

Propagation de l'onde de submersion consécutive à la rupture des digues en milieu urbain – exemples de l'Isère et du Drac

A. MASSON¹, J. VIARRE¹, T. MONIER¹, M. PINHAS², O. MANIN³

¹ARTELIA Eau & Environnement, Echirolles, arielle.masson@arteliagroup.com

²ADIDR (Association Départementale Isère Drac Romanche), Grenoble, m.pinhas@adisere.fr

³SYMBHI (Syndicat Mixte des Bassins Hydrauliques de l'Isère), Grenoble, o.manin@cg38.fr

Résumé

Le décret du 11 décembre 2007 relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques a prévu la réalisation d'études de dangers pour les digues classées de A à C. En particulier, une analyse de la propagation de l'onde consécutive à la rupture de la digue doit être réalisée. Lorsque la plaine à l'arrière de la digue est très urbanisée, une approche par modélisation simplifiée (1D) ne permet pas de rendre compte fidèlement des caractéristiques de l'onde, par exemple de l'effet de concentration de l'écoulement dans les rues. C'est pourquoi ARTELIA a développé une méthodologie fondée sur une modélisation bidimensionnelle avec le logiciel TELEMAT (propriété d'EDF-LNHE). Cette approche, s'appuyant sur une représentation réaliste du terrain naturel avec une prise en compte affinée du bâti dans la plaine, a notamment été mise en œuvre pour :

- l'étude de dangers des digues et merlons sur le secteur 1 du projet Isère amont (amont immédiat de Grenoble), pour le compte du Syndicat Mixte des Bassins Hydrauliques de l'Isère (SYMBHI).
- l'étude de dangers de la digue de classe A en rive gauche du Drac entre l'amont du pont du Rondeau et la confluence avec l'Isère, pour le compte de l'Association Départementale Isère-Drac-Romanche (ADIDR).

La méthodologie mise en œuvre et les résultats obtenus pour ces deux études sont présentés dans cet article.

Abstract

The decree of December 11th, 2007 related to the security of the hydraulic works planned the realisation of hazard studies for dykes classified from A to C. In particular, an analysis of the distribution of the wave consecutive to the break of the dyke must be realised. When the plain behind the dyke is very urbanized, an approach by simplified modelling (1D) does not allow a faithful representation of the wave characteristics, for example the effect of concentration of the flow in streets. For that reason, ARTELIA has developed a methodology using a bidimensional modelling with the TELEMAT software (property of EDF-LNHE). This approach, based on

a realistic representation of the natural ground with a consideration refined by the building in the plain, was implemented in particular for:

- The hazard study of dykes and bunds on the sector 1 of the project upstream Isère river (immediate upstream of Grenoble), for the Mixed Syndicate of the Hydraulic Basins of the Isère River (SYMBHI).
- The hazard study of the dyke on left bank of the Drac River, between the upstream of the Rondeau bridge and the confluence with the Isère River, for the Departmental Association Isère-Drac-Romanche (ADIDR).

The implemented methodology and the results obtained for these two studies are presented in this article.

Introduction

Le SYMBHI est un syndicat mixte portant les grands projets de gestion intégrée de bassin versant sur les grandes rivières du département de l'Isère : Isère et Romanche. Il assure la maîtrise d'ouvrage du projet Isère Amont, basé sur le ralentissement dynamique des crues de l'Isère et ayant pour but de protéger les zones urbanisées inondables entre Pontcharra et Grenoble (Isère) contre une crue bicentennale. De son côté, l'ADIDR assure la surveillance et l'entretien de 221 km de digues sur les rivières Isère, Drac et Romanche. Ces deux structures ont dû récemment mettre en œuvre la nouvelle réglementation sur les études de danger. En effet, le décret du 11 décembre 2007 relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques a prévu la réalisation d'études de dangers pour les digues classées de A à C. En particulier, la partie 8 du dossier prévoit une analyse de la propagation de l'onde consécutive à la rupture de la digue.

La reproduction des écoulements en aval immédiat d'une brèche est un phénomène complexe à modéliser notamment du fait de la cinétique induite et de la propagation de l'onde sur un terrain initialement sec. Dans le cas où la plaine à l'arrière de la digue est densément urbanisée, la schématisation simplifiée des écoulements par modélisation unidimensionnelle est insuffisante. Elle ne permet pas de reproduire fidèlement les axes préférentiels d'écoulements ainsi que les effets de seuil au sein des zones de stockage. Aussi, étant donnée l'importance de l'intensité et de la

cinétique de l'inondation dans la définition des risques induits par une brèche dans un ouvrage d'endiguement, une modélisation numérique bidimensionnelle semble plus adaptée. Ce type de modélisation se base sur une représentation affinée du terrain naturel et des bâtiments urbains et représente un moyen adapté de rendre compte de la propagation de l'onde de rupture.

Après avoir brièvement défini le périmètre de l'étude ainsi que les scénarios de brèches envisagés, nous illustrerons les performances de la modélisation numérique pour deux cas de rupture : une en rive gauche de l'Isère et une en rive gauche du Drac.

