peut toutefois considérer qu'il s'agit d'un cas tout à fait propre à une modélisation 1D. Il a, de ce fait, été décidé de tester la modélisation 2D sans frottement à la paroi afin d'obtenir des résultats strictement 1D.

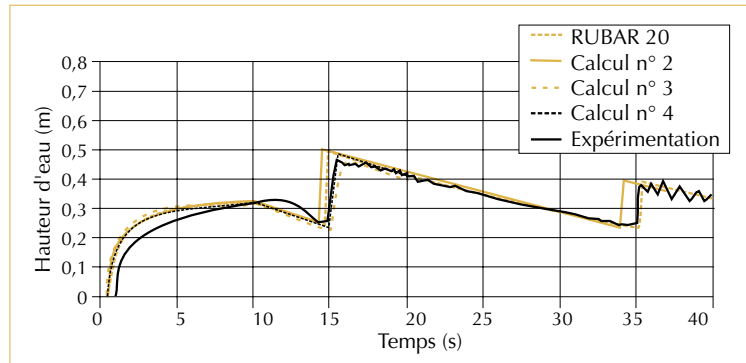
Comme pour le test précédent, de manière générale, les résultats obtenus par les autres participants de CADAM sont, en général, acceptables et équivalents à ceux du Cemagref (trois exemples sont présentés sous la dénomination « calcul n° 2, 3 et 4 » sur les figures 4 et 5). Sur ce test, les résultats obtenus au moyen de RUBAR 20 se distinguent par une meilleure estimation du temps d'arrivée des différents fronts (onde initiale et réflexions).

Expérience avec coude à angle droit

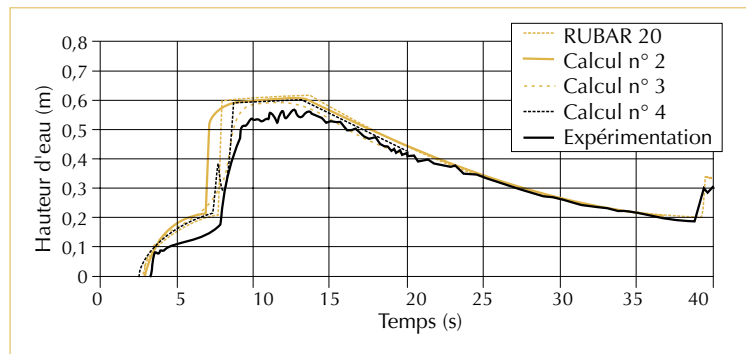
L'expérience a été effectuée à l'Université catholique de Louvain (Belgique) (figure 6). Pour ce cas test, nous restons avec une propagation

dans un canal rectangulaire à fond plat présentant un coude à angle droit qui engendre une réflexion partielle et dissymétrique de l'onde. En outre, à l'amont de la vanne, on ne trouve plus une portion de canal mais un réservoir dont le fond est plus bas que le radier du canal créant une marche de 33 cm de haut. Toutefois, cette marche ne semble pas avoir d'effet notable sur la propagation. Deux expériences (plusieurs fois renouvelées pour s'assurer de la fiabilité des mesures) ont été effectuées, l'une avec fond sec, l'autre avec un centimètre d'eau à l'aval de la vanne. Les résultats en sont assez similaires et nous ne présenterons que les résultats avec fond initial sec.

