

METHODOLOGIE SIMPLIFIEE DE CALCUL D'ONDES DE RUPTURE DE PETITS BARRAGES

Simplified Methodology To Compute Small Dams Flood Waves

Audran KOPIJEWSKI, Frédéric LESEUR

DREAL Pays de la Loire, 5 rue Françoise Giroud, 44200 Nantes

audran.kopiejewski@developpement-durable.gouv.fr ; frederic.leseur@developpement-durable.gouv.fr

Anthony MOUYEAUX

INRAE, 3275 Route Cézanne, 13100 Aix-en-Provence

anthony.mouyeaux@inrae.fr

MOTS CLEFS

Onde de rupture simplifiée, petits barrages, gestion de crises

KEY WORDS

Simplified rupture wave, small dams, crisis management

RÉSUMÉ

Cette communication présente les méthodologies appliquées par la DREAL Pays de la Loire pour étudier les risques liés aux petits barrages dans le cadre de la prévention des risques hydrauliques. Chargée du contrôle de la sécurité des ouvrages hydrauliques, la DREAL vise à mieux évaluer les conséquences potentielles des ruptures de ces barrages et à améliorer la gestion de crise. Les petits barrages, souvent non classés ou de classe C, ne nécessitent pas d'étude de dangers, laissant les conséquences potentielles à l'aval en cas de rupture méconnues. Les récents événements météorologiques ont démontré que ces ouvrages peuvent subir des dommages significatifs. De plus, ces barrages sont parfois gérés par des entités manquant de compétences et de ressources adéquates.

Pour pallier ce manque de connaissance, la DREAL a lancé fin 2023 un projet en collaboration avec l'INRAE pour développer un outil permettant de réaliser des ondes de submersion simplifiées. La méthode, basée sur celle du CTGREF de 1978 [1], vise à obtenir une caractérisation fiable et majorante de l'onde de rupture. Les résultats permettront de créer des catalogues départementaux accessibles aux services de l'État pour la gestion des crises. La méthode est répliquable hors de la région des Pays de la Loire.

L'article décrit cette méthodologie et présente les premiers résultats, visant à renforcer la sécurité des populations et la gestion des risques dans la région.

ABSTRACT

This communication presents the methodologies applied by DREAL Pays de la Loire to study the risks associated with small dams as part of hydraulic risk prevention. Charged with monitoring the safety of hydraulic structures, DREAL aims to better assess the potential consequences of dam failures and improve crisis management. Small dams, often unclassified or classified as C, do not require hazard studies, leaving the potential downstream consequences of failures unknown. Recent weather events have shown that these structures can suffer significant damage. Additionally, these dams are sometimes managed by entities lacking the necessary technical skills and resources.

To address this lack of knowledge, DREAL launched a project at the end of 2023 in collaboration with INRAE, to develop a tool for simulating simplified flood waves. The method, based on the 1978 CTGREF approach, aims to achieve a reliable and conservative characterization of the rupture wave. The results will help create departmental catalogs accessible to state services for crisis management. The method can be replicated outside the Pays de la Loire region.

The article describes this methodology and presents the initial results, aimed at enhancing population safety and risk management in the region.

1. INTRODUCTION

Pour la population, les risques liés aux ouvrages hydrauliques rappellent des événements exceptionnels et désastreux survenus sur des barrages de taille conséquente, comme la rupture du barrage de Malpasset en France en 1959, qui fit 423 victimes, ou plus récemment l'effondrement des barrages de Derna en Libye en septembre 2023, avec une estimation du nombre de victimes établie entre 5 000 à 20 000 morts. Les petits barrages présentent un potentiel de destruction en cas de rupture plus faible, mais une fréquence d'occurrence qui, elle, est plus élevée.

L'approfondissement de la connaissance des risques est l'une des missions principales de la DREAL car elle permet une meilleure maîtrise de ceux-ci. Le terme « risque » est ici l'association d'un aléa et d'enjeux. Dans le cas des barrages, l'aléa est la zone inondée par la rupture d'un barrage dans des conditions données et les enjeux sont les personnes et les biens situés dans la zone submergée. Pour les barrages les plus imposants (classe A et B), la réalisation d'une Étude De Dangers (EDD) est obligatoire. Celle-ci contient systématiquement une étude d'onde de rupture qui permet d'évaluer les risques liés à la rupture de l'ouvrage. Les Pays de la Loire comptent 132 barrages classés C et environ autant de barrages non classés. Or pour ces barrages la réalisation d'une étude de dangers n'est pas obligatoire.

Pour pallier ce problème de manque de connaissances et pour améliorer la gestion des crises, des ondes de ruptures « simplifiées » peuvent être réalisées. Ainsi, pour améliorer la gestion de crise sur son parc, le Service de Contrôle de la Sécurité des Ouvrages Hydrauliques (SCSOH) des Pays de la Loire a lancé le développement d'une méthode de tracé d'ondes de rupture simplifiée, dédiée aux petits barrages. L'objectif est de fournir aux services de l'État des cartographies d'ondes de rupture obtenues rapidement et par une méthode majorante permettant l'évacuation des personnes susceptibles de se trouver dans la zone inondée en cas de rupture de l'ouvrage.

La réalisation d'une onde de rupture nécessite de connaître l'ouvrage et ses caractéristiques, telles que la hauteur ou le volume de la retenue. Il est indispensable de maîtriser les modes de ruptures pour élaborer les hypothèses de brèche de l'ouvrage. Le calcul proposé est sujet à de nombreuses simplifications par rapport aux modélisations hydrauliques plus complètes qui se rencontrent dans les EDD. Dans un contexte d'utilisation des ondes de ruptures en anticipation à la gestion de crise, il est important de déterminer les limites et les recommandations de la méthode mise en œuvre et détaillée dans cet article. Dans la méthodologie proposée, le calcul des ondes de submersion dues à la rupture d'un barrage est réalisé grâce à la méthode simplifiée décrite par le CTGREF en 1978 [1], qui est associée à des données géolocalisées et à un Système d'Information Géographique (SIG) permettant de produire des cartographies à partir des hauteurs d'eau calculées.

2. LES PETITS BARRAGES ET LEUR RUPTURE

Ceux qu'on considère comme « petits » barrages dans cet article sont, selon l'article 3.2.5.0 du Code de l'Environnement [2], les « barrages de retenue et autres ouvrages assimilés » classés C, soit une hauteur du barrage comprise entre 5 et 10 mètres, à la condition d'avoir le paramètre $H^2 \times V^{0,5}$ (H, la hauteur du barrage et V, le volume du plan d'eau) supérieur ou égal à 20. Sont aussi compris les barrages respectant les critères suivants : une hauteur supérieure à 2 mètres, un volume supérieur à 50 000 m³ et une habitation située à moins de 400 mètres à l'aval de l'ouvrage. À cela s'ajoutent des barrages non classés connus comme étant « sensibles », de par un mauvais état ou la présence d'enjeux à l'aval.

Ces petits ouvrages sont essentiellement des barrages en remblai, constitués de terre et/ou d'enrochements. Ces barrages sont souvent anciens, au dimensionnement peu voire pas connu et parfois dans un état préoccupant. Ils sont de plus souvent gérés par des particuliers ou des organisations manquant de connaissance ou de moyens pour faire face à des situations de crise. En période de fortes pluies, la quasi-totalité des situations problématiques rencontrées par le SCSOH viennent de ce type de barrages.

