

Un outil d'estimation rapide du risque d'inondation à l'aval d'une digue – Méthodes et premières étapes de validation

Julien Renzoni ^a, André Paquier ^b et Arnaud Cogoluègnes ^b

Dans la gestion et la prévention du risque d'inondation, la détermination de l'aléa est un objectif important et difficile. Le moyen le plus fréquemment utilisé aujourd'hui pour évaluer cet aléa reste la modélisation hydraulique.

Le Cemagref a travaillé à l'élaboration de différents logiciels qui permettent d'estimer l'étendue d'inondations consécutives à la rupture de barrage. Les logiciels Rubar 3 (unidimensionnel) et Rubar 20 (bidimensionnel) qui résolvent les équations de Saint Venant permettent des évaluations détaillées. En complément, un outil plus simple, le logiciel Castor (calcul simplifié pour le traitement de l'onde de rupture de barrage), permet d'estimer plus sommairement certains paramètres en un point de la vallée en aval d'un barrage (Paquier, 1994).

Cependant, ces logiciels ne peuvent être utilisés aisément pour répondre à la problématique actuelle (nouvelle réglementation) de réponse à la question : une rupture de digue engendre-t-elle un risque pour la sécurité publique ? Le temps de formation de la brèche important par rapport au temps de propagation de l'inondation et la modélisation bidimensionnelle de l'écoulement directement à l'aval de la digue sont autant de paramètres qui différencient la rupture de digue de la rupture de barrage et rendent illusoire l'utilisation d'un modèle unidimensionnel.

De plus, le linéaire important de digue à étudier nécessite d'effectuer une modélisation simplifiée avec des temps de calcul faibles permettant

une estimation rapide du risque, ce qui écarte dans un grand nombre de cas une modélisation bidimensionnelle détaillée telle que Rubar 20 permettrait de la faire.

C'est dans ce contexte que le Cemagref souhaite s'inspirer du logiciel Castor, conçu pour le traitement des ondes de ruptures de barrage, pour construire un nouveau logiciel appelé CastorDigue adapté à la rupture de digue. Dans cet article, nous décrivons les principes du logiciel, puis nous présentons les méthodes de description et la validation des entités : rivière, brèche, zone proche et lit majeur, puis nous dressons un état de l'avancement de nos travaux.

Présentation du logiciel CastorDigue

Objectifs et cahier des charges

CastorDigue est un logiciel d'hydraulique qui a pour objectif de donner des indications quant à l'aléa suite à une rupture de digue à des ingénieurs ou à des techniciens en charge de la prévention des risques d'inondation c'est-à-dire à du personnel pas obligatoirement spécialiste de l'utilisation de logiciels d'hydraulique mais maîtrisant les notions de base de l'hydraulique fluviale. Ce logiciel effectue des calculs simplifiés, diminuant par conséquent les temps de calcul et permettant de simuler rapidement de multiples scénarios pour une même étude. Il ne nécessite pas énormément de données sur le site étudié.

Les contacts

a. Cetmef,
2, bd Gambetta,
BP 60039, 60321
Compiègne Cedex.
b. Cemagref, UR Hydro-
logie hydraulique,
3 bis, quai Chauveau,
CP 220, 69336 Lyon
Cedex.

Le logiciel doit fournir aux utilisateurs différents paramètres de la vague de submersion :

- hauteurs d'eau ;
- vitesses de l'écoulement ;
- temps d'arrivée de cette vague.

L'aléa doit ensuite pouvoir être visualisé sur des profils en travers, en long et en plan afin de permettre une première estimation du risque pour ensuite juger si une étude plus approfondie est nécessaire.

Cette demande impulsée par la Direction de l'Eau du ministère de l'Écologie et du Développement durable (MEDD) dans le cadre d'une convention pluriannuelle avec le Cemagref correspond aux besoins à satisfaire dans le cadre de l'application de la circulaire interministérielle du 6 août 2003 relative à l'organisation du contrôle des digues intéressant la sécurité publique.

