

Analyse de sensibilité des paramètres de rupture des digues : Application au cas de la Garonne

Sensitivity analysis of levee breach parameters: Application to the Garonne River

L. Pheulpin¹, V. Bacchi¹, N. Bertrand¹

¹ Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, Fontenay-aux-Roses, lucie.pheulpin@irsn.fr

Résumé

En domaine fluvial, le principal rôle des digues est de canaliser l'eau afin de réduire le risque d'inondation. Toutefois, en période de crue, ces digues peuvent être endommagées par le biais de mécanismes physiques comme l'érosion causée par exemple, par une surverse. De ce fait, il est important de prendre en compte les ruptures de digues induites par de tels phénomènes, dans les modèles hydrauliques. Cependant, la modélisation des digues et de leurs ruptures est complexe et repose sur un certain nombre de paramètres incertains, liés à la géométrie des brèches potentielles et aux mécanismes de ruptures implémentés dans les modèles numériques. Dans ce contexte, l'objectif de l'étude est de réaliser une analyse de sensibilité visant à mieux déterminer l'impact des paramètres de rupture de digues utilisés dans un modèle hydraulique 1D, sur les débordements générés. Pour cela, un modèle à casiers de la Garonne, construit et validé préalablement avec le code HEC-RAS, a été utilisé. Le cas d'étude repose sur l'analyse de la crue historique de 1981, sur un bief de 63 km entre les communes de Tonneins et La Réole, durant laquelle plusieurs digues ont cédé. La méthodologie s'appuie sur une propagation d'incertitudes des paramètres de brèches, réalisée grâce au couplage de deux outils : HEC-RAS et l'environnement de modélisation IRSN, Prométhée. Les paramètres des digues sont considérés uniformément distribués et tirés aléatoirement afin de générer un nombre élevé de scénarios de rupture. Les analyses de type Monte-Carlo et FAST (Fourier Analysis Sensitivity Test) réalisées, ont montré la forte influence du paramètre de surverse, sur le remplissage des casiers, puis des paramètres liés à la géométrie de la brèche. L'étude permet également de souligner la forte différence entre la zone aval et celle amont du modèle qui est plus sensible aux ruptures de digues.

Mots-Clés

Analyse de sensibilité – Rupture de digues – Modélisation hydraulique – Propagation d'incertitudes

Abstract

In a fluvial environment, the main role of levees is to canalize water downstream of rivers to reduce the risk of flooding to nearby areas. However, during flood periods, levees can be damaged by physical mechanisms as erosion due to overflowing, for instance. As a consequence, it is necessary to take into account levee breaches induced by floods in hydraulic models. Nevertheless, levee breaches modeling is a complex phenomenon, which relies on a number of uncertain parameters, dependent from the breach geometry and from the mechanisms implemented in numerical models. In this context, the objective is to perform a sensitivity analysis to better understand the impact of breach parameters, used in a 1D hydraulic model, on the generated overflows. A model with storage areas of the Garonne River, preliminary built and validated with the HEC-RAS code, was used. The study case is based on the 1981 historical flood event between Tonneins and La Réole, in a river section of 63 km, during which several levees failed (Figure 1). The methodology relies on an uncertainty propagation of the breach parameters, performed through the coupling of HEC-RAS and the computational environment Promethee developed by IRSN. The breach parameters are uniformly distributed and randomly sampled in order to generate a large number of breach scenarios. The Monte-Carlo and the FAST (Fourier Analysis Sensitivity Test) analyses performed in this study show the strong influence of the overflow parameter and breach geometry on the water height in a given storage area. The study also highlights the major difference between upstream and downstream parts of the river. Indeed, the upstream area is much more sensitive to levee breaches than the downstream area, so the uncertainties are higher.

Key Words

Global Sensitivity Analysis – Levee breaches – Numerical Modeling – Uncertainty Quantification

Introduction

Aujourd'hui, un grand nombre de fleuves sont bordés de digues dont le principal but est la canalisation de l'eau en crue afin d'éviter, ou pour le moins, réduire les inondations dans les zones à proximité. Ces protections sont d'autant plus importantes pour les cours d'eau aux abords des installations nucléaires. La correcte prise en compte du comportement des digues et l'évaluation de l'impact de la formation de brèches, sur les niveaux d'eau en zone inondable, sont des éléments à prendre en compte dans la démonstration de sûreté d'une installation. Néanmoins, une évaluation purement déterministe de ces phénomènes apparaît difficile aujourd'hui. Par conséquent, l'un des moyens mis en place par l'IRSN pour évaluer ces phénomènes, consiste en la prise en compte des incertitudes dans les modélisations hydrauliques.

Pour traiter les incertitudes, des méthodes basées sur des techniques statistiques ont été développées [1]. Plusieurs auteurs sont notamment d'accord sur le fait qu'une des meilleures méthodes permettant de valider les modèles et de déterminer les paramètres les plus influents est de réaliser une analyse d'incertitudes ainsi qu'une analyse globale de sensibilité dans des modèles déterministes [2-4].