Périmètre d'étude

Les linéaires concernés par ces deux études de dangers font l'objet d'un classement en catégorie A, B ou C suivant les critères de la réglementation.

Digues de l'Isère

Concernant les digues de l'Isère, la présente étude se focalise sur un linéaire de 28 km à l'aval de la vallée du Grésivaudan depuis les communes de Saint-Ismier et Villard-Bonnot jusqu'à l'agglomération grenobloise (Figure 1). Le système d'endiguement concerné se compose d'ouvrages de plusieurs types :

- les digues situées en bordure du lit mineur de l'Isère dont le niveau de protection est la crue trentennale au droit des champs d'inondation contrôlés (CIC), et la crue bicentennale au droit des zones protégées (le niveau de sécurité est la crue cinq-centennale pour tous les cas),
- les merlons de cantonnement des CIC en lit majeur de l'Isère. Les débordements dans ces champs d'inondation sont contrôlés par des déversoirs d'alimentation, les niveaux d'eau maximum étant régulés par des déversoirs de sécurité.

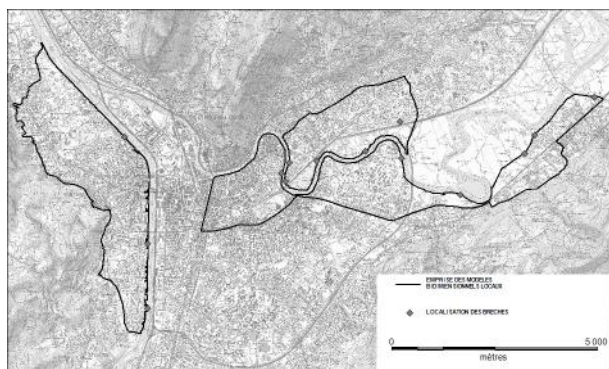


FIGURE 1: EMPRISE DES MODELES NUMERIQUES BIDIMENSIONNELS ET EMPLACEMENT DES BRECHES

Digues du Drac

Concernant le linéaire du Drac, ce sont 5.5 km de digues

classés en catégorie A et implantés sur les communes de Seyssins, Seyssinet, Fontaine et Sassenage qui sont ici étudiés (Figure 1). Aucun déversoir de sécurité ni ouvrage hydraulique n'est recensé le long de l'ouvrage. La digue est en outre constituée par des remblais en terre dont la géométrie en termes de largeur de crête et pente de talus reste similaire sur l'ensemble du linéaire. Son niveau de protection est la crue cinq-centennale.

Les sections ci-dessous exposent la méthodologie mise en œuvre afin de simuler la propagation de l'onde de submersion consécutive à une rupture localisée de ces deux digues selon les scénarios décrits ci-après.

Scénario de défaillance

Evaluation et quantification de l'aléa

La gravité des conséquences d'une défaillance d'un ouvrage d'endiguement dépend essentiellement des facteurs suivants :

- la localisation de la zone de défaillance (zone protégée particulièrement vulnérable à l'arrière de l'ouvrage de protection),
- le type de défaillance, lui-même dépendant de la sensibilité intrinsèque des ouvrages et déterminant la cinétique de la rupture.

Dans le cas de l'Isère, le scénario de rupture peut en outre être aggravé par une surcote liée à l'absence d'un écrêtement complet des casiers d'inondation amont (dysfonctionnement d'ouvrages d'alimentation et/ou de vidange).

Concrètement, la gravité du scénario de défaillance sera ici qualifiée au regard de l'intensité de l'inondation (expansion et hauteurs d'eau de la zone inondée), de la cinétique du phénomène (vitesses de propagation de l'onde de rupture) et de la vulnérabilité des enjeux en termes de population impactée.

Localisation préférentielle des scénarios de défaillance

Afin de considérer les situations les plus pénalisantes, la localisation des scénarios de rupture a tout d'abord été déterminée en fonction des enjeux exposés. L'emplacement de la brèche a ensuite été affiné par identification des mécanismes de rupture les plus susceptibles de se produire (érosion de surface par surverse, érosion externe par affouillement, érosion interne par effet de renard hydraulique ou rupture d'ensemble), ces phénomènes étant eux-mêmes dépendants de la géométrie de l'ouvrage, des protections des talus et des pieds de digues, du gradient hydraulique à travers l'ouvrage, du coefficient de sécurité au glissement, de la largeur du franc-bord ainsi que des travaux de confortement réalisés. Il en résulte les scénarios résumés en Tableau 1 : 11 scénarios sur le linéaire de l'Isère et 3 sur celui du Drac.