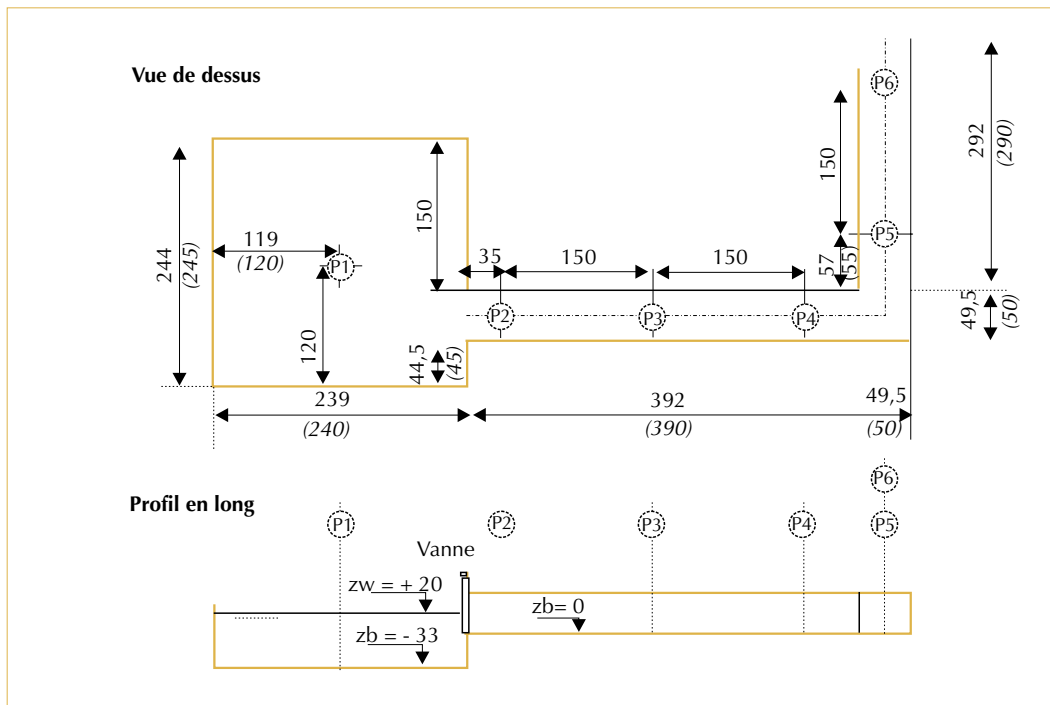
Les principales mesures utilisées pour les tests sont les limnigrammes au centre du canal aux points d'abscisses 35, 185 et 315 cm comptées à partir de la vanne puis 57 et 207 cm à l'aval du coude ainsi qu'au centre du réservoir. Le frottement au fond est représenté par un coefficient de Strickler de $105 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, valeur estimée à partir de mesures en régime uniforme. Le maillage utilisé par la majorité des codes 2D (dont RUBAR 20) est un maillage régulier constitué de carrés de 5 cm de côté.



▲ Figure 4 – Obstacle triangulaire – Limnigrammes à 2 mètres en aval de la vanne (d'après CADAM [1998]).

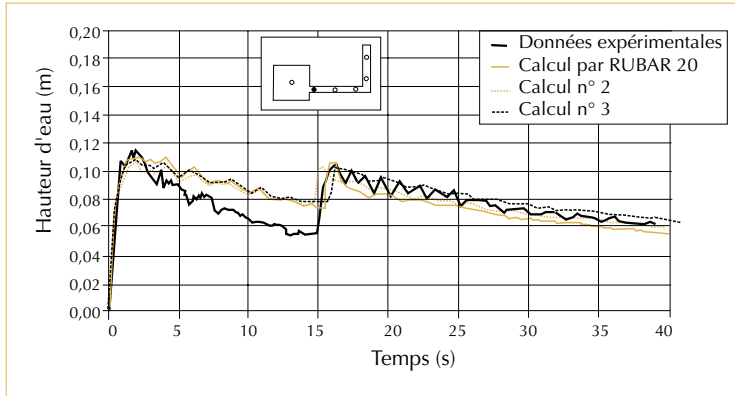


▲ Figure 5 – Obstacle triangulaire – Limnigrammes à 10 mètres en aval de la vanne (d'après CADAM [1998]).