L'IRSN a récemment développé une stratégie pour les études d'incertitudes et de sensibilité dans les modèles hydrauliques [5]. De plus, l'environnement de calcul Prométhée (<http://promethee.irsn.fr/doku.php>), a été développé pour faciliter la propagation d'incertitudes en prenant en charge le paramétrage et le lancement de divers codes de calculs. Couplé à un logiciel de modélisation hydraulique, HEC-RAS par exemple, Prométhée permet de lancer plusieurs séries de calculs et de réaliser des analyses de sensibilité sur les différents paramètres du modèle pouvant être, entre autres, liés à la formation de brèches. En effet, les digues sont particulièrement exposées à des phénomènes d'érosion et d'instabilité pouvant engendrer la formation de brèches par surverse ou par érosion interne [6]. Seulement, il est difficile de caractériser les processus capables d'engendrer les brèches, de prévoir leur localisation et d'estimer quels sont les facteurs qui ont le plus d'impact sur leur formation, d'où les analyses de sensibilité dans ce domaine de forte incertitude.

Le but de cette étude est donc de réaliser des analyses de sensibilité, en particulier sur les paramètres liés aux ruptures de digues, afin de comprendre quels sont ceux qui influencent particulièrement l'hydraulique du cours d'eau et par conséquent agissent sur les hauteurs d'eau dans les zones de stockage de la crue.

L'étude a été réalisée sur un tronçon de la Garonne et plus particulièrement à partir de l'analyse de la crue historique de

1981, ayant engendré plusieurs ruptures de digues. Le cas d'étude est décrit dans la première partie, tandis que la deuxième est consacrée à la présentation du modèle hydraulique 1D à casiers. Ensuite, les méthodes et résultats issus des propagations d'incertitudes et analyses de sensibilité sont exposés avant de finir sur les améliorations et les suites à donner à ce travail.

Présentation du cas d'étude : La Garonne

La zone étudiée se situe aux abords de la Garonne, entre les communes de Tonneins et La Réole (Figure 2). Ce linéaire d'environ 50 km est largement endigué. En effet, entre 1760 et 1850 [7] un système de digues et de zones de stockage a été construit pour canaliser la Garonne et ainsi protéger les zones inondables. Les casiers, permettant le stockage des crues, se succèdent et sont disposés de façon à ce que le profil type de la Garonne comprenne : un lit mineur, un lit majeur intra-digues et, de part et d'autre du cours d'eau, des digues longitudinales et des casiers (Figure 1).



FIGURE 1 : PROFIL TYPE DE LA GARONNE

Entre 1875 et 1981, de nombreuses brèches, s'étendant parfois sur une longueur de 300 mètres, se sont formées lors de crues sur ce tronçon de la rivière, notamment au niveau de la partie extérieure des méandres, où une forte érosion est constatée [8]. D'après les observations de terrain réalisées suite aux événements de crue majeurs [7, 9], les mécanismes de rupture qui ont été identifiés sont la rupture par surverse et celle par érosion interne des digues.

De plus, les études hydrologiques et hydrauliques ont montré que la Garonne sortait fréquemment de son lit et ce, pour des événements ayant de faibles périodes de retour (moins de 10 ans). Ainsi, la plaine d'inondation peut être fréquemment submergée. La Figure 1 représente une section en travers typique de la Garonne où les débits caractéristiques ont été évalués à 1 100 m³/s pour le débit de base, 2 400 m³/s pour le débit de plein bord du lit mineur et 3 500 m³/s pour le débit de plein bord intra-digues. La crue la plus extrême connue, dont la période de retour a été évaluée à 1000 ans, a eu lieu en 1875. Le débit à Marmande et Tonneins a été évalué à 8 350 m³/s. Depuis, plusieurs crues, moins intenses, mais sollicitant la majeure partie de la plaine d'inondation et provoquant plusieurs ruptures de digues se sont produites. Une des plus importantes est celle de 1981, dont la période de retour a été évaluée à 20 ans et le débit maximal à Tonneins à 6 040 m³/s. Même si la période de retour de cette crue qui a duré 9 jours est relativement faible, plusieurs