Structuration du calcul en quatre modules

La méthode de calcul du logiciel CastorDigue compte quatre modules permettant chacun de calculer des paramètres utilisés séparément, nécessaires à une représentation simple du phénomène.

- *Le lit mineur au droit de la brèche*

Ce premier module calcule la hauteur d'eau et la vitesse dans la section du lit mineur où se situe la brèche. Le débit du cours d'eau est ensuite réactualisé à chaque pas de temps en le diminuant du débit évacué à travers la brèche calculé par le deuxième module.

- *La rupture au droit de la brèche*

Ce deuxième module simule la rupture de la digue. Deux types d'érosion sont envisagés : par renard et par surverse. Ce module permet de

connaître le débit liquide à travers la brèche et le débit solide caractérisant l'érosion et l'élargissement de la brèche. Il calcule aussi la largeur et la hauteur de la brèche ainsi que la hauteur d'eau à l'aval.

- *La propagation dans la zone proche*

Une fois que la rupture s'est produite, l'eau s'écoule en aval de la digue dans une zone du lit majeur voisine de la brèche appelée « zone proche ». Le logiciel doit fournir la hauteur d'eau et la vitesse en tout point de cette zone, soit à chaque pas de temps, soit sous forme de valeur maximale sur la durée de la crue. La modélisation de ce module est bidimensionnelle. Lorsque le front de l'onde a atteint une limite physique d'inondation, on entre dans une phase de remplissage du lit majeur.

- *La propagation dans tout le lit majeur*

La dernière étape du calcul simule l'avancée de l'inondation dans tout le lit majeur. L'écoulement est considéré unidimensionnel. Dans ce module, le logiciel doit calculer les hauteurs d'eau, vitesses et débits maximums dans les sections du lit majeur en aval de la digue.

Interfaçage informatique

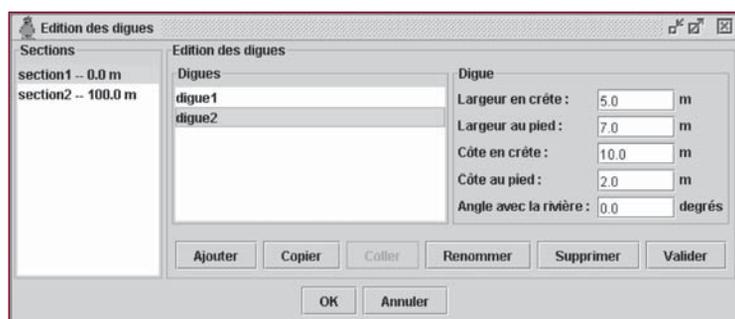
Le logiciel CastorDigue est programmé en Java. On entre les données par l'intermédiaire de fenêtres internes simples d'utilisation. Chaque élément possède sa propre fenêtre de définition. La figure 1 illustre cette saisie pour la définition des digues.

Certaines données peuvent être saisies par l'intermédiaire de tableaux. L'ensemble de ces données est regroupé dans une étude. Pour une étude, on doit définir l'intégralité des paramètres d'entrée afin que le calcul puisse être effectué.

Une fois tous les éléments d'une étude saisis, il est possible d'éditer des scénarios de calcul. Un scénario de calcul comprend la définition des paramètres de calcul et la sélection :

- d'un hydrogramme pour le lit mineur ;
- d'une section de lit mineur où se situera la brèche ;
- d'une digue ;
- d'une brèche ;
- d'une zone proche ;
- d'une section du lit majeur.

▼ Figure 1
– Fenêtre de saisie des paramètres concernant la digue.



Tous ces éléments sont choisis parmi ceux que l'on aura définis et entrés dans CastorDigue. L'édition de plusieurs scénarios permet d'effectuer et de sauvegarder toutes les combinaisons de rupture que l'on souhaite simuler. Il est ainsi possible de tester rapidement un linéaire de digue important en simulant de multiples scénarios.

Pour plus de lisibilité, les résultats du calcul effectué par le logiciel sont représentés sur différents graphiques.