En Pays de la Loire, il y a 283 barrages référencés, 151 classés par un arrêté, dont 132 classés C. Parmi les barrages classés C, on compte : 2 barrages mobiles en rivière, 6 barrage-poids, 1 barrage voûte et 123 barrages en remblai.

Les barrages en remblai connaissent principalement trois modes de rupture principaux : l'érosion interne, l'érosion externe due à la surverse, et l'instabilité d'ensemble (glissement) montrés dans l'ouvrage « *Statistical analysis of dam failures* » produit par la Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB) [3].

Il y est mis en avant la surverse (érosion externe) comme cause principale de rupture pour les barrages en remblai, suivie de près par l'érosion interne. L'érosion interne se produit au sein du ou des matériaux constituant le barrage ou sa fondation. Elle est causée par un entraînement des particules fines du sol dû à un écoulement d'eau, affaiblissant ainsi la structure de

l'intérieur. À l'inverse, l'érosion externe se produit directement à la surface du barrage ou sur ses rives. Elle peut résulter de l'action de l'eau ou d'autres forces naturelles qui érodent les matériaux de la surface du barrage ou des berges de la rivière où il est construit.

Étant donné que la majorité des ouvrages est en remblai dans le parc de barrages de classe C des Pays de la Loire, ce sont ces modes de ruptures qui vont particulièrement nous intéresser.

Les barrages en remblai subissent des modes de rupture ayant une cinétique lente et une ouverture de brèche progressive et partielle tandis que, pour les barrages rigides, une défaillance structurelle entraîne une rupture de l'ouvrage considérée comme instantanée et totale. Bien évidemment, une crue ou un niveau anormalement haut augmentent le potentiel de danger par l'augmentation du volume d'eau libérable en cas de rupture du barrage.

Les données connues par le SCSOH sur ces « petits » ouvrages sont renseignées dans les arrêtés de classement et dans la base de données nationale « SIOUH II » gérée par la Direction Générale de la Prévention des Risques. Les caractéristiques connues des ouvrages sont la hauteur du barrage (différence de cotes entre le terrain naturel en pied et sa crête) et la longueur du barrage ; les caractéristiques du plan d'eau connues sont la longueur, la surface et le volume à la cote de retenue normale. La cote en crue, nécessaire pour étudier le cas de rupture d'un barrage par surverse, est en revanche la plupart du temps méconnue.

3. LES ONDES DE RUPTURE

La rupture d'un barrage entraîne la propagation d'une onde hydraulique dans la vallée en aval de l'ouvrage, qui est à l'origine d'une élévation brutale du niveau de l'eau et qui peut engendrer des dégâts conséquents de par son intensité et sa cinétique.

Ce phénomène dépend essentiellement des caractéristiques géométriques de la brèche formée dans le corps de l'ouvrage : la largeur et la hauteur de brèche, la vitesse de formation de la brèche et le niveau d'eau devant la brèche (ou volume d'eau libérable). Dans le calcul des ondes de rupture, il s'agit d'approcher au mieux ce phénomène afin d'estimer les conséquences d'une rupture de barrage par ouverture de brèche afin de pouvoir mettre en sécurité les personnes potentiellement exposées.

Au-delà des caractéristiques géométriques de la brèche, le phénomène de propagation de l'onde de rupture est fortement conditionné par la variation de la section de la vallée. Cela demande donc une modélisation plus ou moins fine de la topographie de la vallée à l'aval du barrage.

Les ondes de rupture faites dans le cadre des EDD sont réalisées à partir de logiciels spécialisés : les bureaux d'études utilisent des modèles hydrauliques en 1D ou 2D pour modéliser les écoulements. Ces modèles résolvent les équations de Saint-Venant pour un écoulement unidimensionnel ou bidimensionnel. Ces équations reposent sur des principes de conservations de la masse et de la quantité de mouvement. Leur fidélité et justesse dépendent des données d'entrées, de la calibration du logiciel et de l'interprétation des résultats.

Ces modèles sont des outils complexes nécessitant une expertise en hydraulique, en mathématiques et en modélisation numérique. Ces ondes de rupture dites « classiques » sont donc hors de portée pour un usage sur de nombreux ouvrages de taille modeste, pour lesquels les données disponibles sont hétérogènes ou insuffisantes. Elles nécessitent aussi un temps de calcul et d'analyse, indisponible en gestion de crise. En conséquence, des méthodes dites « simplifiées » ont émergé, comme par exemple la méthode décrite par le CTGREF en 1978 [1]. Cette méthode propose un calcul analytique de la hauteur d'eau sur une section donnée à l'aval d'un barrage connaissant une rupture à partir d'abaques. Cette méthode met en œuvre des hypothèses simplificatrices, comme par exemple celle d'une rupture instantanée, même dans le cas des barrages en remblai.

Le calcul simplifié du CTGREF de 1978 a été repris et est utilisé dans le logiciel Castor de l'INRAE, qui permet des améliorations, comme la prise en compte d'une rupture progressive pour les ouvrages en remblai. Un article de La Houille Blanche « *Une méthode simple pour le calcul des ondes de rupture de barrage* » de 1995 [4] montre les écarts entre les résultats des équations simplifiées du CTGREF et ceux du code RUBAR 3, développé également par l'INRAE, qui résout de façon complète les équations de Saint-Venant. En utilisant les mêmes données d'entrées, ils observent une incertitude de l'ordre de $\pm 30\%$ sur les hauteurs d'eau, pour les résultats dans l'intervalle où 90 % des résultats de l'échantillon se situent.

4. METHODOLOGIE DE L'ONDE DE RUPTURE SIMPLIFIEE

Par rapport aux attendus du SCSOH, la méthode doit être applicable sur le parc d'ouvrages concerné. La réalisation d'une étude d'onde de rupture « classique » est chronophage, complexe et demande entre autres des données précises sur la cinétique d'ouverture de la brèche et la topographie. Elle doit être réalisée par un bureau d'études spécialisé et agréé « ouvrages hydrauliques » ou par un expert hydraulicien, ce qui peut s'avérer rapidement coûteux et n'est quasiment jamais entrepris pour un barrage de taille modeste.

Puisque les « petits » barrages ont de fait un potentiel plus faible de destruction que les grands barrages, la méthodologie proposée va s'appuyer sur un scénario d'ouverture de brèche unique visant à homogénéiser les paramètres de calcul. Dans l'objectif d'améliorer la gestion de crise, il est nécessaire que la méthode soit adaptée pour produire directement des résultats utilisables pendant une crise par les préfets et les services de secours. Ainsi, l'approche doit être majorante, car il est en effet préférable d'évacuer des personnes supplémentaires plutôt que d'en oublier ne serait-ce qu'une seule.

L'approche proposée dans cet article reprend la méthode simplifiée du CTGREF. Les abaques utilisés ont été numérisés et extrapolés afin d'automatiser l'ensemble des calculs. Pour l'application de la méthode, il est seulement nécessaire de renseigner les données d'entrées relatives aux caractéristiques du barrage, de la retenue et de la vallée. Dans notre contexte, la méthode simplifiée du CTGREF est utilisée avec des hypothèses majorantes, donc il est intéressant de voir si les résultats dépassent l'incertitude de 30 % observée par rapport au cas d'une résolution complète des équations de Saint-Venant.