Géométrie des brèches

Après avoir recensé de récentes études visant à prédire les caractéristiques des brèches (forme, cinétique, processus de

formation), Zerrouck et Marche [1] ont montré la très grande diversité dans les approches utilisées. Le choix de ces caractéristiques se base encore essentiellement sur l'analyse de ruptures antérieures et la prise en compte du phénomène d'érosion par surverse sur la crête de la digue. Fuamba et Marche [2] soulignent les limitations de ces approches avant de décrire les processus physiques de formation d'une brèche dans le cas d'une digue submergée notamment par modélisation physique. Ne pouvant prendre en considération les phénomènes décrits par Fuamba et Marche [2], les caractéristiques des brèches considérées dans cette étude ont été déterminées par comparaison avec des observations antérieures. L'historique des défaillances des ouvrages considérés se résume à la rupture de la digue de l'Isère au Palluel (commune de Voreppe) le 19 Juin 1948. Aucun incident n'est recensé à ce jour sur la digue en rive gauche du Drac. Les archives de l'ADIDR et de l'Institut des Risques Majeurs de Grenoble (IRMA) permettent de reconstituer le déroulement de cette crue qui entraîna la rupture par érosion externe de deux tronçons de la digue en rive droite de l'Isère sur une largeur totale de 250 m. L'inondation des vals de rive droite due à cette défaillance entraîna également la rupture par surverse de la digue du Palluel sur une largeur totale de 120 m. En adaptant les conclusions de ce retour d'expérience pour les hauteurs de digues présentes, nous retiendrons une largeur de brèche de 50 à 75 m dans le cas des digues du Drac contre 25 à 100 m dans celui de l'Isère.

La géométrie de la brèche ainsi définie, la rupture sera modélisée par un effondrement progressif de la digue sur la largeur totale de la brèche. Le fossé d'érosion formé à l'aval immédiat dans le cas d'un sol meuble n'est pas représenté. Il convient de définir à présent la cinétique et la durée d'ouverture pour chaque scénario.

Cinétique et durée d'ouverture

Préliminairement à la description de la cinétique de rupture, il est nécessaire d'indiquer que le déclenchement de chaque défaillance coïncide avec l'instant où la charge hydraulique est maximale au droit de l'ouvrage en question pour sa crue de protection. Comme indiqué précédemment, les digues de l'Isère ont un niveau de protection bicentennal correspondant à un débit de pointe de $Q_{200} = 1890 \text{ m}^3/\text{s}$ alors que les digues du Drac ont un niveau de protection cinq-centennal correspondant à un débit de pointe de $Q_{500} = 2400 \text{ m}^3/\text{s}$.

La plupart des auteurs s'accorde sur le fait que la détermination des cinétiques de rupture présente des incertitudes très importantes. Elle dépend notamment du matériau constituant la digue, de la durée de la crue, de sa vitesse de propagation, de l'intensité de la charge hydraulique au droit de l'ouvrage, des conditions de surverse ou encore de la couverture végétale côté plaine. Froehlich et al. (cf. [3]-[5]) ont mis en place une analyse statistique sur la base de l'observation de 63 brèches dans des digues fusibles aboutissant à des vitesses d'effondrement longitudinal de l'ordre de 1 m à 2 m par minute.

Par cohérence avec ces estimations, deux modes de ruptures sont ici envisagés :

- rupture à cinétique rapide où la vitesse d'effondrement est de 2 m/min
- rupture à cinétique lente où la vitesse d'effondrement est comprise entre 0.5 m/min et 0.9 m/min.

Une fois les caractéristiques des ruptures établies (Table 1), l'estimation du débit transitant par la brèche et la propagation de l'onde de rupture induite ont pu être représentées par modélisation numérique, comme décrit ci-après.

Modélisation des ondes de rupture

La représentation de la propagation de l'onde de rupture repose sur l'utilisation complémentaire de deux types de modélisation :

- (i) une modélisation unidimensionnelle à l'aide du logiciel CARIMA [6]-[7] mise en place pour les études d'inondabilité des vallées du Drac et de l'Isère (Sogreah, 1999 et 2001). Elle permet la propagation de la crue de protection sur l'ensemble du linéaire et fournit le débit transitant par la brèche (voir section suivante). Ce débit sera ensuite utilisé comme condition aux limites du modèle bidimensionnel.
- (ii) plusieurs modèles bidimensionnels locaux (logiciel TELEMAC-2D [8], propriété de EDF-LNHE) représentant les milieux urbains en arrière des zones de défaillance décrites précédemment.

Modélisation unidimensionnelle de l'Isère et du Drac et estimation du débit transitant par la brèche

Le modèle CARIMA schématise les principaux axes d'écoulement en lit mineur et au sein des casiers d'inondation. Le lit mineur et les champs d'inondation sont représentés par un ensemble de points reliés par des tronçons d'écoulement. L'état hydraulique se caractérise ainsi par les trois variables suivantes :

- le niveau de la surface libre en chaque point de calcul,
- le débit en chaque point du lit mineur,
- le débit pour chaque tronçon d'écoulement dans le champ d'inondation.

Les tronçons d'écoulement entre lit mineur et casier d'inondation peuvent être de plusieurs natures. Concernant la représentation des ouvrages d'endiguement, on utilise une liaison de type seuil où le débit déversant est estimé par les équations hydrauliques classiques.

La modélisation de la brèche correspondra donc en un effondrement de la cote de cette liaison de type seuil jusqu'à atteindre une cote finale selon la cinétique de rupture envisagée. Il en résulte l'estimation d'un hydrogramme de rupture qui sera injecté en frontière des modèles bidimensionnels décrits ci-après.