Détails des méthodes et validation

Description de la rivière

La rivière est décrite par un lit mineur défini par un ensemble de sections en travers et un hydrogramme. À chaque section est affectée une pente locale et un coefficient de frottement (Strickler) local (utilisés si nécessaire pour calculer la hauteur d'eau dans la section avec l'équation du régime uniforme). Une de ces sections sera ensuite choisie pour localiser l'endroit où se situera la rupture de la digue.

Trois situations sont prises en compte. Dans le cas où l'on connaît la loi de tarage $Q(z)$ de cette section ou la loi empirique d'un ouvrage présent dans cette section, on cherche z pour obtenir le débit correspondant à l'hydrogramme d'entrée. Dans le cas contraire, on considère que le régime est uniforme et on trouve z en résolvant l'équation (1) :

$$Q = K_{local} \cdot i_{local}^{1/2} \cdot S(z) \cdot Rh(z)^{2/3} \quad (1)$$

où K_{local} est le coefficient de frottement (Strickler) local de la section de la brèche, i_{local} sa pente locale, $S(z)$ sa section mouillée pour la hauteur d'eau z , $Rh(z)$ le rayon hydraulique pour la hauteur z et Q le débit donné par l'hydrogramme d'entrée.

Ces différents cas ont été programmés et testés pour des sections de formes simples afin de contrôler la qualité du codage.

Description de la brèche

Pour modéliser une rupture, il est nécessaire de définir une digue, une brèche puis un déversement. Chaque digue créée est associée à une section du lit mineur. Elle est ensuite définie par sa géométrie : largeur en crête, largeur en pied, cote en crête, cote en pied puis par l'angle qu'elle forme avec la rivière.

Pour une digue donnée, il faut ensuite définir des déversements. Les déversements sont caractérisés par leur longueur, leur cote et un coefficient de débit. Un déversoir définit une loi de débit en fonction d'une cote z :

$$Q = \begin{cases} \mu L \cdot \sqrt{2g \cdot (z - z_d)^{3/2}} & \text{si } z > z_d \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2)$$

où z_d est la cote de fond du déversoir, g l'accélération de la pesanteur, μ son coefficient de débit et L sa largeur.

De manière générale, on ne définit que 2 déversements pour un déversement. L'un d'eux a une cote de fond égale à la cote en crête de la digue, il va modéliser l'eau susceptible de passer au-dessus de la digue (on peut imaginer que le cours d'eau est alors en crue). L'autre déversoir modélise le début de la brèche : il a une cote de fond plus basse que la cote en crête de la digue, sa largeur correspond à la largeur initiale de la surverse.

On définit finalement des brèches associées à une section du lit mineur. Il faut entrer leur type (renard ou surverse), leur géométrie (largeur initiale, maximale et cote de fond initiale) puis les caractéristiques du matériau qui les compose (diamètre des grains, masse volumique, porosité et coefficient de Strickler caractérisant le frottement en fond de brèche).

Le calcul effectué pour décrire l'évolution de la brèche reprend l'algorithme de calcul utilisé dans Rupro (Robin, 1990 ; Paquier *et al.*, 1998) simulant la rupture d'un barrage en terre et permettant de calculer l'hydrogramme de rupture. La rupture par renard simule une brèche circulaire, partant du bas de la digue, dont le diamètre s'agrandit alors que la rupture par surverse simule une brèche rectangulaire partant du haut de la digue et évoluant en profondeur et en largeur.

La position de la digue par rapport à la rivière impose d'ajuster la cote d'eau amont :

$$z' = z + \frac{V(t)^2 \cdot (\sin \alpha)^2}{2 \cdot g} \quad (3)$$

où $V(t)$ est la vitesse et α l'angle de la rivière par rapport à la digue.

La différence $z' - z_{fond\ brèche}$ est ensuite utilisée par le code pour calculer la hauteur d'eau à l'aval immédiat de la digue. Cette hauteur d'eau est comparée avec celle calculée dans la zone proche pour ne conserver que la plus grande des deux.