digues

ont

cédé

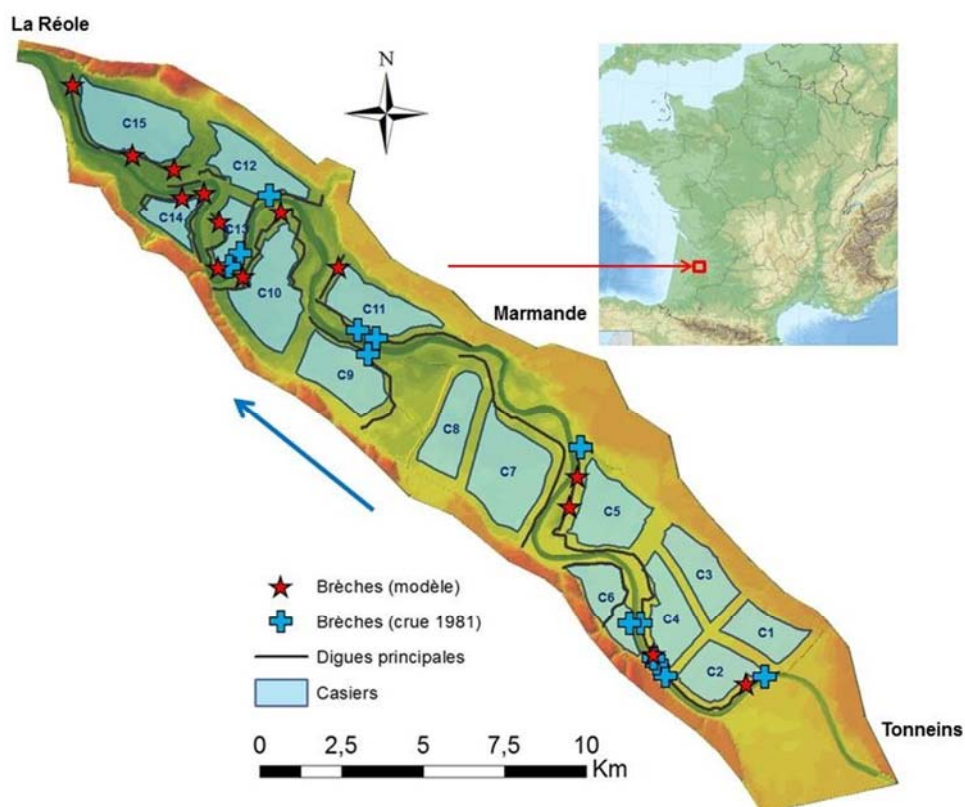


FIGURE 2 : TRONÇON D'ETUDE DE LA GARONNE ILLUSTRANT LES ZONES DE STOCKAGE, LES DIGUES, LES BRECHES REELLES DE 1981 ET LES BRECHES DE 1981 SELON LE MODELE HYDRAULIQUE

et la plupart des zones de stockage ont été sollicitées. En effet, plus de 25 brèches (visibles en partie sur la Figure 2), s'étendant sur des longueurs entre 10 et 100 mètres, ont été dénombrées sur le tronçon étudié [7]. Cette crue a été retenue comme crue de projet dans le cadre du « Benchmark Garonne », projet initié par EDF, auquel l'IRSN a participé et dont l'objectif est la quantification d'incertitudes sur un tronçon de la Garonne.

Modélisation hydraulique

Généralités

Le modèle numérique utilisé a été développé par l'IRSN, dans le cadre du projet « Benchmark Garonne », à l'aide du logiciel HEC-RAS [10]. De façon générale, ce code a été retenu pour sa simplicité d'utilisation et pour son module permettant de modéliser le phénomène de rupture de digues de différentes façons (par surverse et/ou par érosion interne). La construction du modèle numérique utilisé pour cette étude est détaillée dans la référence [11] et nous nous limiterons ici à ne reporter que les aspects principaux.

Modèle hydraulique du tronçon étudié

Le tronçon étudié a été construit à partir de 83 profils en travers transmis par EDF, dans le cadre du « Benchmark

Garonne », et issus de levés bathymétriques et de données topographiques. Les zones inondables du modèle sont représentées par 15 casiers dont la capacité de stockage est décrite par des courbes hauteur/volume représentatives de la topographie locale. Enfin, 73 liaisons hydrauliques permettent de « lier » les différents éléments du modèle numérique, de la manière suivante :

- 63 liaisons bief/casier :
 - 57 liaisons seuil représentant les digues et ayant une longueur comprise entre 300 et 1 683 mètres, soit 63 km de digues. Dans ce cas, des équations de seuil sont utilisées pour la modélisation (Eq. 1 et 2).
 - 6 liaisons « chenal », qui représentent des infrastructures hydrauliques (ponts, buses, *etc.*) en formulant l'hypothèse que l'écoulement se produit dans un canal prismatique sous un régime uniforme. Dans HEC-RAS elles sont considérées comme des liaisons de type « buse » et les calculs sont résolus en utilisant une équation de Bernouilli.
- 10 liaisons casier/casier :
 - 4 liaisons seuil basées sur la même équation de seuil que précédemment.
 - 6 liaisons « chenal » basées sur une équation de Bernouilli.

La condition initiale de la modélisation correspond à un débit

de $1\,830\text{ m}^3/\text{s}$, pour lequel il n'y a aucun débordement. Les conditions aux limites sont la courbe de tarage (hauteur/débit) au niveau de la station hydrologique de « La réole », à l'aval et l'hydrogramme de crue de 1981 enregistré à Tonneins, à l'amont. Le modèle a été calé lors d'une étude précédente [11]. Les paramètres ayant servi au calage et utilisés dans cette étude sont les coefficients de Strickler du lit mineur, égal à $40\text{ m}^{1/3}/\text{s}$, et de la plaine d'inondation, de $20\text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

Enfin, un pas de temps de calcul fin, de 10 secondes, a été choisi à l'issue des tests de sensibilité réalisés, afin d'avoir une bonne stabilité du modèle lors des ruptures de digues.