La méthodologie se divise en plusieurs étapes, détaillées ci-après. Dans plusieurs de ces étapes, il est nécessaire de disposer de caractéristiques géométriques telles que la hauteur du barrage et la géométrie de sections de la vallée. Ces données peuvent ne pas être connues a priori et leur qualité dépend de la précision des relevés topographiques. L'évolution des technologies, comme l'apparition du Lidar, ont permis de réduire les incertitudes relatives à la planimétrie et à l'altimétrie. Ces données géométriques peuvent désormais être facilement disponibles sur des bases de données nationales ou plus simplement en ligne sur internet, sur lequel des nombreuses données géographiques peuvent être accessibles librement (Géoportail, OpenStreetMap). Ainsi, la méthode proposée intervient dans un contexte adapté à sa réalisation, contrairement à l'époque à laquelle la méthode analytique du CTGREF fut proposée (réalisation à la main avec des cartes à l'échelle 1:25 000).

Comme la plupart des ruptures d'ouvrage ont lieu lors d'une crue, les crues sont prises en compte dans la méthodologie par l'ajout d'une majoration sur la hauteur d'eau, déterminée à partir de l'Enveloppe Approchée des Inondations Potentielles (EAIP, méthode EXZECO du CEREMA [5]), réalisée à la demande des DREAL en conformité à la directive inondations de 2007 et de l'analyse de plusieurs vallées et cours d'eau en aval des petits barrages.

4.1. Initialisation de la rupture

La première étape consiste à définir les conditions initiales de l'événement de rupture du barrage. Ce processus implique de caractériser le barrage, la brèche et le plan d'eau. Les caractéristiques suivantes sont nécessaires :

Cote du fond	mNGF	L'altitude du terrain naturel au pied du barrage, soit le fond de la brèche après ouverture totale. Si la valeur n'est pas connue, il faut prendre la cote en crête moins la hauteur du barrage.
Cote en crête	mNGF	L'altitude à laquelle la surverse commence : c'est le point le plus bas de la crête du barrage, à l'exception de l'évacuateur de crues. Il est possible de la déterminer en utilisant des cartes topographiques.
y_0	m	La hauteur de la brèche : dans le cas d'une rupture totale, cette valeur est la hauteur du barrage. Elle est généralement disponible dans l'arrêté de classement du barrage.
L_0	m	La largeur de la brèche : dans le cas d'une rupture totale, il faut prendre la longueur du barrage. Il est possible de la trouver sur l'arrêté de classement ou en la mesurant sur une carte.
l_0	km	La longueur hydraulique du plan d'eau : C'est la distance la plus grande qui traverse la retenue. Il faut la déterminer en mesurant à la centaine de mètres près.
S_0	m ²	La surface du plan d'eau (cote en crête) : il est possible de la déterminer en mesurant sur une carte.
V_0	m ³	Le volume d'eau retenue dans le plan d'eau (cote en crête) : s'il n'est pas connu, il est possible de l'estimer à l'aide de la surface et de la hauteur du barrage avec la formule $V_0 = S_0 \times y_0 \times 0,4$.

Tableau 1 : caractéristiques nécessaires à l'étape d'initialisation

4.1. Estimation du débit de pointe au droit du barrage

Le calcul du débit à la rupture est la base du calcul simplifié. Ce résultat est utilisé dans les étapes suivantes. Son estimation la plus précise possible est essentielle, car toute erreur ou incertitude se propage à travers les étapes suivantes et compromet la validité de l'ensemble de la méthode. Les hypothèses majorantes prises en compte lors de l'étape d'initialisation assurent une certaine marge, mais cela reste le point névralgique de la méthode.

Il existe quatre expressions pour le calcul du débit « brut ». Elles dépendent de la forme choisie pour la brèche : rectangulaire, triangulaire, parabolique et trapézoïdale. La forme triangulaire est la plus minorante ; les formes rectangulaire et trapézoïdale sont les plus majorantes, avec des résultats similaires ; tandis que la forme parabolique donne des résultats se situant entre les formes majorantes et la forme triangulaire. Les écarts entre les résultats peuvent être élevés : il est possible que le débit soit trois fois supérieur entre la valeur maximale et minimale. Ces observations ont été faites sur une vingtaine de cas.

S'il est difficile de prévoir la forme de la brèche d'un ouvrage, les formes rectangulaire ou trapézoïdale restent les cas les plus observés dans les retours d'expériences sur des ruptures de barrages en remblai. La différence entre les résultats des débits des deux formes est négligeable, ce qui nous permet de faire l'hypothèse simplificatrice que la brèche est rectangulaire, la méthode CTGREF fait aussi cette hypothèse brèche pour les remblais. Cette décision s'ajoute à l'hypothèse majorante sur la largeur de la brèche, car il est souvent admis pour ce type d'ouvrage que la largeur de brèche est égale à quatre fois la hauteur (formule de la FERC [6]).

Le débit Q_b et la hauteur y_0 à la rupture au droit du barrage sont donnés par les équations suivantes :

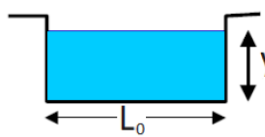
Forme de brèche rectangulaire	Hauteur d'eau à la rupture	Débit « brut »	Débit « corrigé » au droit du barrage	μ
	$y_b = \frac{4}{9}y_0$	$Q_b = 0,93L_0y_0^{3/2}$	$Q'_b = \mu Q_b$	$\mu = 1 + \log_{10}\left(\frac{V_0}{S_0L_0}\right)$

Tableau 2 : Détermination du débit maximal à la rupture (d'après CTGREF 1978 [1])

Le calcul du débit « brut » Q_b est donné par une solution analytique (Ritter, 1892) de l'équation d'onde simple centrée, simplifiée dans la méthode CTGREF. Celle-ci donne le débit à partir de la vitesse de l'onde et de la section, en supposant ces paramètres comme indépendants du temps.

Le débit de pointe « brut » Q_b est multiplié par le coefficient μ pour donner un débit « corrigé » Q'_b qui prend en compte les caractéristiques du plan d'eau pour représenter au mieux les réflexions possibles de l'onde négative qui se propage dans la retenue à la rupture. Le coefficient μ dépend de la forme de la retenue : 1 pour une retenue normale, 1,2 pour une retenue très compacte et 0,8 pour retenue très allongée.

Il est important de calculer le débit avec les quatre formes de brèche pour observer les écarts et garder à l'esprit que ce calcul dépend seulement de la forme de la brèche et du plan d'eau et que les résultats donnent principalement un ordre de grandeur du débit maximum de brèche. Depuis le développement de cette méthode, de nouvelles formules empiriques ont vu le jour pour estimer le débit, telles que celle de Froehlich (*Peak Outflow from Breached Embankment Dam*, 1995) [7], entre autres étudiées dans l'article « *Erosion externe des barrages et des digues* » [8] : ces méthodes sont des régressions linéaires faites à partir de l'accidentologie, elles prennent en compte en plus de la hauteur, le volume de la retenue.