Une fois le débit à travers la brèche et le débit de déversement calculés, Rupro simule l'évolution de la brèche en calculant une surface érodable en fonction du type de brèche et des caractéristiques de la digue. On connaît alors l'évolution de la hauteur et de la largeur de la brèche.

Les tests effectués pour ce module consistent à valider la programmation qui a été faite en Java par comparaison avec le logiciel Rupro programmé en Fortran, ce logiciel ayant été lui-même déjà validé en terme d'hydrogramme résultant sur des données expérimentales et par comparaison avec d'autres logiciels, en particulier lors des projets européens Cadam (Paquier, 2001) et Impact (Morris and Hassan, 2004). Plusieurs configurations ont été étudiées avec des géométries de digues et de brèches différentes. Les résultats fournis par CastorDigue sont très proches de ceux trouvés avec Rupro. Les différences résident dans l'ordre de la méthode numérique de résolution utilisée puisque lorsque celui-ci est le même dans les deux versions, les résultats sont exactement similaires.

Description de la zone proche

La zone proche est actuellement en cours d'élaboration. La méthode et les validations présentées ici ne sont pas encore achevées.

On définit une zone proche dans le logiciel par sa distance maximale, sa pente et son coefficient de Strickler. Les travaux actuellement réalisés considèrent une pente nulle pour la plaine d'inondation et une hauteur constante à l'amont de la digue dans le cours d'eau. Le Cemagref a développé un outil de résolution numérique 2D appelé Rubar 20 (Paquier, 1998) qui permet de résoudre les équations de Saint Venant bidimen-

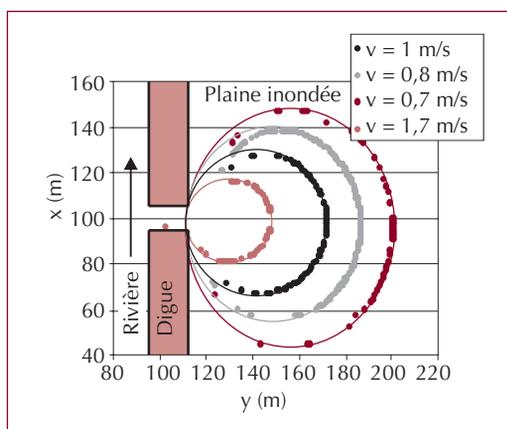
sionnelles y compris lorsque l'état initial inclut un fort dénivelé (marche) de la surface libre, tel qu'après une rupture instantanée de barrage. Ce logiciel est utilisé dans le cadre de cette étude pour modéliser la propagation après rupture instantanée de la digue sur une certaine longueur. Plusieurs scénarios ont été mis en œuvre afin d'identifier les paramètres influant sur l'écoulement et de déterminer leur degré d'influence. Les résultats sont exploités pour comprendre le phénomène et servent de référence pour tester les solutions analytiques trouvées.

La nécessité de trouver une formulation simplifiée des phénomènes complexes qui existent à l'aval d'une digue suite à une rupture oblige à exclure les résultats pour lesquels le régime hydraulique de l'écoulement est torrentiel car on ne peut analytiquement représenter la présence du ressaut.

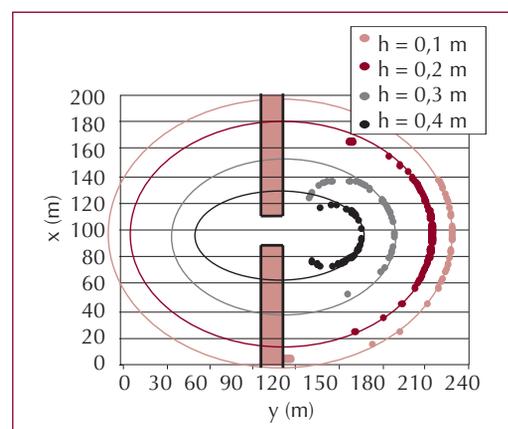
Pour comprendre l'évolution de l'inondation, on s'est intéressé à la répartition des hauteurs et des vitesses dans la plaine d'inondation. Les résultats trouvés montrent qu'il est possible d'approcher les iso-vitesses et les iso-hauteurs par des ellipses dont la forme et la position sont indépendantes des paramètres du système et du temps. Les figures 2 et 3 illustrent ces résultats pour une rivière de vitesse 3 m/s et une digue de hauteur 20 m avec une brèche de 10 m de long et une hauteur d'eau amont h_0 de 2 m.