Modélisation des ruptures de digue

Dans le présent modèle de la Garonne, nous avons supposé que les 57 digues étaient susceptibles de rompre, compte tenu des nombreuses brèches observées lors des événements historiques. Ici, il est considéré que les brèches se forment uniquement par surverse donc lorsque la hauteur du cours d'eau dépasse la hauteur de la digue au niveau du centre de la brèche. En effet, d'après le retour d'expérience issu de l'événement de crue de 1981, il s'avère que ce mode de rupture est celui dominant pour les digues de la Garonne. Lors de la formation d'une brèche dans le modèle numérique, il est nécessaire de préciser les paramètres suivants dans la modélisation (Figure 3) :

- la position du centre de la brèche. Ici, nous considérons qu'elle correspond au centre de la digue ;
- la profondeur finale de la brèche (FBE) ;
- la largeur finale de la brèche (FBW) ;
- les pentes des bords de la brèche qui sont considérées toujours verticales dans ce cas d'étude ;
- le coefficient de débit du seuil représentatif de la brèche (WC) et qui peut être différent du coefficient de débit de la digue considérée ;
- la durée de formation de la brèche (FT) ;
- la dynamique de la brèche, c'est-à-dire le degré d'ouverture de la brèche en fonction du temps. Cette courbe croissante, de forme sinusoïdale est la même pour toutes les brèches qui se forment.

Plus précisément, l'initiation d'une brèche a lieu lorsque le critère de surverse (SWS), défini par l'utilisateur, est atteint de l'un ou de l'autre côté de la digue, c'est-à-dire dans la rivière ou dans le casier mais toujours au centre de la digue (donc au centre de la brèche). Enfin, lorsque la brèche commence à se former, le modèle calcule le débit de surverse Q , grâce à la loi de seuil suivante, qui est la même que celle utilisée pour le calcul des débits de surverse au-dessus des digues :

$$Q = CLH^{(3/2)} \quad (1)$$

$$C = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} \quad (2)$$

où C est le coefficient de seuil, C_d le coefficient de débit du seuil considéré, L la largeur du seuil et H la charge hydraulique à l'amont du seuil.

En reproduisant l'événement de 1981 avec le modèle hydraulique développé, il s'avère que 21 digues sur 57 sont partiellement ou totalement submergées, soit le tiers des digues, par des hauteurs de surverse allant jusqu'à 2,50 m. Or, pour qu'une brèche se forme, il est nécessaire que le niveau du cours d'eau dépasse la hauteur de la digue en son centre ce qui n'est pas le cas pour les 21 brèches.

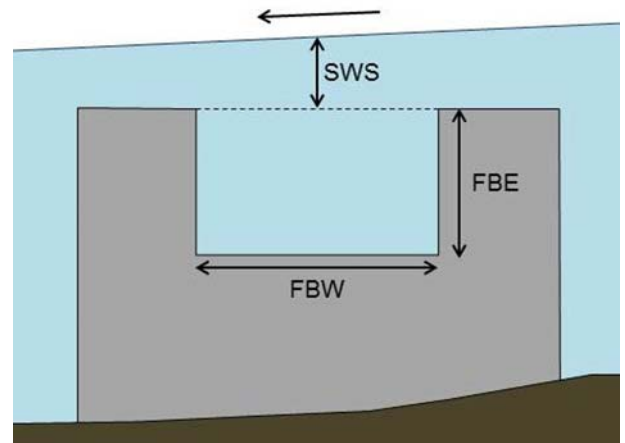


FIGURE 3 : ILLUSTRATION DES PARAMETRES LIES AUX RUPTURES DE DIGUES. AUX 3 PARAMETRES GEOMETRIQUES ILLUSTRÉS (SWS, FBE ET FBW) S'AJOUTENT FT ET WC.

Propagation d'incertitudes et analyse de sensibilité

Méthodologie

Les éléments méthodologiques généraux utilisés par l'IRSN pour les études de propagation d'incertitudes et d'analyse globale de sensibilité sont reportés dans [5] et nous nous limiterons ici à ne reporter que les éléments principaux de la démarche adoptée. Pour les finalités de l'étude, le logiciel HEC-RAS 5.0 a d'abord été couplé à l'environnement de calcul IRSN, Prométhée. Grâce au couplage Prométhée/HEC-RAS, la propagation d'incertitudes a été réalisée avec la méthode de Monte Carlo et l'analyse globale de sensibilité, comprenant le calcul des indices de Sobol, avec la méthode FAST (Fourier Amplitude Sensitivity Test) [12, 13]. Ces indices permettent notamment de hiérarchiser, par ordre d'importance, les paramètres numériques du modèle.

La propagation d'incertitudes et l'analyse globale de sensibilité ont été effectuées sur les paramètres liés aux ruptures de digues par surverse, considérés uniformément et distribués dans les gammes présentées dans le Tableau 1.

Les sorties sur lesquelles l'influence de ces paramètres a été évaluée sont les hauteurs d'eau maximales dans les casiers. Étant donné qu'il y a 15 casiers, nous nous sommes principalement focalisés sur 4 d'entre eux (casiers 2, 7, 10 et 15) répartis à la fois sur les deux rives mais également sur toute la longueur du tronçon étudié (Figure 2).