Pour savoir comment la formule du CTGREF se comporte par rapport aux autres formules, il est intéressant de les comparer par rapport aux caractéristiques des petits barrages. Le barrage « 1 » est le plus petit ouvrage classable possible, avec une hauteur de 2 mètres pour un volume de 0,05 hm³, le barrage « 2 » fait 5 mètres pour 0,1 hm³, le barrage « 3 » fait 8 mètres pour 0,5 hm³, le barrage « 4 » fait 10 mètres pour 1 hm³ et le barrage « 5 » fait 12 mètres pour 2 hm³, ce qui le classe en B. Ces caractéristiques sont représentatives des barrages référencés en Pays de la Loire.

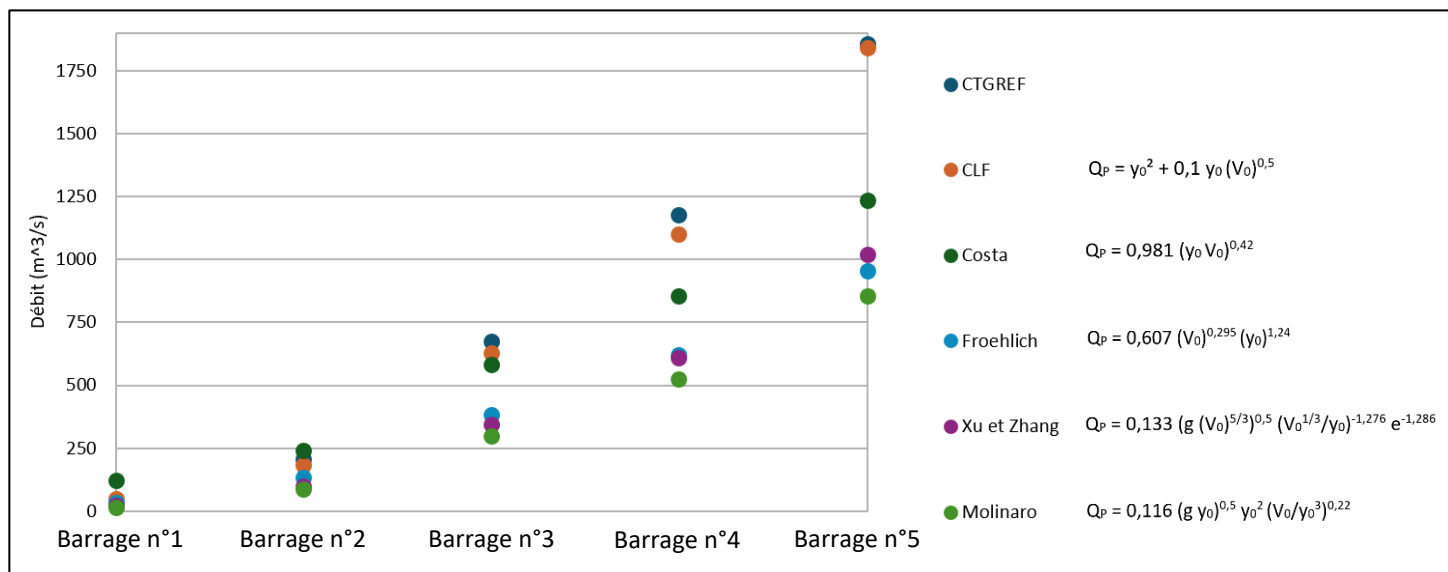


Figure 1 : Comparaison des méthodes de calcul du débit à la rupture

La méthode CTGREF, en prenant en compte une brèche rectangulaire et une largeur de quatre fois la hauteur de brèche, donne des résultats proches de ceux obtenus par la méthode CLF (Courivaud, Lempérière, Fry, 2006) [9], qui est réputée conservative.

4.2. Découpage de la vallée en sections

Pour la suite, il est nécessaire de découper la vallée en sections. Dans le contexte considéré, une section correspond au profil en travers de la vallée à une distance donnée du barrage. À cette section, il faut associer une pente locale ou moyenne (depuis le barrage), un coefficient de Strickler entre le barrage et la section, les caractéristiques géométriques de la vallée et la cote du terrain naturel.

Ce découpage est nécessaire pour déterminer la propagation du débit et calculer les hauteurs d'eau. L'objectif est de représenter au mieux les variations de la vallée. Ainsi, des sections situées à des intervalles d'au moins 500 mètres ou à des emplacements à enjeux sont recommandées, en plus de sections situées à des points géographiques notables (élargissement/rétrécissement brusque, méandrement important, etc.). En l'absence de données précises comme des Modèles Numériques de Terrain (MNT), l'obtention des profils en travers des sections peut se faire grâce à des outils comme Géoportail ou par une analyse de cartes IGN au 1 : 25 000.

Comme pour la section au droit du barrage, la méthode CTGREF propose une caractérisation de la géométrie des sections de la vallée sous quatre formes : rectangulaire, triangulaire, trapézoïdale et parabolique.

4.3. Propagation du débit dans la vallée

Les débits au droit d'une section sont obtenus à partir d'un abaque, dont les variables sont :

- $x/\sqrt[3]{V_0}$: une variable adimensionnelle en abscisse. Avec x , la distance (en m) de la section depuis le barrage et V_0 , le volume du plan d'eau (en m^3).
- $Q_{\max}/Q'_b$: une variable adimensionnelle en ordonnée. Avec Q'_b , le débit maximal à la rupture au niveau du barrage (obtenu dans l'étape précédente) et $Q_{\max}$, le débit calculé à la section donnée.
- IK^2 : une variable intermédiaire. Avec I , la pente moyenne entre le barrage et la section (en m/m) et K , le coefficient de Strickler (en $m^{1/3}/s$) pour la rugosité, variant entre 10 et 40 (plus il est faible plus le terrain est rugueux).

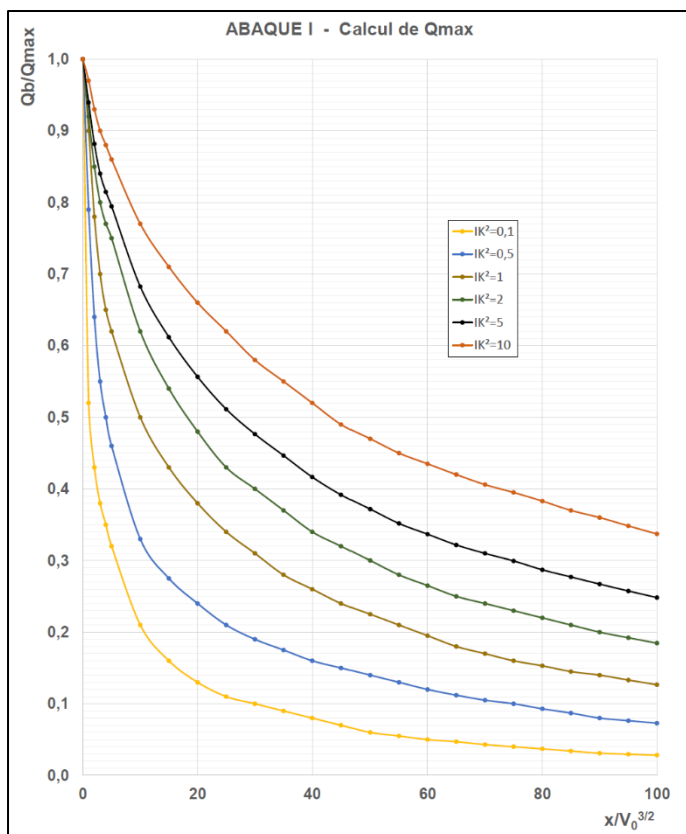


Figure 2 : Abaque CTGREF du calcul de la propagation du débit

4.4. Détermination des hauteurs d'eau

La hauteur d'eau maximale y_{max} à une section donnée est déterminée à partir du débit propagé calculé à l'étape précédente. Pour obtenir y_{max} à partir de Q_{max} , il faut passer par l'intermédiaire des paramètres D_{max} et U_{max} :