Ce choix de modélisation a été appliqué en 2001 au linéaire de l'Isère s'étendant de Pontcharra jusqu'au seuil de Pique-Pierre (Grenoble) et en 1999 sur le linéaire du Drac depuis le pont de la Rivoire jusqu'à la confluence avec l'Isère. Ces deux modèles sont régulièrement mis à jour par actualisation des profils en travers du lit mineur et intègrent l'ensemble des aménagements hydrauliques récents préconisés.

Modélisation bidimensionnelle des écoulements en zone urbaine

Le logiciel TELEMAC-2D permet de résoudre, par la méthode des éléments finis, les équations de Barré de Saint-Venant bidimensionnelles déterminant la dynamique des écoulements à surface libre. Pour cela, il s'appuie sur une représentation fine du terrain naturel via un maillage triangulaire non structuré et contraint de manière à représenter les éléments topographiques singuliers (remblais, talus, fossés, etc.) ainsi que les axes privilégiés d'écoulement (rues goudronnées). L'état hydraulique se caractérise à chaque pas de temps et en chaque point de calcul par la hauteur d'eau, le niveau d'eau et la vitesse d'écoulement horizontale moyennée sur la verticale. Cette discrétisation spatiale permet une représentation de qualité des axes d'écoulement mais aussi des effets de seuil au sein des zones de stockage ainsi que des effets cinétiques liés aux obstacles que constituent les bâtiments urbains (considérés comme insubmersibles). Le fait de pouvoir modifier localement la finesse du maillage permet en outre de représenter de manière plus détaillée les écoulements au sein des zones à enjeux ainsi que la répartition des vitesses en aval immédiat de la brèche (Figure 2).

Aucun calage ne pouvant être mis en place sur ces modèles urbains locaux, la prise en compte de la rugosité du terrain (formulation de type « Strickler ») a été déterminée par expérience, à partir des caractéristiques des sols représentés (prairies, routes, zones boisées, zones cultivées, voie ferrée etc.) Le débit transitant par la brèche, initialement évalué par le modèle unidimensionnel, est injecté sur la frontière du modèle bidimensionnel sur une largeur correspondant à la largeur de la brèche. Les champs de hauteurs d'eau et de vitesses d'écoulement permettent de rendre compte de la propagation de l'onde de rupture via des axes préférentiels ainsi que d'estimer l'expansion et la gravité de l'inondation induite.

Afin d'illustrer les performances de la modélisation bidimensionnelle et la complémentarité avec la modélisation unidimensionnelle, deux exemples de ruptures sont présentés en section suivante, à savoir :

- la rupture par surverse de la digue de classe A en rive gauche de l'Isère, au droit du cimetière Saint-Roch (commune de Grenoble),
- la rupture par érosion interne de la digue de classe A en rive gauche du Drac, au droit de la rue de la Liberté (commune de Fontaine).