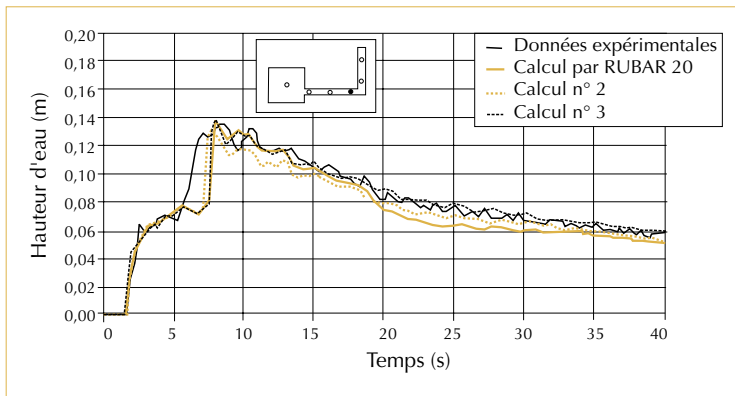


◀ Figure 6 – Plans du canal coude expérimental (d'après Working group on dam break modelling [1998]). La cotation des plans est en cm.

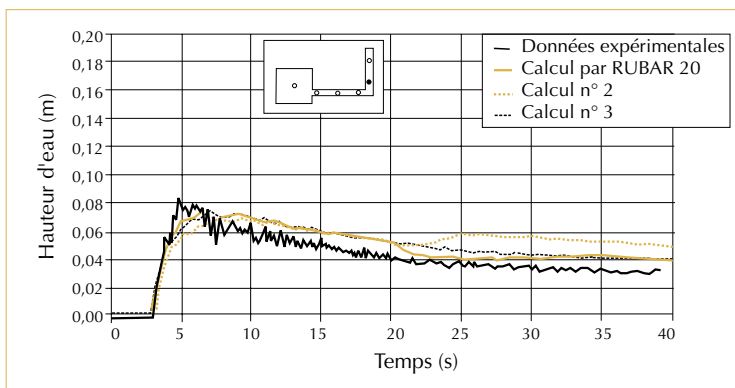
Deux calculs ont été effectués avec RUBAR 20. Le calcul dans lequel un frottement à la paroi a été modélisé par un coefficient de Strickler de $50 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ (valeur proposée suite au calage expérimental 1D) ne sera pas détaillé car, clairement, ce frottement était trop important.



▲ Figure 7 – Canal coudé – Limnigramme à la sonde P2 en aval de la vanne (d'après Working group on dam break modelling [1998]).



▲ Figure 8 – Canal coudé – Limnigramme à la sonde P4 en amont du coude (d'après Working group on dam break modelling [1998]).



▲ Figure 9 – Canal coudé – Limnigramme à la sonde P5 en aval du coude (d'après Working group on dam break modelling [1998]).

Le calcul de base, avec seulement frottement au fond, produit, en revanche, des résultats proches des mesures. Il en est de même pour les calculs n° 2 et 3 effectués avec les mêmes paramètres par deux autres logiciels testés dans CADAM. On remarque toutefois, pour tous les calculs, une vidange trop rapide du réservoir (figure 7). On peut supposer que la cause en est le resserrement brutal à la sortie du réservoir qui réduit la section utile, réduction qui n'est pas prise en compte par les équations. De même, la réflexion sur le mur au niveau du coude n'est pas représentée exactement (figure 8 : sonde à l'amont immédiat du coude) entraînant aussi à l'aval de petites différences (figure 9 : sonde à 57 cm à l'aval du coude).

Expérience de rupture progressive de barrage

L'expérience a été menée à l'Université des Forces Armées à Munich (Allemagne). Dans un canal rectangulaire à fond plat de largeur de 1,296 m, un petit remblai de forme trapézoïdale de hauteur 24 cm, de largeur 144 cm à la base et 24 cm en crête a été bâti avec un sable de diamètre moyen 2 mm, de densité spécifique 2,618. À l'amont, sur une longueur de 20 m environ, on maintient un plan d'eau horizontal à une hauteur d'eau de 22,3 cm. À l'aval du remblai, le canal est sec et se termine par une chute. En crête de barrage, dans l'axe du canal, une ouverture trapézoïdale de hauteur 10 cm, de largeur 2 cm à la base et 12 cm en crête de barrage est dégagée à l'instant initial (voir figure 15). L'eau s'engouffre alors par l'ouverture et érode le matériau du barrage approfondissant la brèche. Un petit dépôt de matériau se forme en pied de remblai mais la majeure partie du matériau érodé est entraînée vers l'aval. Les mesures en extrémité de canal portent sur le débit et la masse de sédiments évacuée au cours du temps. En outre, l'évolution du niveau du plan d'eau a été mesurée 2 mètres en amont du barrage.