Pour les iso-vitesses, les ellipses approchantes sont en fait des cercles symétriques par rapport à l'axe de la brèche et tangents aux extrémités de la brèche.

► Figure 2 – Iso-vitesses 100 s après la rupture de la brèche.



▼ Figure 3 – Iso-hauteurs 100 s après la rupture de la brèche.



Pour les iso-hauteurs, les ellipses approchantes sont symétriques par rapport à l'axe de la brèche et par rapport au pied de la digue avec un rapport des demi grands axes constant et égal à 1,3.

Le calcul des équations de ces ellipses indépendamment des paramètres du système et du temps permet de passer d'un problème en deux dimensions à un problème en une dimension en définissant un nouvel axe w avec l'origine au niveau du pied de la digue comme indiqué sur la figure 4.

En posant (x_0, y_0) l'origine de l'axe w correspondant à la position de la digue et de la brèche et (x, y) un point de la plaine d'inondation, on peut calculer :

$$w_1 = \frac{1}{2} (A + \sqrt{A^2 + Lo^2}) \quad (4)$$

avec :

$$A = y - y_0 + \frac{(x - x_0)^2}{(y - y_0)} - \frac{Lo^2}{4 \cdot (y - y_0)} \quad (5)$$

puis :

$$w_2 = \sqrt{1,3^2 \cdot (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \quad (6)$$

où Lo est la largeur de la brèche.

On a alors : $|v(x, y)| = |v(w_1)|$ et $h(x, y) = h(w_2)$.

Finalement, en connaissant l'évolution des hauteurs et des vitesses sur w , on connaît la répartition des hauteurs et des vitesses sur toute la plaine d'inondation.

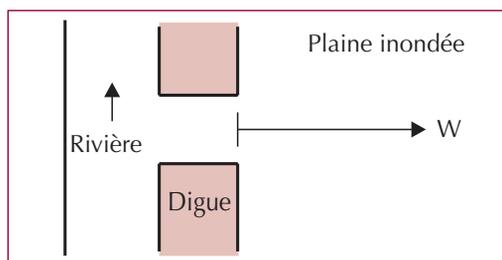
Pour connaître ces évolutions selon w , il est nécessaire de trouver une formulation simplifiée de l'avancée et de la vitesse du front. Il ressort des tests effectués que les paramètres Lo , ho et vr influent sur ces grandeurs. Le maillage influe peu et la largeur de la digue L est prise indirectement en compte dans la position de l'axe w . Les tests effectués pour des valeurs différentes de ho , Lo et vr permettent de trouver une formulation simplifiée de ces deux grandeurs :

Avancée du front :

$$a(t) = \frac{K^{0,45} \cdot \sqrt{ho} \cdot t \cdot Lo^{0,3} \cdot vr^{0,05}}{1,1} \quad (7)$$

Vitesse du front :

$$Vf(t) = \frac{K^{0,45} \cdot \sqrt{ho} \cdot Lo^{0,3} \cdot vr^{0,05}}{2,2 \cdot \sqrt{t}} \quad (8)$$



◀ Figure 4
– Positionnement de l'origine de l'axe générique des distances à la brèche.

Avec K coefficient de Strickler, ho hauteur d'eau initiale (cote d'eau dans le cours d'eau à laquelle on soustrait la cote de la plaine d'inondation), Lo largeur initiale de la brèche et vr la vitesse dans la rivière.