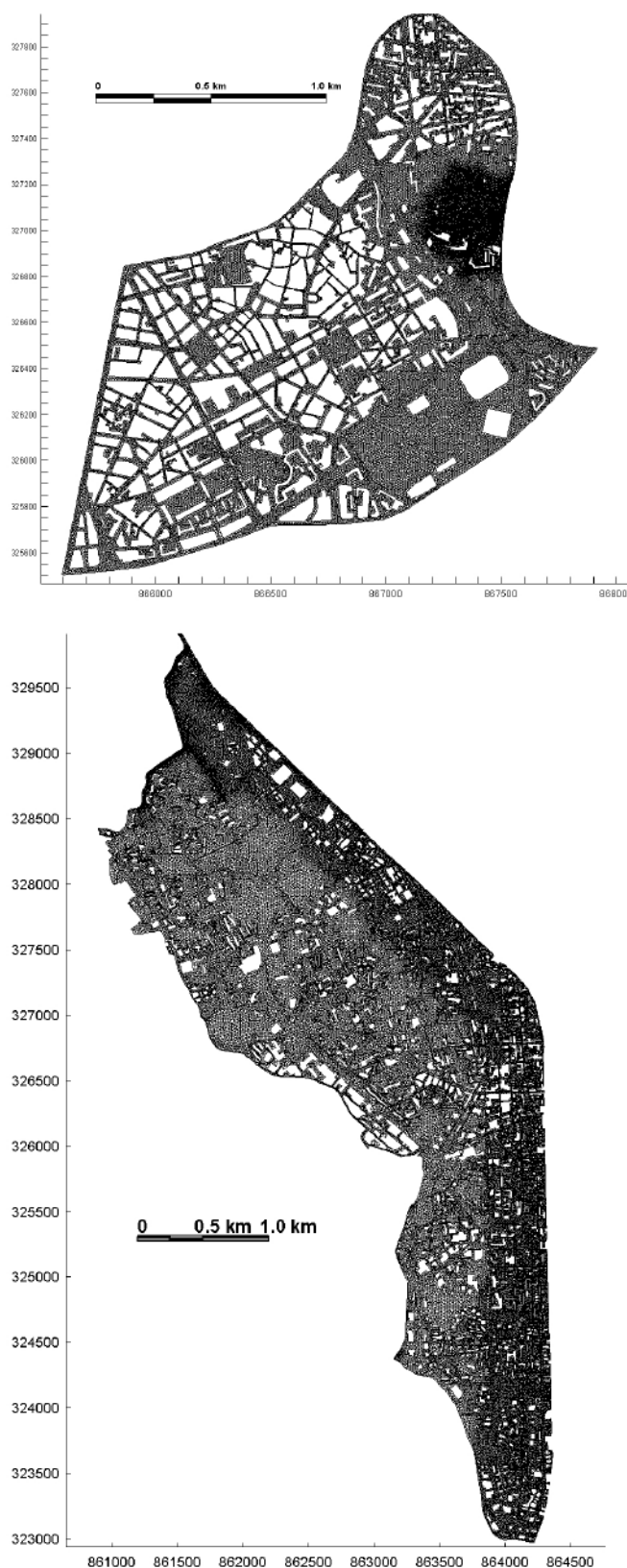


FIGURE 2: MAILLAGES DU MODELE 2D DE LA ZONE URBAINE DE GRENOBLE (HAUT) ET DE LA RIVE GAUCHE DU DRAC (BAS)

TABLEAU 1: CARACTERISTIQUES DES SCENARIOS DE RUPTURES ENVISAGES

Rivière / Type d'ouvrage	Commune	Mécanisme de rupture	Largeur de la brèche	Hauteur de la brèche	Cinétique	Débit de pointe	Enjeux
Isère / Digue	Gières	Surverse au droit du déversoir	100 m	2.85 m	2 m/min	232 m ³ /s	Zone urbaine de Gières
	Gières	Surverse au droit du déversoir	100 m	2.40 m	2 m/min	273 m ³ /s	Campus de Gières
	Grenoble	Surverse avec effondrement du mur du cimetière	25 m	0.59 m	0.5 m/min	42 m ³ /s	Zone urbaine de l'Ile Verte, cimetière
	Meylan	Surverse au droit du déversoir	100 m	2.30 m	2 m/min	235 m ³ /s	Quartier des Buclos
	La Tronche	Surverse	100 m		0.5 m/min	24 m ³ /s	CHU de La Tronche
Isère / Merlon	Domène	Surverse du merlon	50 m	1.00 m	2 m/min	35 m ³ /s	Lotissements de 20 maisons
	Murianette	Surverse du merlon	50 m	0.51 m	2 m/min	57 m ³ /s	Zone d'activité de Murianette
	Murianette	Surverse du merlon	50 m	1.70 m	2 m/min	65 m ³ /s	Zone d'activité
	Meylan	Surverse du merlon	50 m	1.20 m	2 m/min	46 m ³ /s	Zone urbaine, centre commercial, collège
	Meylan	Surverse du merlon et de la digue	50 m	2.00 m pour la digue et 1.00 m pour le merlon	2 m/min	33 m ³ /s	Zone urbaine dense
	La Tronche	Surverse du merlon	50 m	1.20 m	2 m/min	30 m ³ /s	Cimetière, hôpital
Drac / Digue	Seyssins	Erosion externe	75 m	0.80 m	0.83 m/min	88 m ³ /s	Zone urbaine
	Fontaine	Erosion interne	75 m	2.50 m	0.83 m/min	250 m ³ /s	Zone urbaine
	Sassenage	Surverse	40 m	3.00 m	0.67 m/min	250 m ³ /s	Zone urbaine

Rupture de la digue de classe A en rive gauche de l'Isère, au droit du cimetière Saint-Roch

Le mécanisme de rupture considéré dans ce cas est une rupture par surverse d'une largeur de 25 m au droit de la rue du Souvenir longeant le mur Sud du cimetière Saint-Roch de Grenoble. Le niveau maximum atteint par l'Isère au droit de l'ouvrage pour une crue bicentennale est $z = 212.94$ m NGF alors que la cote du terrain naturel à l'arrière de la digue est de $z_{TN} = 212.30$ m NGF. La faible charge hydraulique induite entraîne le choix d'une cinétique lente caractérisée par une vitesse d'effondrement de 0.5 m/min. On considère néanmoins que le débit maximal de la brèche entraîne une rupture partielle du muret protégeant le cimetière Saint-Roch, uniquement au droit de l'ouvrage et sur une largeur de 25 m. L'hydrogramme de rupture est présenté en Figure 3.