Les figures 10 et 11 illustrent bien la dispersion des résultats obtenus dans le cas d'un calcul effectué sans référence quant au rythme réel d'érosion. Les oscillations présentes (et qui s'accroissent après 250 secondes) dans le calcul n° 4 au moyen de RUBAR 20TS et le calcul n° 2 effectué par un autre participant avec un logiciel du même type démontrent un problème numérique. En ce qui concerne RUBAR 20TS, cela est dû à la combinaison d'une taille de maille

trop grande et d'une modélisation insuffisante ne permettant pas l'érosion convenable de zones à forte pente. Si on veut suivre l'érosion réelle y compris dans la forme de la brèche, la complexité augmente fortement. En revanche, si on ne s'intéresse qu'à un seul paramètre (par exemple, le débit au droit de la brèche), on s'aperçoit qu'un modèle très simple tel que RUPRO (calcul n° 3) donne un résultat tout à fait raisonnable alors qu'il sous-estime d'un facteur 2 le pic du taux d'érosion.

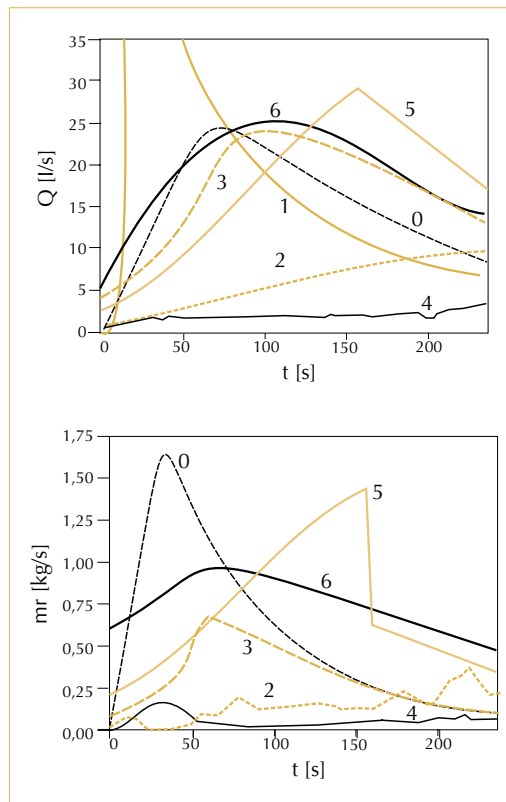
Cette dispersion des résultats a été confirmée sur les deux autres cas tests d'érosion de barrage ayant fait l'objet d'une restitution lors de l'atelier de Munich (CADAM, 2000).

Propagation de l'onde de rupture du barrage de Malpasset

Le barrage de Malpasset était situé dans le département du Var, sur le Reyran, environ 12 kilomètres en amont de la ville de Fréjus. Le barrage, haut de 66 mètres, avait une retenue d'un volume de l'ordre de 50 à 55 millions de m³ lors de la rupture intervenue en décembre 1959 pendant une forte crue coïncidant avec le premier remplissage. La rupture du barrage voûte a été quasiment instantanée et l'inondation à l'aval jusqu'à la mer a fait 433 victimes.

La plupart des observations ont porté sur la partie étroite de la vallée en amont de l'élargissement dans la plaine côtière. Cette partie de la vallée est susceptible d'une modélisation 1D bien que la présence de nombreux virages et de deux vallées affluentes puissent la rendre difficile. Le Laboratoire national d'hydraulique d'Électricité de France (à Chatou) qui organisait ce test a fourni des sections en travers le long des vallées (figure 12, p. 18) et un maillage triangulaire.