Ces deux paramètres permettent ensuite d'utiliser la formulation de Whitham (Whitham, 1955) pour connaître la hauteur d'eau dans la zone de front. Pour une abscisse x de la zone de front :

$$h(x(t)) = \left[\frac{7}{3} Vf(t)^2 \frac{1}{K^2} (a(t) - x(t)) \right]^{\frac{3}{7}} \quad (9)$$

avec K coefficient de Strickler.

Cette formule donne une bonne approximation des résultats donnés par Rubar 20 et sera confrontée aux résultats expérimentaux disponibles (par exemple : Harmas *et al.*, 2004).

La connaissance complète de la zone proche nécessite de poursuivre les recherches afin de trouver l'expression de h dans la zone qui précède le front et l'expression de la vitesse sur tout l'axe w . Il pourra être utile de s'inspirer des travaux réalisés par Ritter (Ritter, 1892) qui approche analytiquement les hauteurs d'eau et vitesses suite à une rupture de barrage.

Il faudra ensuite prendre en compte la pente de la plaine d'inondation et la variation de la hauteur d'eau dans la rivière pour considérer tous les paramètres du système.

Description du lit majeur

Dans CastorDigue, le lit majeur est défini de la même façon que le lit mineur. L'objectif dans ce module est de calculer la propagation de la vague de submersion. La méthode de calcul s'inspire de celle utilisée dans le logiciel Castor (Paquier et Robin, 1997 ; 1995).

On suppose que le débit maximal dans chacune des sections du lit majeur dépend peu de la topographie, mais plutôt de la distance à la brèche. La résolution se fait alors à l'aide d'abaques.

L'hypothèse de rupture progressive de la digue nécessite de considérer une rupture instantanée dans une section fictive, en amont de la section réelle.

La rupture de digue implique des paramètres différents de ceux de la rupture de barrage, il est donc indispensable d'adapter le calcul :

- la hauteur de la retenue est remplacée par le maximum de la différence entre la cote amont et la cote de fond de brèche ;
- le maximum de la somme du débit dans la brèche et du débit de déversement se substitue au débit de pointe ;
- l'intégration de cette somme permet de déduire le volume de la retenue ;
- le profil de la section fictive est pris rectangulaire.

À partir de la hauteur de la retenue et du profil de la section fictive, on calcule un débit fictif. Avec ce débit fictif et le débit de pointe, on obtient l'abscisse de la section fictive (inférieure à celle de la section de la brèche), qui va être utilisée pour calculer le débit maximum dans les sections aval du lit majeur (via des abaques donnant l'amortissement du débit maximal).

Les hauteurs d'eau maximales sont calculées en résolvant l'équation du régime uniforme. Les vitesses avec la formule (10) (Paquier et Robin, 1997).

$$v_{max} = 1,2 \frac{Q_{max}}{S(h_{max})} \quad (10)$$

Le temps de propagation est calculé de façon indépendante pour chaque section par l'équation

(11) en prenant en compte un calcul de vitesse moyenne (Paquier et Robin, 1997). Ce temps de propagation ajouté au temps de formation de la brèche donnera alors le temps d'arrivée du premier danger (ou de la vague) compté à partir de l'instant initial de rupture.

$$t_{propagation} = 2 \frac{X_{section} - X_{section\ fictive}}{V_{section} + V_{section\ fictive}} \quad (11)$$

Conclusions et perspectives

En juillet 2004, l'interfaçage informatique permettait d'entrer toutes les données nécessaires à l'édition des scénarios.

La recherche d'une formulation simplifiée pour décrire la zone proche étant en cours d'élaboration, la hauteur d'eau dans cette zone est calculée, dans la version actuelle de CastorDigue, avec la formule du régime uniforme appliquée sur un demi-cercle de rayon correspondant à la distance à la brèche. Ainsi, une version provisoire du logiciel CastorDigue est opérationnelle. Il est possible de simuler des ruptures de brèches et d'obtenir des résultats pour les quatre modules de calcul. Ceci a permis d'effectuer des premiers tests concluants pour les trois modules dont la programmation est actuellement achevée.