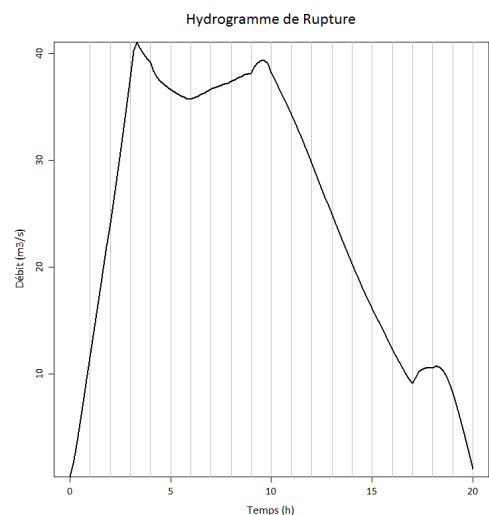


FIGURE 3: HYDROGRAMME DE RUPTURE DE LA DIGUE EN RIVE GAUCHE DE L'ISERE, AU DROIT DE LA RUE DU SOUVENIR

Propagation de l'onde de rupture

On note par T_0 l'instant du déclenchement de la brèche. L'onde de rupture se propage initialement au sein du cimetière, les écoulements étant guidés par les murets de protection considérés comme résistants à l'écoulement. A T_0+1h35 , les terrains au pied de l'une des trois Tours de l'Ile Verte (boulevard du Maréchal Leclerc) sont inondés. L'écoulement atteint le rond-point de l'Ile Verte 2h30 après le déclenchement de la rupture avant d'inonder tout le quartier de l'Ile Verte à T_0+4h . Les écoulements se propagent alors à la fois en direction de la place de Verdun via la rue de l'Alma, aussi vers le centre historique de Grenoble via l'avenue du Maréchal Randon et la Place Notre Dame. 13h25 après le déclenchement de la brèche, l'Hôtel de Ville de Grenoble est sous les eaux. Le cours Jean Jaurès est également inondé depuis les berges de l'Isère jusqu'à la rue Condorcet. La décrue s'entame à T_0+20h alors que la zone inondée comprend le quartier de l'Ile Verte, le centre-ville, l'ensemble des rues entre le cours Jean Jaurès et le boulevard

Agutte Sembat ainsi que le parc Paul Mistral (Figure 4).

Hauteurs d'eau et vitesses maximales simulées

Les hauteurs maximales atteignent localement 3 m notamment au niveau de la place de Verdun. La zone d'aléa fort au vu des hauteurs, définie comme étant l'emprise pour laquelle les hauteurs d'eau sont supérieures à 1 m, comprend :

- la majeure partie de l'Ile Verte,
- les quartiers situés entre les berges de l'Isère et les rues Condorcet et Lesdiguières,
- les quartiers situés entre les berges de l'Isère et les boulevards du Maréchal Lyautey et Jean Pain.

Les vitesses maximales simulées excèdent localement 3 m/s au droit de la brèche. Au sein de la zone urbaine, elles n'excèdent 1 m/s qu'au franchissement du portail Nord du cimetière ainsi qu'au niveau des zones de contraction en entrée de rues étroites.