Pour les besoins de la modélisation du Cemagref, la vallée affluente à l'aval du barrage a été négligée et la vallée affluente en amont a été intégrée comme un élargissement, rendant ainsi la définition de la vallée strictement 1D (avec un seul bief). La condition initiale de la modélisation est une cote de 100 m NGF dans le plan d'eau à l'amont du barrage et une vallée vide à l'aval, le débit déversé par les vannes du barrage étant négligeable par rapport au débit de pointe lors de la rupture. La modélisation ne tient également pas compte de l'hydrogramme de crue arrivant par l'amont et suppose un écoulement libre à l'aval dans la plaine côtière.



▲ Figures 10 et 11 – Hydrogrammes et taux d'érosion au droit du barrage obtenus pendant CADAM (d'après documents de travail remis lors de l'atelier de Munich). La courbe 0 correspond aux mesures, les courbes 3 et 4 respectivement aux calculs par RUPRO et RUBAR 20TS, les autres courbes à des calculs effectués par les autres participants selon des méthodes différentes.

Les références que nous retiendrons ci-après sont les observations des laisses de crue (limites de zone inondée) effectuées après la catastrophe ainsi que le temps d'arrivée de l'onde en trois points correspondant à des poteaux électriques abattus, ces temps étant déterminés par la coupure électrique. Pour la discussion dans CADAM, les mesures (limnigrammes et temps d'arrivée de l'onde) effectuées sur un modèle physique de la vallée construit par Électricité de France ont été aussi utilisées bien qu'elles ne constituent pas un jeu d'observations parfaitement comparables : on ne peut, par exemple, assurer que les rugosités ont été bien transposées à l'échelle du modèle physique. Toutefois, les résultats allaient globalement dans le même sens que les mesures de terrain.

La figure 13 compare les laisses de crue aux résultats de trois simulations effectuées pour

CADAM : un calcul 1D (à un bief) avec RUBAR 3 (avec un coefficient de Strickler de $35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ mais une valeur de 30 aurait donné des résultats plus proches du terrain), un calcul 2D avec RUBAR 20 sur un maillage de quadrilatères basé sur les sections utilisées par le modèle 1D (avec un coefficient de Strickler de $30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$) et un calcul 2D avec RUBAR 20 en utilisant le maillage triangulaire proposé par EDF (avec un coefficient de Strickler de $30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$). Une première remarque est que le volume d'eau introduit dans le modèle n'est pas exactement le même (différence pouvant atteindre 10 %) car la topographie n'est pas prise en compte de la même façon dans les différents modèles. En niveau d'eau, les

variations d'un modèle à l'autre sont du même ordre de grandeur qu'entre les mesures et un modèle. Aucun modèle n'apparaît clairement supérieur même si la modélisation 1D présente de gros écarts en certains points. En ce qui concerne le point 2 situé dans une portion particulièrement sinueuse, il a été montré, pendant CADAM, que la diminution locale du coefficient de Strickler à $20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ améliorerait sensiblement la description globale de l'onde par le modèle 1D alors que ce changement n'est pas nécessaire en 2D.

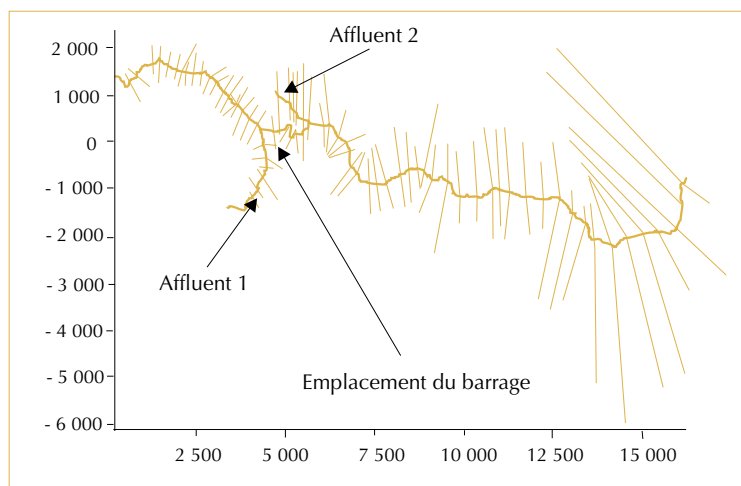
Pour les temps d'arrivée (figure 14), la différence de coefficient de Strickler entre les calculs 2D et le calcul 1D n'explique qu'en partie l'avancée trop rapide du front. L'écart entre le temps d'arrivée au transformateur et celui dans l'axe de la vallée (seul calculé par le modèle 1D) est une explication complémentaire.