- D_{max} est une variable obtenue par calcul suivant les caractéristiques de la section et le débit calculé.
- U_{max} est obtenue par abaque ou par calcul en fonction du D_{max} (s'il sort de l'abaque avec $100 > D_{max} > 10^{-3}$).

Cet abaque a également été, numérisé, mais il n'est pas nécessaire de l'interpoler, car les équations sont déjà connues.

Pour déterminer les hauteurs d'eau avec les débits obtenus à l'étape précédente, il faut déterminer et entrer de nouvelles données, comme la pente locale de la vallée au niveau de la section, sa forme et ses caractéristiques géométriques. Pareillement à l'étape précédente, les calculs sont automatisés, les valeurs d'entrées sont aussi propres à chaque section.

L'attribution de l'une des quatre formes à la géométrie d'une section en travers n'est jamais exacte. Le tableau développé permet de pouvoir modifier rapidement l'attribution de ces formes afin d'en étudier la sensibilité sur les résultats.

Coefficient de Strickler	Caractéristiques de la vallée
15	Zone urbanisée
20	Zone boisée
25	Zone avec de la végétation
30	Zone agricole

Tableau 3 : Coefficient de Strickler

L'abaque du CTGREF a été numérisé et extrapolé pour permettre de déterminer la propagation du débit sur des distances plus grandes. Les calculs sont automatisés dans un tableur.

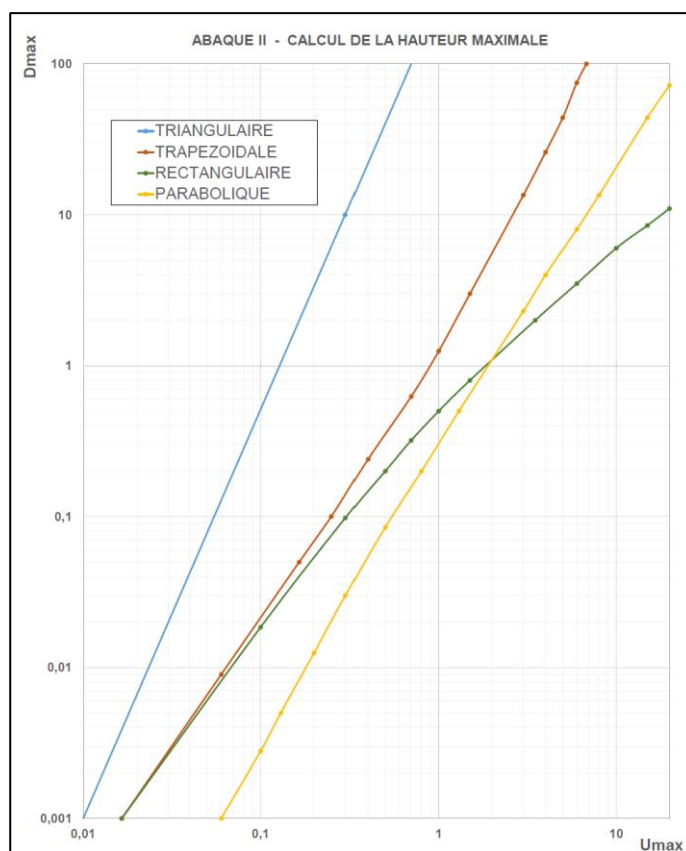


Figure 2 : Abaque CTGREF du calcul des hauteurs

Comprendre cette sensibilité est crucial pour évaluer la robustesse, la fiabilité et la précision du modèle mathématique, même si la méthode est utilisée dans ses conditions les plus majorantes.

Les résultats finaux sont des hauteurs en mètres au droit de chaque section considérée dans le calcul. En les additionnant avec la hauteur du terrain naturel, on obtient des cotes altimétriques. En intégrant ces données géoréférencées dans un Système d'Information Géographique (SIG), on peut tracer la zone inondée par l'onde de submersion due à la rupture d'un barrage. Il faut bien noter que le niveau de précision de la zone inondée n'est pas équivalent à celui obtenu par une résolution complète des équations de Saint-Venant mais qu'il permet d'obtenir rapidement une évaluation grossière et majorante de la zone susceptible d'être inondée en cas de rupture du barrage, primordiale dans le cadre d'une gestion de crise.

5. APPLICATION DE LA METHODE

Pour vérifier la validité des résultats obtenus à partir de la méthode simplifiée, des calculs ont été réalisés en se basant sur les hypothèses établies dans les études de dangers des barrages de classe A et B. Ainsi, il est possible de comparer les résultats des études de dangers, obtenus à partir de la résolution des équations de Saint-Venant, à ceux calculés à partir de la méthode simplifiée proposée par le CTGREF. Ci-dessous, trois cas représentatifs des calculs menés sont présentés :

5.1. Cas n°1 : Barrage de la Vouraie (Vendée), classe B (remblai)

Le débit maximal à la rupture est calculé à 1 393 m³/s dans l'EDD pour une rupture progressive par érosion interne avec un niveau de retenue à PHE. La brèche y est obtenue par l'ouverture progressive d'un conduit de 0,1 m de diamètre initial s'élargissant jusqu'au 2/3 de la hauteur du barrage pour ensuite former une brèche rectangulaire. Les hauteurs d'eau sont majorées de 15 % ou de 1 mètre. L'hypothèse de rupture instantanée et totale était vue comme très pessimiste, ce qui est couramment admis pour les barrages en remblai.

Pour l'hypothèse simplifiée, le débit est calculé à 17 000 m³/s pour une hauteur de brèche de 21,6 m et une largeur de 170 m. Les hauteurs d'eau ne sont pas majorées par les préconisations du CTPBOH (15 % ou 1 m) et l'état de crue n'est pas considéré. Ce cas est très favorable par rapport à l'hypothèse prise dans l'étude de dangers (courbes bleu clair et orange sur la Figure 4).

Pour des barrages en remblai de grandes dimensions, l'hypothèse utilisée est trop favorable, mais permet d'illustrer le fait que la méthode est sécuritaire.