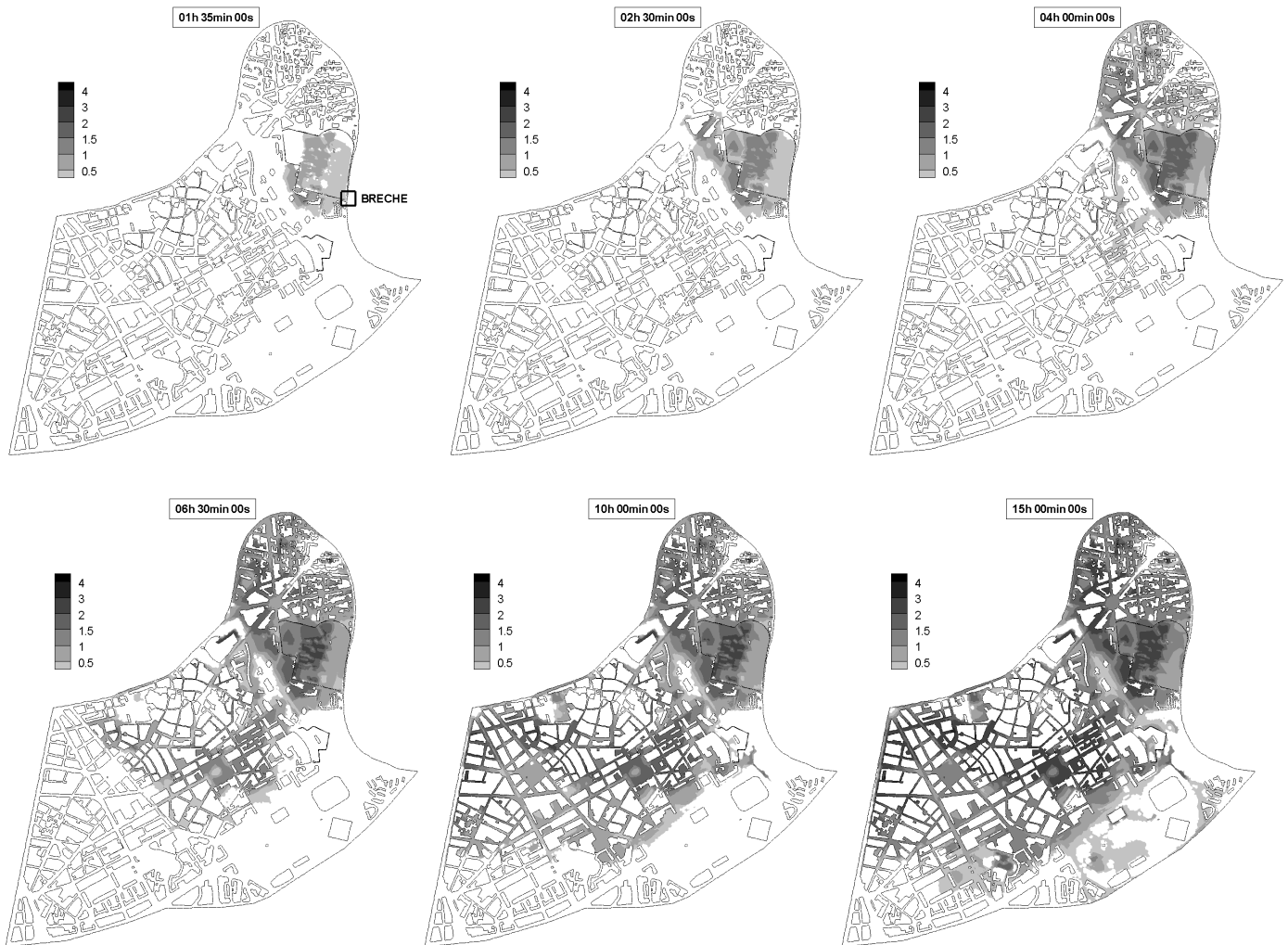


FIGURE 4 : PROPAGATION DE L'ONDE DE RUPTURE CONSECUTIVE A LA DEFAILLANCE DE LA DIGUE EN RIVE GAUCHE DE L'ISERE

Rupture de la digue de classe A en rive gauche du Drac, au droit de la rue de la Liberté

Le scénario de défaillance illustré dans ce cas est une rupture par érosion interne sur une largeur de 75 m au droit de la rue de la Liberté (commune de Fontaine). La simulation de cette brèche présente un enjeu particulièrement important compte tenu de la densité de population dans la zone protégée. De plus, la cinétique de propagation de l'inondation est vraisemblablement amplifiée en raison de la localisation de la brèche au droit de la rue de la Liberté. Le niveau maximum atteint par le Drac au droit de l'ouvrage pour une crue centennale est $z = 216.80$ m NGF alors que la cote du terrain naturel à l'arrière de la digue est de $z_{TN} = 213.30$ m NGF (d'où une charge hydraulique induite de 3.50 m). Du fait de la hauteur importante de l'ouvrage, nous considérons ici un effondrement jusqu'à la cote $z = 214.30$ m NGF soit un mètre au-dessus du terrain naturel. La durée d'ouverture a été estimée à 1h30 induisant une cinétique de rupture de 0.83 m/min. Dans ces conditions, le débit de pointe transitant par la brèche est approximativement de $Q = 250$ m³/s. L'hydrogramme de rupture est présenté en Figure 5.

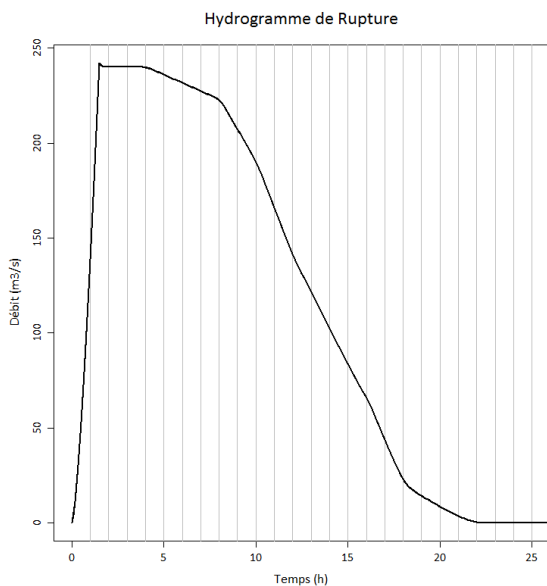


FIGURE 5: HYDROGRAMME DE RUPTURE DE LA DIGUE EN RIVE GAUCHE DU DRAC, AU DROIT DE LA RUE DE LA LIBERTE

Nous ne nous attacherons pas par la suite à décrire précisément la propagation de l'onde de rupture mais plutôt à synthétiser les principales caractéristiques. Une attention particulière sera portée à la définition des zones d'aléa fort que ce soit en termes de hauteurs d'eau ou de vitesses d'écoulement.

Caractéristiques de l'emprise inondée et cinétique de propagation de l'onde de rupture

L'importance du débit transitant par la brèche entraîne une cinétique d'inondation très rapide. Cette dynamique induit une inondation immédiate de la zone urbaine en arrière immédiat de l'ouvrage, puis une propagation vers l'Ouest et le Nord-Ouest du fait de la pente naturelle de la plaine.