Conclusions

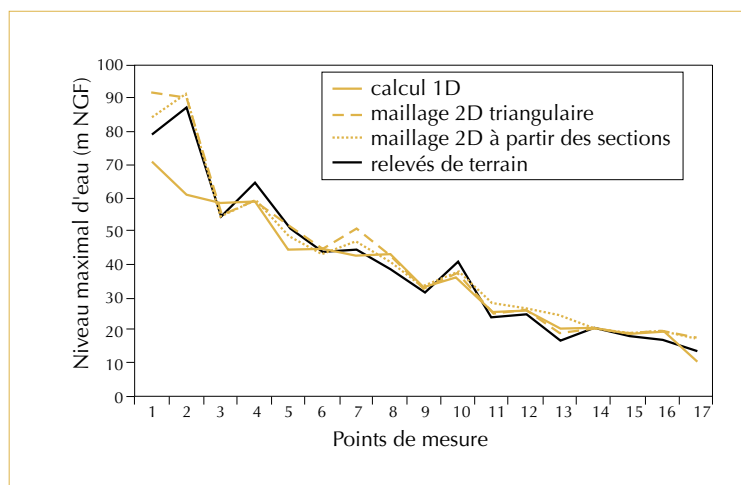
CADAM a permis de tisser des liens entre les équipes engagées dans des recherches parallèles ou complémentaires dans les différents pays de l'Union européenne et parfois au-delà. Elle a déjà engendré et initiera, sans doute encore dans le futur, d'autres actions de recherche en commun. Sur le plan strictement scientifique, CADAM a montré certaines limites de la modélisation des ondes de rupture de barrage.

Cette limitation est tout à fait claire en ce qui concerne la rupture progressive d'un barrage en remblai. Sans calage a posteriori, les modèles même les plus sophistiqués ne permettent pas de représenter de manière satisfaisante les ordres de grandeur des flux dominants dans le cas de la surverse; des modèles plus simples tels que RUPRO développé par le Cemagref donnent des résultats aussi satisfaisants sans prétendre représenter les processus en détail. En ce qui concerne la rupture par renard, seuls des modèles très simplifiés tels que RUPRO existent.

L'incertitude sur la propagation de l'onde de rupture est moins importante que celle sur l'hydrogramme au droit du barrage pour peu que la topographie de la vallée à l'aval soit bien connue. Les équations de Saint Venant (1D ou 2D) donnent, en effet, l'ordre de grandeur du processus dominant même si elles ne permettent pas de rendre compte des phénomènes locaux liés à la forte turbulence de ces écoulements très rapides. Les expériences sur modèle physique



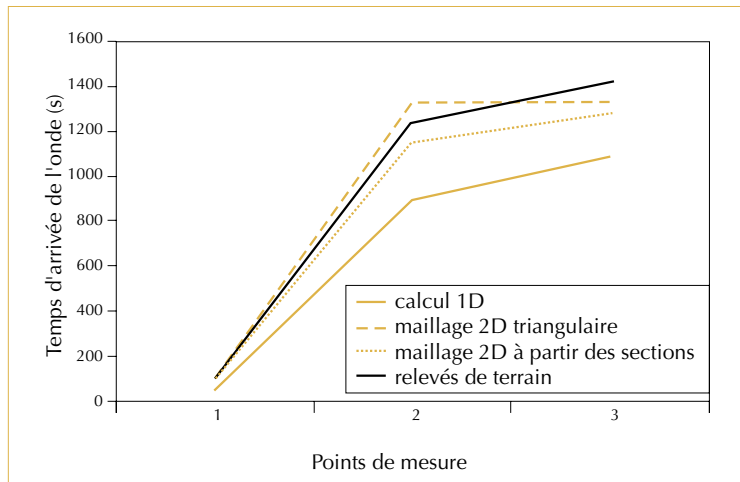
▲ Figure 12 – Malpasset – Emplacement des sections en travers (d'après CADAM [2000]).