Pour la zone proche qui reste le seul module à programmer, il faut compléter les travaux réalisés en décrivant la répartition des hauteurs d'eau et des vitesses dans la plaine d'inondation et en prenant en compte les paramètres qui ne l'ont pas encore été comme la pente de la plaine et la variation de la hauteur d'eau dans la rivière ; une seconde version intégrant ces fonctionnalités devrait être disponible en 2006. □

Résumé

Le risque d'inondation dû à la rupture d'une digue le long d'une rivière est avéré suite aux événements récents (crues de 2002 et 2003 : Gard, Vidourle, Rhône...). Une des difficultés pour estimer ce risque tient à la localisation de la brèche, difficilement prévisible compte tenu des informations généralement existantes. Afin de tester un grand nombre de localisations possibles, le Cemagref met au point un outil de simulation hydraulique simplifié de l'ensemble des processus : rupture de la digue et propagation à l'aval. Cet article présente les grandes lignes de cette méthode ainsi que les premières étapes de validation.

Abstract

The risk caused by the flooding due to a breach across a dike along a river is established with recent disasters (floods in 2002 and 2003 : Gard, Vidourle, Rhône...). One of the main difficulty to assess this risk stays in defining where the breach will occur. To investigate a lot of locations, a simplified method is developed to represent all the processes : dike breaching and flood propagation downstream the dike. In this paper, the corresponding calculation methods are detailed and preliminary validation tests are presented.

Bibliographie

- HARMS, M., BRIECHLE, S., KÖNGETER, J., SCHWANENBERG, D., 2004, Dike-break induced flow : validation of numerical simulations and case study. *In* : A.C.M. Greco, R. Della Morte (Editor), River Flow 2004. A. Balkema, Napoli, Italy, p. 937-944.
- MORRIS, M., HASSAN, M., 2004, Impact, Breach Analysis Workshop, 21-23rd April 2004, rapport, H.R. Wallingford, Wallingford.
- PAQUIER, A., 2001, Rupture de barrage : validation des modèles numériques du Cemagref dans le cadre de CADAM, *Ingénieries EAT*, décembre 2001 (28), p. 11-21.
- PAQUIER, A., NOGUES, P., HERLEDAN, R., 1998, Model of piping in order to compute dam break wave, CADAM, Proceedings from the Munich meeting, L2985, Luxembourg, European Commission, Science Research Development, *Hydrological and hydrogeological risks*, p. 47-51.
- PAQUIER, A., ROBIN, O., 1995, Une méthode simple pour le calcul des ondes de rupture de barrage, *La Houille Blanche* (8), p. 29-34.
- PAQUIER, A., ROBIN, O., 1997, Castor, a simplified dam-break wave model, *Journal of hydraulic engineering*, 123 (8), p. 724-728.
- PAQUIER, A., 1994, Calcul simplifié des ondes de rupture de barrage, *Informations techniques du Cemagref*, décembre 1994, v. 96,1.
- PAQUIER, A., 1988, 1-D and 2-D models for simulating dam-break waves and natural floods. Concerted action on dam-break modelling, proceedings of the CADAM meeting, Wallingford, United Kingdom. M. Morris, J.-C. Galland and P. Balabanis. L2985, Luxembourg, European Commission, Science Research Development, *Hydrological and hydrogeological risks*, p. 127-140.
- RITTER, A., 1892, Fortpflanzung der wasser-wellen, *Zeitschrift des Vereins deutscher ingenieure*, 36, N° 33, p. 947-954.
- ROBIN, O., 1990, Méthode simplifiée de calcul d'onde de submersion résultant de la rupture d'un barrage, Mémoire de DEA, Université Claude Bernard, Lyon 1, 64 p.
- WHITHAM, G.B., 1955, The effects of hydraulic resistance in the dam-break problem, Proceedings of the Royal Society of London, Series A, 227, p. 399-407.

Photo : Patrice Mériaux (Cemagref)