Détermination des zones d'aléa fort

L'évaluation de la gravité des conséquences d'une défaillance se base sur un comptage de la population dans les zones dites d'aléa fort. Ces zones sont ici délimitées au regard des hauteurs maximales simulées (> 1 m) et des vitesses d'écoulement (> 0.5 m/s). La Figure 6 illustre la répartition des zones d'aléa fort selon ces deux critères.

Concernant les hauteurs d'eau simulées, on remarque qu'elles dépassent 1 m au niveau :

- du tiers aval du casier d'inondation depuis le chemin du Drac,
- de la zone d'accumulation comprise entre les remblais d'accès routiers au pont du Vercors et au pont Esclangon,
- de plusieurs points bas dans le centre de la commune de Fontaine.

Cependant, le critère le plus impactant n'est pas celui basé sur les hauteurs d'eau mais davantage celui tenant compte des vitesses d'écoulement. En effet, l'écoulement se propage à une vitesse supérieure à 0.5 m/s sur l'ensemble de la zone inondée exceptés :

- à l'Ouest de l'avenue de Romans et au niveau du quartier du Gua,
- à l'extrémité Ouest de la zone inondée.

Ainsi, en cumulant l'impact des hauteurs d'eau et celui des vitesses d'écoulement, la quasi-totalité de l'emprise inondée est impactée par l'onde de submersion. Le bourg de Sassenage et le Sud de la commune de Fontaine, épargnés par l'onde de rupture pourraient néanmoins être utilisés pour l'évacuation.



FIGURE 6: REPARTITION DES ZONES D'ALEA FORT EN TERMES DE HAUTEURS D'EAU ET DE VITESSES D'ÉCOULEMENT

Conclusion

La méthodologie développée par ARTELIA pour les études de dangers des digues se base sur l'utilisation complémentaire d'une modélisation unidimensionnelle globale sur le cours d'eau et d'une modélisation bidimensionnelle détaillée de la zone protégée par la digue.

Cette méthodologie répond parfaitement à la demande réglementaire par la caractérisation fine de la propagation de l'onde (intensité et cinétique) consécutive à la défaillance de la digue, en particulier lorsque celle-ci protège une plaine

densément urbanisée. Elle permet également de déterminer la gravité associée à chaque cas de défaillance par l'évaluation précise des populations impactées en zones d'alea fort. Le degré de détail utilisé rend en effet possible une analyse à l'échelle de la rue, voire même du bâtiment.

Pour l'Isère amont et le Drac, les dossiers d'études de dangers des digues ont été remis en décembre 2012 pour examen par les services instructeurs. La méthodologie présentée ici a ensuite été proposée et reprise avec succès notamment dans le cadre des études de dangers des digues de l'Eau d'Olle, des digues de l'Isère en aval de Grenoble ou bien encore des digues de la Rivière des Galets et de la Ravine Charpentier à La Réunion.

Remerciements

Nous tenons à remercier particulièrement nos interlocuteurs de l'Association Départementale Isère-Drac-Romanche ainsi que ceux du Syndicat Mixte des Bassins Hydrauliques de l'Isère pour leur coopération et leur disponibilité.

Références

- [1] Zerrouk N.E., Marche C. (2001). *Forecasting the breaches of failed earth-fill dams are still difficult*. Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 28, pp. 120-132.
- [2] Fuamba M., Marche C., Pelletier C. (2002). *Descriptif du processus de formation de la brèche lors de la rupture d'une digue submergée*. Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering, 2002.
- [3] Froehlich, D.C. (1987). *Embankment-dam breach parameters*. Hydraulic Engineering, Proc. 1987 ASCE National Conf. on Hydraulic Engineering, New York, 570-575.
- [4] Froehlich, D.C. (1995a). *Embankment dam breach parameters revisited*. Water Resources Engineering, Proc. 1995 ASCE Conf. on Water Resources Engineering, New York, 887-891.
- [5] Froehlich, D.C. (1995b). *Peak outflow from breached embankment dam*. J. Water Resour. Manage. Div., Am. Soc. Civ. Eng., 121 1, 90-97
- [6] Cunge J.A., Holly F.M.Jr, Verwey A (1980). *Practical Aspects of Computational River Hydraulics*. Pitman 1980, Institute of Hydraulic Research, College of Engineering, The University of Iowa, Iowa City, IA 52242-1585 USA.
- [7] Holly F.M. Jr, Parrish J.B.III (1993). *Description and evaluation of program: CARIMA*. ASCE, Journal of Irrigation and Engineering, Vol.119, No.4.
- [8] Hervouet J.M. (2003). *Hydrodynamique des écoulements à surface libre, Modélisation numérique avec la méthode des éléments finis*. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- [9] Commission internationale des grands barrages (1998). *Dam-break flood analysis: Review and recommendations*.
- [10] Paquier A. (2001). *Rupture de barrage : validation des modèles numériques du Cemagref dans le cadre de CADAM*. Ingénieries n°28.
- [11] Courivaud J.R., (2004). *Etat de l'art de la modélisation des ruptures par surverse de digues et barrages en remblai*. Colloque Sécurité des digues fluviales et navigation, Orléans, France, 25/11/2004.