TABLEAU 1 : PARAMETRES DES BRECHES, DISTRIBUES AVEC UNE LOI UNIFORME

| Paramètres | Unités | Abréviations | Bornes |
|----------------------|--------|--------------|-----------|
| Surverse critique | m | SWS | [0 ; 1,5] |
| Largeur | m | FBW | [0 ; 300] |
| Profondeur | % | FBE | [-50 ; 0] |
| Coefficient de débit | - | WC | [1 ; 1,8] |
| Temps de formation | h | FT | [0 ; 24] |

Les trois types de calculs réalisés sont les suivants :

1. Analyse de sensibilité de type déterministe permettant d'étudier l'influence « individuelle » de chaque paramètre : pour cela, nous avons fait varier le paramètre étudié à intervalles réguliers, dans sa gamme de variation (cf bornes dans le Tableau 1), et fixé les 4 autres à des valeurs courantes (SWS=0,1 m, FBW = 100 m, FBE = 60 %, WC = 1,2 et FT = une heure), l'objectif étant d'analyser l'influence propre de ce paramètre sur les hauteurs d'eau maximales dans les casiers. Une quinzaine de calculs en moyenne ont été réalisés pour chacun des 5 paramètres.
2. Propagation d'incertitudes avec la méthode de Monte-Carlo : 400 calculs ont été effectués avec un tirage aléatoire des paramètres en suivant une loi uniforme. Les distributions, moyennes, *etc.* des valeurs de sortie ont été analysées.
3. Analyse de sensibilité avec la méthode FAST : elle permet de hiérarchiser les paramètres d'entrée par rapport à leur impact sur les sorties et d'observer quels sont les paramètres contribuant le plus à la variabilité des sorties d'intérêt. Cette méthode repose sur le calcul d'indices de sensibilité ou indices de Sobol, compris entre 0 et 1 ; plus ces indices sont proches de 1 et plus la variable (ou le groupe) est influente. La méthode FAST fournit deux indices de Sobol : l'indice de premier ordre qui correspond à l'effet du paramètre seul et donne la sensibilité de la sortie suite aux seules variations de ce paramètre et l'indice de sensibilité totale qui est la somme de tous les indices de sensibilité relatifs à la variable étudiée. Il représente la sensibilité à cette variable sous toutes ses formes c'est-à-dire la sensibilité à la variable seule et la sensibilité aux interactions de cette variable avec d'autres variables. Le nombre de calculs réalisés avec cette méthode est de 400 également.

Résultats

1. Influence individuelle de chaque paramètre

Le paramètre de surverse (SWS) est un cas à part puisque c'est, non seulement un paramètre variable dans le modèle, mais également le critère de rupture des digues. En effet, si SWS est très faible, on s'attend à ce que beaucoup de brèches se forment et par conséquent remplissent les casiers alors que s'il est trop important il n'y aura pas ou peu de brèches et son influence sur les hauteurs d'eau maximales dans les casiers sera invisible. Comme le montre la Figure 4, l'influence de SWS est beaucoup plus marquée pour de petites valeurs de SWS que de grandes valeurs, mais également plus marqué pour les casiers en amont par rapport à ceux en aval.

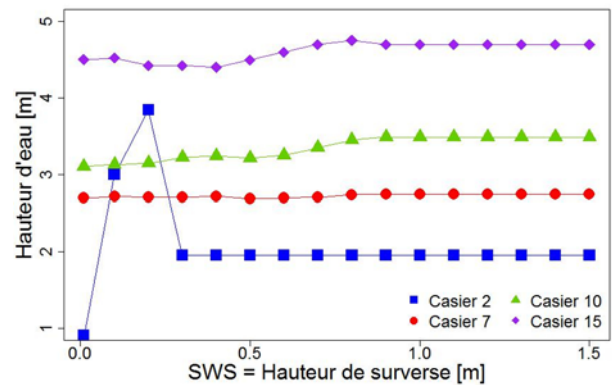


FIGURE 4: HAUTEURS D'EAU MAXIMALES DANS LES CASIERS 2, 7, 10 ET 15 EN FONCTION DE SWS

La Figure 5 illustre le nombre de brèches qui se forment en fonction de la hauteur de surverse. Sur les 21 digues partiellement ou totalement submergées, il est possible que 14 brèches se forment au maximum. Par ailleurs, ces brèches sont principalement localisées dans la zone aval et une majorité des brèches du modèle correspondent aux brèches qui se sont réellement formées pendant la crue de 1981.