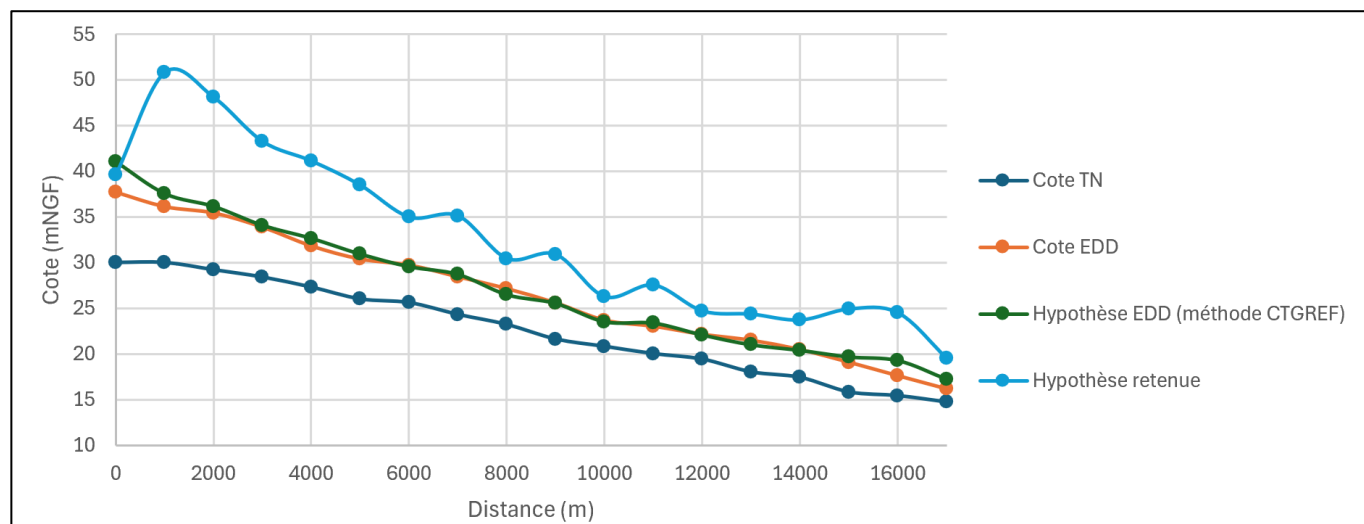


Figure 3 : Cas n°1 : Comparaison des ondes de rupture dans le cas du barrage de la Vouraie

Ce premier cas permet de faire des observations sur la méthode. Tout d'abord, en utilisant la méthode simplifiée avec la même valeur pour le débit maximal à la rupture que dans l'EDD, on obtient des résultats assez proches de ceux de l'EDD (courbes orange et verte sur la Figure 6), les écarts observés correspondant aux écarts attendus pour la méthode simplifiée, soit environ 14 %. Dans un second temps, avec l'hypothèse majorante établie, on observe une forte majoration des hauteurs d'eau sur les cinq premiers kilomètres due au débit maximal élevé lié à la grande hauteur de l'ouvrage. Cet écart se réduit au fur et à mesure de la propagation du débit.

5.2. Cas n°2 : Barrage d'Apremont (Vendée), classe B (poids)

Le débit maximal de l'EDD de 1 150 m³/s est calculé pour une rupture totale et instantanée. Les hauteurs d'eau sont majorées de 15 % ou de 1 mètre. La hauteur d'eau dans la retenue est de 8,53 m.

Dans le cas de la méthode simplifiée, le débit est calculé à 2 513 m³/s pour une rupture totale de hauteur 10 m et de largeur 118 m. Les hauteurs d'eau ne sont pas majorées et l'état de crue de la vallée n'est pas considéré.

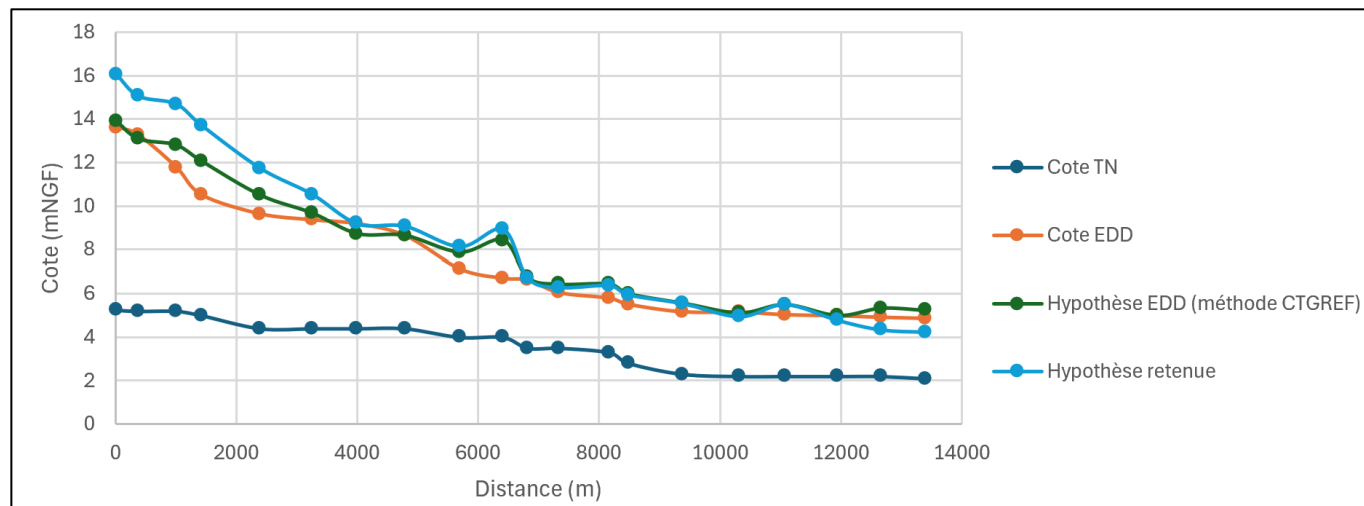


Figure 4 : Cas n°2 : Comparaison des ondes de rupture dans le cas du barrage d'Apremont

La rupture d'un barrage d'une plus faible hauteur (moins de 10 mètres) a pour conséquence de réduire l'écart entre le débit maximal calculé dans le cas d'une brèche totale et celui calculé dans le cas d'une brèche partielle. La propagation d'un faible débit (due à la rupture d'un petit barrage) fait qu'à partir d'une certaine distance les hauteurs d'eau calculées deviennent égales ou inférieures à la majoration de 1 m (ou 15 %), à ce stade il est possible d'arrêter le calcul de propagation du débit.

5.3. Cas n°3 : Barrage de Vioreau (Loire-Atlantique), classe B (poids)

Dans l'objectif d'utiliser une hypothèse de rupture commune à toutes les ondes de rupture, le scénario d'une rupture par surverse et dans un état de la vallée aval en crue est étudié. La surélévation du niveau de l'eau à l'aval due à une crue est prise en compte dans l'onde de rupture de l'EDD et on suppose qu'elle englobe également la majoration recommandée par le CTPBOH (15 % ou 1 m).

Dans l'EDD, le débit maximal est calculé à 1 650 m³/s pour une rupture par surverse en crue. Les hauteurs d'eau sont majorées de 15 % ou de 1 mètre. La hauteur de brèche est de 10,25 m et la largeur de 70 m. L'apport de ce cas d'étude vient de l'état en crue de la vallée, ici considérée avec une hauteur supplémentaire à l'aval de 6 m.