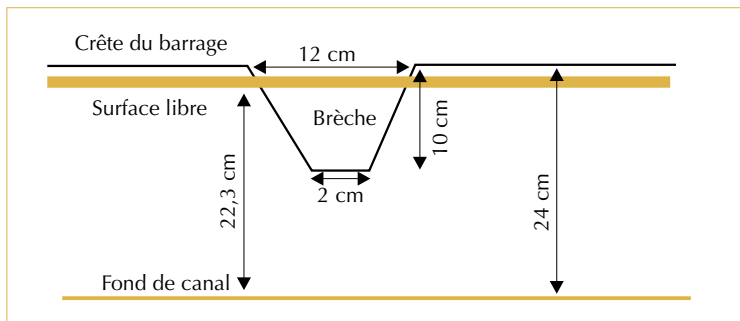
▲ Figure 13 – Malpasset – Comparaison des laisses de crue avec les niveaux calculés par RUBAR 3 et RUBAR 20.

ont bien montré le biais systématique que les modèles numériques de ce type pouvaient induire. Il apparaît aussi que, sauf cas particulier (par exemple, le test avec le coude à angle droit), un modèle 1D performant peut donner des résultats aussi acceptables qu'un modèle 2D pourvu que les pertes de charge locales soient bien estimées, ce qui reste cependant plus difficile à effectuer en 1D qu'en 2D. Dans le cadre de CADAM, c'est-à-dire avec une définition du coefficient de Strickler effectuée a priori soit par rapport à un régime permanent (expériences), soit par rapport à l'occupation du sol (événement réel), on observe que les différences entre les résultats (souvent groupés) des meilleurs modèles numériques et les observations restent en moyenne de l'ordre de 10 à 20 % sur les hauteurs d'eau maximales (avec des écarts localement plus importants sur le cas de Malpasset) et de l'ordre de 10 à 30 % sur le temps de propagation, avec un risque de dérive systématique plus importante, en particulier en 1D, si le coefficient de Strickler est mal estimé.

Pour le Cemagref, CADAM a permis de confirmer la validation des logiciels développés et de noter leur adaptation aux divers problèmes rencontrés pour la modélisation de l'onde de rupture de barrage. Les résultats des logiciels diffusés (RUPRO, RUBAR 3 et RUBAR 20) sont toujours acceptables tant en niveau d'eau qu'en temps de propagation et présentent souvent les différences les plus faibles par rapport aux références (à pas d'espace équivalent). Sur certains points (par exemple, la rupture d'un remblai), CADAM nous a incité à poursuivre activement les recherches afin de concevoir des modèles plus performants. □



▲ Figure 14 – Malpasset – Comparaison des temps de coupures électriques avec les temps calculés par RUBAR 3 et RUBAR 20.



▲ Figure 15 – Section en travers de la brèche initiale lors du test de rupture progressive.

Remerciements

Nos remerciements vont à l'ensemble des participants de CADAM et plus particulièrement Mark Morris, pilote du projet, Alain Petitjean, principal initiateur du projet et Jean-Charles Galland, coordinateur technique.