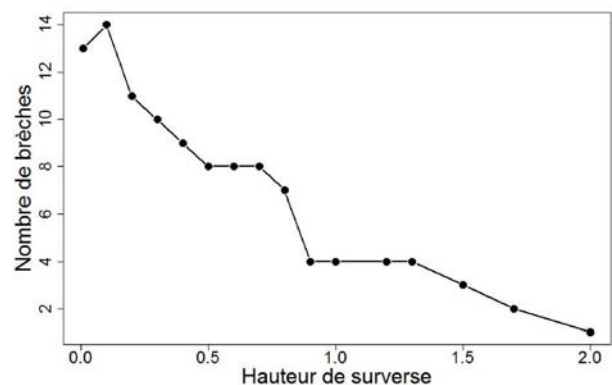


FIGURE 5 : NOMBRE DE BRECHES DANS LE MODELE NUMERIQUE AU COURS DE LA CRUE DE 1981, EN FONCTION DE LA HAUTEUR DE SURVERSE EN METRES (SWS)

Un des paramètres ayant beaucoup d'influence sur les

hauteurs d'eau maximales dans les casiers est la largeur finale de la brèche (FBW), surtout dans les casiers situés en amont (Figure 6-haut). Ensuite, la profondeur de la brèche, FBE, a également une forte influence (Figure 6-bas). Pour ces deux paramètres, il s'avère que les casiers situés en amont (casier n°2) varient toujours inversement par rapport aux casiers plus en aval (n° 7, 10 et 15). En effet, lorsque la largeur ou la profondeur des brèches augmente, les hauteurs d'eau maximales dans les casiers en amont augmentent alors qu'elles diminuent à l'aval.

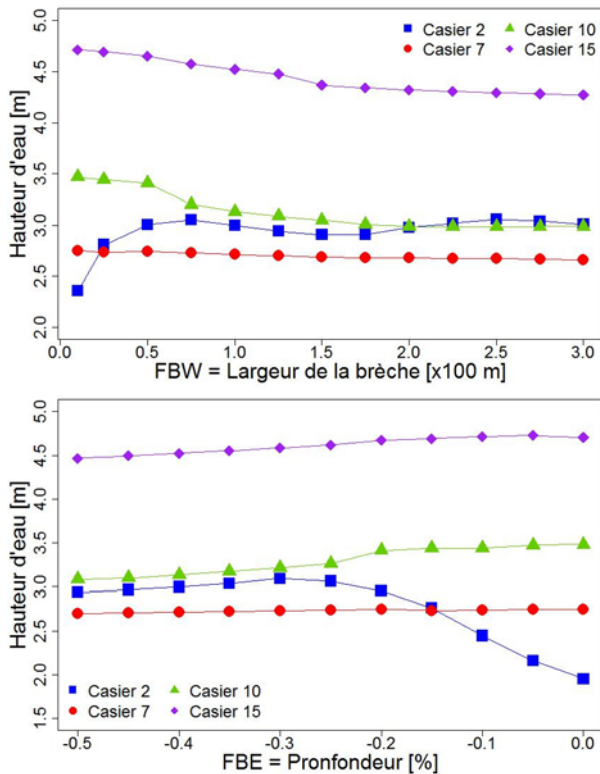


FIGURE 6 : HAUTEURS D'EAU MAXIMALES DANS LES CASIERS 2, 7, 10 ET 15 EN FONCTION DE FBW (HAUT) ET FBE (BAS)

Concernant le temps de formation (FT), l'influence est très faible, sauf pour les casiers en amont où elle est légèrement plus marquée mais dans tous les cas, plus le temps de formation de la brèche est long, plus la hauteur d'eau maximale dans le casier est importante. Le coefficient de débit de seuil (WC) a, quant à lui, une influence très faible (l'influence de ces deux derniers paramètres étant très faible, nous ne présenterons pas les résultats graphiques ici).

Pour la suite, nous nous sommes uniquement focalisés sur les paramètres FBW, FBE, WC et FT car, à partir de 90 cm de surverse, seulement 4 brèches se forment en aval et la variation de hauteur d'eau dans les casiers est peu visible puisqu'ils sont déjà bien remplis, même sans brèche. En conséquence, SWS a été fixé à 0,10 m, le but étant de prendre la situation la plus pénalisante pour se placer dans un

cas d'aléa maximal. Cela engendre la formation de 14 brèches de tailles plus ou moins importantes selon les autres paramètres.

2. Propagation d'incertitudes (méthode de Monte Carlo)

Dans un premier temps, il est nécessaire de vérifier que le nombre de calculs réalisés est suffisant à garantir la stabilité des résultats issus de l'étape de propagation d'incertitudes et d'analyse globale de sensibilité. Pour cela, la convergence de la moyenne a été évaluée sur toutes les sorties du modèle (*i.e.* les hauteurs d'eau maximales dans les casiers). L'ensemble des graphiques de convergence sont similaires et il s'avère qu'un échantillon de 200 calculs semble suffisant (*cf.* convergence du casier 10 sur la Figure 7).