Dans le cas de la méthode simplifiée, le débit de 4 200 m³/s est calculé pour une rupture totale de hauteur de brèche 10,3 m et de largeur 132 m. Les hauteurs d'eau ne sont pas majorées. L'état de crue de la vallée n'est pas considéré.

On observe une minoration des résultats de la méthode simplifiée par rapport à ceux de l'EDD. L'écart provient de la différence de l'état de la vallée, en crue pour l'EDD et avec un fond de vallée « à sec » pour la méthode simplifiée. Malgré l'utilisation d'une hypothèse majorante, les résultats du calcul des hauteurs d'eau restent inférieurs à ceux de l'étude de dangers.

Ce cas permet de montrer une faiblesse dans l'application de la méthode. Les données disponibles pour la réalisation d'une onde de rupture simplifiée ne permettent pas une représentation d'une rupture en crue avec un lit aval en crue. Ainsi, il est nécessaire d'établir une marge de sécurité pour une hypothèse de rupture en cas de crue.

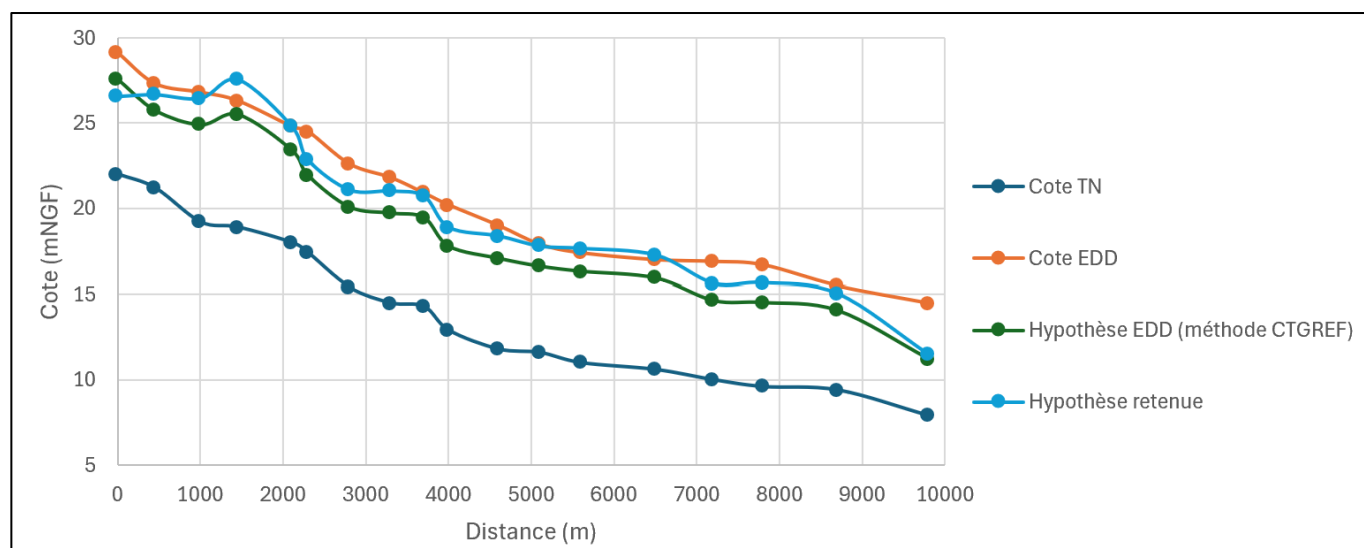


Figure 5 : Cas n°3 : Comparaison des ondes de rupture dans le cas du barrage de Vioreau

6. INTERPRETATION DES RESULTATS

Les modélisations effectuées sur 8 barrages classés et environ 120 sections ont permis d'établir les limites de la méthode simplifiée, ainsi que certaines recommandations :

- Cette méthode ne remplace pas une étude d'onde de rupture complète comme celle faite dans les études de dangers des barrages de classes A et B.
- Les calculs avec les formes de brèche parabolique ou triangulaire sont déconseillés, car elles ne sont pas adaptées à l'approche simplifiée dans le but d'obtenir des résultats majorants en termes de débits.
- La méthode ne permet pas de prendre en compte l'état en crue de la vallée en aval du barrage. En réalité, le volume d'eau supplémentaire apporté par une crue peut être emporté par l'onde de submersion, ce qui va augmenter la hauteur d'eau.
- Les hauteurs d'eau calculées pour une section située au droit d'un élargissement brusque sont incorrectes.
- Pour les ouvrages faisant obstacle au passage de l'onde, l'hypothèse retenue dans les calculs est que la vague de submersion a une énergie suffisante pour l'effacement de ceux-ci. En réalité, il est possible que les ouvrages résistent et limitent le débit ou retiennent un volume d'eau.
- À l'inverse des brèches, les formes les plus représentatives pour une vallée sont les formes parabolique et triangulaire. De plus, les hauteurs d'eau calculées avec ces formes sont les plus élevées.

La dernière recommandation est liée aux EDD et aux pratiques dans le domaine de la modélisation hydraulique de rupture de barrage : la pratique nationale est de prendre en compte un coefficient de sécurité sur le calcul des hauteurs. Une majoration de 15 % ou de 1 mètre est imposée par la réglementation [10]. Le CTGREF indique une marge d'erreur limitée à 40 % sur les hauteurs [1], ce qui est relativement important. Ainsi, sur une approche semblable, il faut déterminer un coefficient de sécurité pour prendre en compte la crue en aval dans la modélisation.

L'utilisation d'une majoration est cohérente avec l'objectif principal des tracés d'onde de rupture dans l'optique d'une gestion de crise relative aux petits barrages : fournir au préfet et aux services de secours une enveloppe des territoires à évacuer en ayant l'assurance de n'oublier personne. Dans la méthodologie proposée, il est donc admis, voire revendiqué, que le but est d'obtenir des résultats représentatifs mais majorants, afin d'évacuer plus de personnes que nécessaire plutôt que d'en oublier.

6.1. Application d'une majoration sur les hauteurs d'eau

Comme les exemples précédents ont permis de le montrer, la méthode est majorante pour les cas avec des conditions de la vallée « à sec », mais elle n'est pas applicable pour une rupture en crue. Pour cela, il faut adapter la méthode avec l'utilisation d'une majoration sur la hauteur d'eau.

Les majorations à ajouter pour créer une onde de rupture en crue sont déterminées à partir de l'Enveloppe Approchée des Inondations Potentielles (EAIP), par une comparaison entre l'enveloppe et le modèle numérique du terrain. Elles permettent de prendre en compte la différence de hauteur entre les altitudes du fond de vallée et la cote en crue. Voici les valeurs représentants aux mieux les cas étudiés, la majoration peut être adaptée à chaque section de la vallée.

Majoration (m)	Caractéristiques de la vallée
4	Vallée encaissée ou rétrécissement donnant une section de moins de 100 mètres de large pour des hauteurs supérieures à 5 mètres
2,5	Valeur par défaut et rivière
1	Vallée sans élévation ou lit majeur sur une largeur de plus de 400

Tableau 4 : Majorations

6.2.Exemple de préparation à la gestion de crise

Afin d'illustrer son applicabilité en gestion de crise, la méthodologie simplifiée a été appliquée au cas concret du barrage de La Pelluère. Il s'agit d'un barrage en remblai non classé d'une hauteur de 4 m formant une retenue de 13 000 m³ situé à l'amont direct du village de Genest-Saint-Isle, qui a menacé de rompre pendant une inondation qui a impacté la commune avec des hauteurs d'environ 1,8 m dans l'école primaire.