Résumé

CADAM était une action ayant reçu le soutien de l'Union européenne. Elle avait pour objet de comparer les méthodes numériques utilisées pour simuler la rupture d'un barrage et la propagation de la vague formée à l'aval. La méthodologie utilisée pendant cette action concertée est résumée et les résultats obtenus par le Cemagref sont présentés sur quelques cas particuliers représentatifs de la gamme de tests utilisés. Pour la propagation de l'onde, les références peuvent être des solutions analytiques, des expériences ou des observations de terrain. Seulement pour le premier cas, on peut considérer que la solution numérique est proche de la référence. Pour les expériences et les cas de terrain, les processus physiques montrent des instabilités liées au haut niveau de turbulence de l'écoulement qui sont mal décrites par les équations de Saint Venant. Toutefois, avec un ajustement convenable du coefficient de Strickler, les résultats des calculs sont, en moyenne, en accord avec les observations, les modèles 2D pouvant rendre compte plus facilement de conditions locales. Pour la rupture progressive d'un barrage, seules des mesures expérimentales étaient disponibles; les résultats des calculs étaient très dispersés et les codes les plus complexes n'ont pas toujours fourni de meilleurs résultats que les plus simples.

Abstract

CADAM (Concerted Action for Dam Break Waves) was funded by European Union in order to compare the numerical methods used to simulate the breaching of a dam and the downstream propagation of the wave created. The methodology used during the Concerted Action is summed up and the results obtained by Cemagref are presented on some specific case studies representative of the set of tests used. For the propagation wave, references may be analytical solutions, experiments or field observations. Only for the first case, it can be considered that numerical solution is close to the reference. For experiments and field cases, the physical processes show instabilities linked with the high turbulence of the flow which are not correctly described by the de Saint Venant equations. However, with convenient calibration of the Manning-Strickler coefficient, the calculation results are, in average, in agreement with observations; 2D models can more easily take into account local conditions. For breaching of a dam, only experimental data were available; the calculation results were very scattered and the more complex codes did not provide better results than the simpler models in all cases.

Bibliographie

CADAM, 1998, *Concerted Action on dam-break modelling, Meeting report*, Wallingford, United Kingdom, Université catholique de Louvain, HR Wallingford, 150 p.

CADAM, 2000, *CADAM, Concerted Action on Dam Break Modelling*, Short history, objectives, Project report, modelling guidelines, participants, meetings, test cases, proceedings, author index, CD Rom, Université catholique de Louvain.

DRESSLER, R.F., 1952. Hydraulic resistance effect upon the dam-break functions. *Journal of Research*, National Bureau of Standards, v. 19, p. 217-225.

GALLAND, J.-C., 1999, CADAM, European Concerted action on dam-break modelling, in Bergmann, H., Krainer, R., and Breinhaelter, H., eds., *XXVIII IAHR congress, Abstract volume* p. 117, CD Rom, Graz, Austria, IAHR.

Working group on dam-break modelling, 1996, *Conference proceedings of the Second Workshop on dam-break wave simulation*, Goutal N. and Maurel F. eds., Lisbonne, Portugal, Électricité de France, 192 p.

Working group on dam-break modelling, 1998, *Working group on dam-break modelling, Meeting report, Louvain La Neuve, Belgique*, Université catholique de Louvain et université libre de Bruxelles, 150 p.

PAQUIER, A., 1994, *Calcul simplifié des ondes de rupture de barrage*, Informations techniques du CEMAGREF, Cemagref, décembre, v. 96, note 1, p. 1-8.

PAQUIER, A., 1998a, 1-D and 2-D models for simulating dam-break waves and natural floods, in Morris, M., Galland, J.-C., and Balabanis, P., eds., *Concerted action on dam-break modelling, 1st CADAM meeting, Wallingford, United Kingdom*, European Commission, Science Research Development, Hydrological and hydrogeological risks, p. 127-140.

PAQUIER, A., 1998b, Test cases of dam breach simulation, Comments about Cemagref's results, in H. R. Wallingford ed., *Concerted Action on Dam Break modelling, Second CADAM meeting, Munchen, Germany*, CD Rom, Université catholique de Louvain, Paper 12, 7 p.

RITTER, A., 1892, Die Fortpflanzung der Wasserwellen: Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, v. 36, p. 947-954.

SOARES FRAZAO, S., and ZECH, Y., 1999, Effects of a sharp bend on dam-break flow, in Bergmann, H., Krainer, R., and Breinhaelter, H., eds., *XXVIII IAHR Congress, Abstract volume* p. 119, CD Rom, Graz, Austria, IAHR.