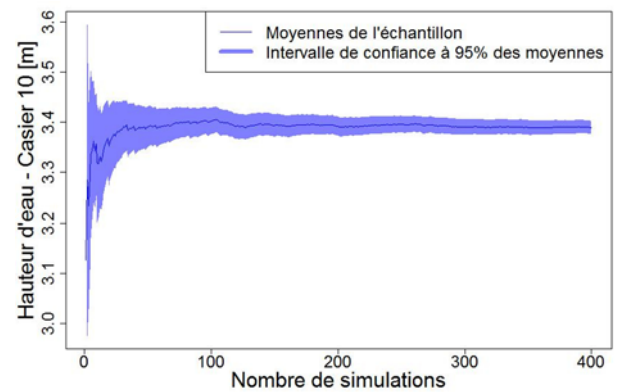


FIGURE 7 : CONVERGENCE DES MOYENNES POUR LE CASIER 10

Les boîtes à moustaches illustrées sur la Figure 8 et les histogrammes des casiers 2, 7, 10 et 15 (Figure 9) illustrent les variations des hauteurs d'eau maximales dans les différents casiers. Sur les boîtes à moustaches sont également figurées les hauteurs d'eau lorsqu'aucune brèche ne se forme (triangle rouge). Toutefois, il est important de noter qu'en réalité 14 brèches se forment puisque SWS est fixé à 0,10 m mais elles sont parfois de taille tellement petite que leur influence sur la hauteur d'eau dans les casiers est négligeable.

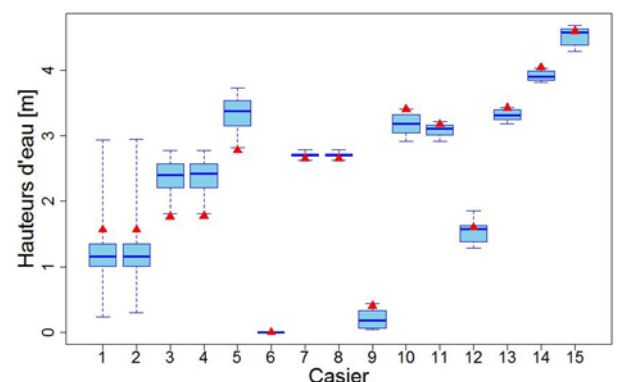


FIGURE 8 : BOITES A MOUSTACHES DES HAUTEURS D'EAU MAXIMALES DANS LES 15 CASIERS. LE TRAIT BLEU EST LA

MEDIANE, LES MOUSTACHES SONT LES EXTREMA ET LES BOITES S'ETENDENT DU QUARTILE 0,25 AU QUARTILE 0,75.

LES TRIANGLES ROUGES SONT LES RESULTATS DE LA MODELISATION SANS BRECHES.

Les résultats illustrent que :

- même sans brèches les casiers sont déjà bien remplis (à l'exception du casier 6), en effet la crue de 1981 était largement débordante ;
- les hauteurs d'eau dans les casiers en amont sont beaucoup plus variables que dans ceux situés en aval et ce, dans les casiers 1 et 2 en particulier ;
- dans la majorité des cas, les casiers en amont (jusqu'au 8^e casier, à l'exception des casiers 1 et 2) voient leur niveau d'eau augmenter lorsque des brèches se forment tandis que c'est l'inverse pour l'aval (casiers 9 à 15) ;
- les hauteurs d'eau dans les casiers 7 et 8 varient très peu.

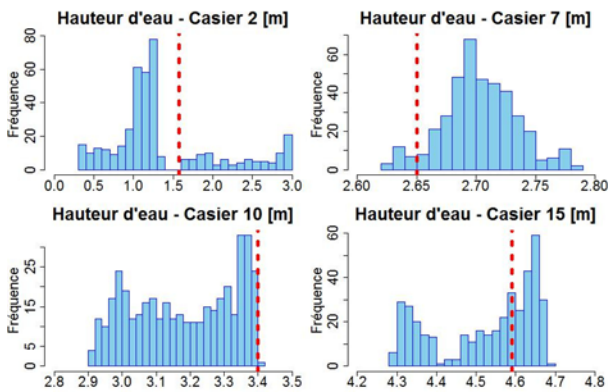


FIGURE 9 : HISTOGRAMMES OBTENUS AVEC LA METHODE MONTE-CARLO. LES DROITES DISCONTINUES CORRESPONDENT AUX RESULTATS DE LA MODELISATION SANS BRECHES.

3. Analyse de sensibilité (méthode FAST)

Comme dans le cadre de l'analyse avec la méthode de Monte-Carlo, la convergence de la moyenne a été vérifiée pour l'analyse FAST. Les calculs ont été réalisés en utilisant les mêmes paramètres et les mêmes bornes que précédemment et les résultats (indices de Sobol) sont présentés dans le Tableau 2 et sur la Figure 10 :

- de manière générale, les paramètres les plus influents sont ceux liés à la géométrie de la brèche (FBE et FBW), ce qui est concordant avec l'analyse « individuelle » de chaque paramètre présentée en premier ;
- il y a une différence notable entre les casiers situés en amont (casiers 1 à 8), par rapport à ceux en aval (9 à 15) ;
- les casiers 1 à 8 (amont) réagissent de manière similaire (à l'exception du casier 6 qui ne se remplit pas) ; en effet le paramètre ayant le plus d'influence est la profondeur de la brèche (FBE), puis son temps de formation (FT) ;
- les casiers 9 à 15 (aval) fonctionnent de la même façon mais différemment des casiers en amont : la profondeur (FBE) et la largeur de la brèche (FBW) sont les plus influentes et ont quasiment le même poids. Puis on

retrouve le paramètre de seuil de la brèche (WC) qui a une influence non négligeable, pour finir par le temps de formation (FT) qui n'a pratiquement aucun effet sur la hauteur d'eau dans les casiers en aval ;

- Les valeurs des interactions sont toujours plus élevées pour les casiers en amont que pour ceux en aval, ce qui laisse supposer que les interactions entre les paramètres des brèches sont plus marquées en amont.