La rupture du barrage est simulée en appliquant la méthodologie avec les hypothèses majorantes présentées dans cet article. Les calculs de hauteurs d'eau ont été faits sur 8 sections dans la vallée, notamment au droit des enjeux. Sans rentrer dans le détail des résultats, la cartographie de l'onde de rupture illustrée sur la Figure 9 a pu être établie en 30 minutes et a permis de montrer que 140 habitations ou autres enjeux seraient impactés.

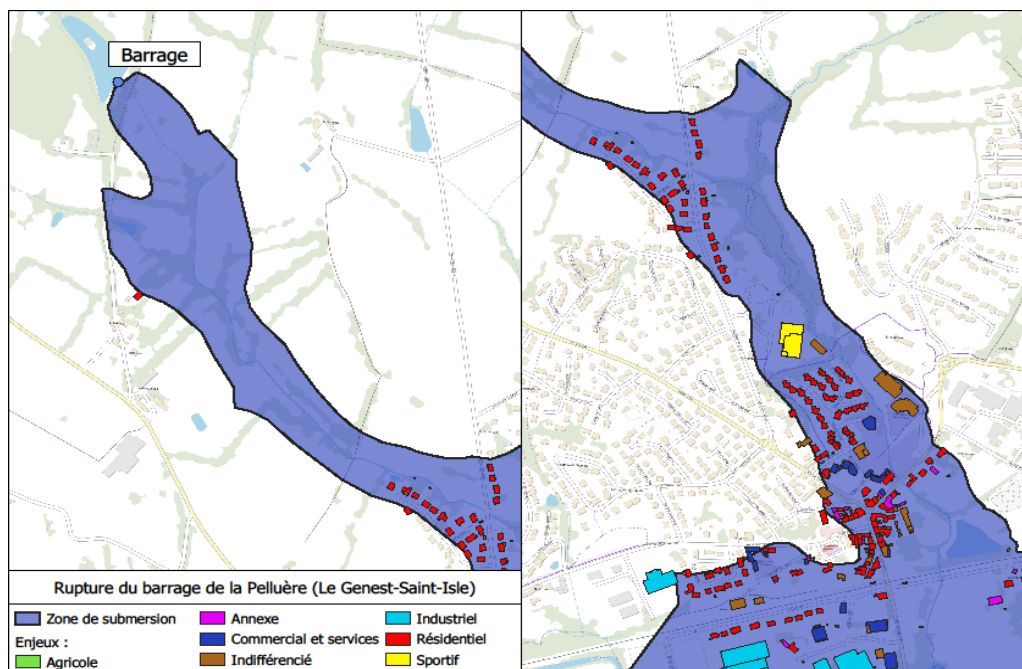


Figure 6 : Onde de rupture du barrage de la Pelluère

Dans le cadre de la gestion de crise relative à un barrage en situation de rupture imminente, l'importance d'une préparation rapide et efficace se révèle cruciale. L'application à ce cas concret montre que la méthode permet de déterminer efficacement et rapidement les enjeux impactés par l'onde de rupture du barrage. On peut imaginer que cette cartographie peut être

produite soit pendant la situation de crise, vu le temps réduit nécessaire à sa création, soit en amont d'une crise afin de s'y préparer de façon encore plus efficace.

Le support cartographique, en particulier la cartographie de l'onde de submersion, s'avère être un outil clé dans ce contexte. Il offre une visualisation précise des zones à risque, aidant à identifier les enjeux critiques. De plus, l'utilisation d'un support cartographique clair améliore la communication et la coordination entre les équipes de secours et les populations, assurant une gestion coordonnée des opérations de secours, qui peuvent ainsi être adaptées au phénomène observé.

7. CONCLUSION

La méthodologie simplifiée proposée dans cet article pour la réalisation d'ondes de rupture de petits barrages vise à fournir aux services de l'Etat des cartographies des zones inondées majorantes obtenues dans un délai relativement court afin de réduire les risques en optimisant l'action des secours.

La méthode simplifiée proposée est conservative grâce aux hypothèses suivantes :

- La forme rectangulaire de la brèche, simplifiant les calculs tout en maintenant une approche prudente.
- Une rupture instantanée, et non progressive, garantissant ainsi la modélisation du scénario le plus critique.
- Une rupture totale, et non partielle, permettant d'estimer le débit maximal.
- L'intégration d'une surcote pour tenir compte de la présence d'eau à l'aval en situation de crue, ce qui modélise plus fidèlement les conditions réelles et leurs impacts cumulés.

Néanmoins, les simulations présentées dans cet article montrent que les résultats obtenus restent proches de ceux obtenus dans le cas d'ondes de rupture réalisées pour des EDD sans la prise en compte d'éventuelle crue.

L'approche théorique de la méthodologie n'est pas nouvelle mais les moyens techniques actuels, avec notamment la généralisation des moyens de calcul et le libre accès aux données géographiques, permet son application de façon rapide et efficace avec l'application de la méthode avant la crise.

L'application à un cas concret illustre que, dans une situation de crise impliquant la rupture d'un barrage, la combinaison d'une préparation rigoureuse, d'une modélisation précise et d'un support cartographique constituent une stratégie indispensable dans un objectif de réduction des risques liés aux ouvrages hydrauliques.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la DREAL des Pays de la Loire et Frédéric Leseur le chef du SCSOH pour leur soutien. Nous sommes également reconnaissants envers l'INRAE, en particulier Anthony Mouyeaux, pour son expertise. Nos remerciements vont aussi au PoNSOH, notamment à Guirec Prevot, pour ses conseils. Enfin, nous remercions les professeurs de Niort pour leur enseignement.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] Colin E. et Pochat R. CTGREF, 1978. Calcul d'onde de submersion due à la rupture d'un barrage, N°25
- [2] Code de l'Environnement, article R. 214-112
- [3] ICOLD, 2019. Analyse statistique des ruptures de barrages, Bulletin n°99
- [4] Paquier A. et Robin O. 1995. Une méthode simple pour le calcul des ondes de rupture de barrage. La Houille Blanche. Vol. 81, N°8, pp. 29-34. DOI 10.1051/lhb/1995077
- [5] CEREMA, 2020. Application de la méthode ExZEco
- [6] FERC, 2015. Chapter II : Selecting and accommodating inflow design floods for dams
- [7] Froehlich D. 1995. Peak Outflow from Breached Embankment Dam. Journal of Water Resources Planning and Management. Vol. 121, N°1. DOI 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001424
- [8] Courivaud, J. -R., Deroo L. et Bonelli S. 2019. Erosion externe des barrages et des digues. Colloque CFBR.
- [9] Courivaud J. -R., Lempérière F., Fry J. -J. 2006. A new analysis of embankment dam failures by overtopping. Congrès International de la CIGB, N°22. C22-Q86-R66.
- [10] Arrêté du 3 septembre définissant le plan de l'étude de dangers des barrages et des digues et en précisant le contenu, 2018.