TABEAU 2 : INDICES DE SOBOL DE 1^{ER} ORDRE ET INTERACTIONS CALCULES POUR LES 15 CASIERS. LES VALEURS EN GRAS SONT LES PARAMETRES LES PLUS INFLUENTS.

| | 1er ordre | | | | Interactions | | | |
|-----|-------------|-------------|------|------|--------------|-------------|------|-------------|
| | FBE | FBW | WC | FT | FBE | FBW | WC | FT |
| C1 | 0.57 | 0.11 | 0.02 | 0.42 | 0.31 | 0.52 | 0.18 | 0.29 |
| C2 | 0.57 | 0.11 | 0.02 | 0.42 | 0.31 | 0.52 | 0.18 | 0.29 |
| C3 | 0.47 | 0.20 | 0.01 | 0.32 | 0.07 | 0.11 | 0.10 | 0.11 |
| C4 | 0.46 | 0.23 | 0.01 | 0.32 | 0.07 | 0.11 | 0.09 | 0.11 |
| C5 | 0.46 | 0.15 | 0.01 | 0.38 | 0.07 | 0.10 | 0.10 | 0.10 |
| C6 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.80 | 0.80 | 0.80 | 0.80 |
| C7 | 0.68 | 0.05 | 0.04 | 0.31 | 0.20 | 0.23 | 0.16 | 0.24 |
| C8 | 0.68 | 0.05 | 0.04 | 0.31 | 0.20 | 0.23 | 0.16 | 0.24 |
| C9 | 0.41 | 0.51 | 0.17 | 0.05 | 0.10 | 0.11 | 0.03 | 0.02 |
| C10 | 0.43 | 0.50 | 0.17 | 0.05 | 0.09 | 0.10 | 0.03 | 0.02 |
| C11 | 0.37 | 0.52 | 0.32 | 0.11 | 0.12 | 0.14 | 0.02 | 0.05 |
| C12 | 0.43 | 0.42 | 0.30 | 0.08 | 0.19 | 0.21 | 0.05 | 0.13 |
| C13 | 0.43 | 0.48 | 0.21 | 0.08 | 0.12 | 0.14 | 0.02 | 0.03 |
| C14 | 0.48 | 0.41 | 0.06 | 0.18 | 0.12 | 0.10 | 0.11 | 0.05 |
| C15 | 0.43 | 0.42 | 0.30 | 0.09 | 0.19 | 0.21 | 0.05 | 0.13 |

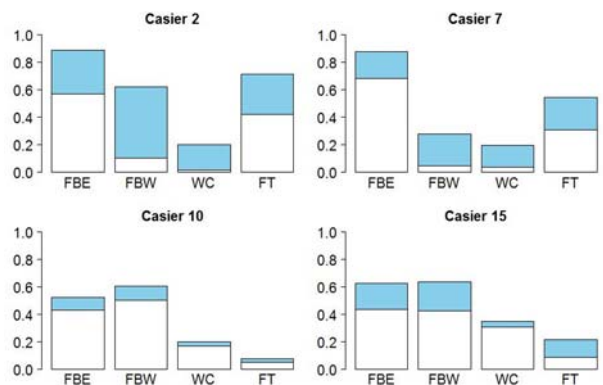


FIGURE 10 : INDICES DE SOBOL POUR LES CASIERS 2 ET 7 (AMONT), PUIS 10 ET 15 (AVAL). LES PARTIES BLANCHES CORRESPONDENT AUX INDICES DE PREMIER ORDRE ET LES PARTIES BLEUES CORRESPONDENT AUX INTERACTIONS. LES COLONNES DANS LEUR ENSEMBLE SONT LES INDICES TOTAUX.

Discussion et conclusions

Comparaison entre les méthodes d'analyses

Quelle que soit la méthode utilisée, la variation des hauteurs d'eau maximales dans les casiers est beaucoup plus marquée dans les 5 casiers les plus en amont que dans les autres. En effet, elles peuvent varier de plus de 2,50 m dans les 2 premiers casiers, de 1 m en moyenne dans les 3 suivants et de 0,50 m au maximum pour le reste. La circulation dans la zone amont est par conséquent relativement complexe et comprend de nombreuses incertitudes qui dépendent du nombre et de la taille des brèches, alors qu'en aval, le remplissage des casiers varie peu et les incertitudes sont plus faibles.

La première méthode, relativement classique, permet notamment d'illustrer à quel point le paramètre de surverse a de l'importance dans la modélisation : s'il est inférieur à 80 cm, jusqu'à 7 brèches peuvent se former alors qu'au-delà, 4 brèches se forment au maximum et l'influence sur la hauteur d'eau maximale dans les casiers est peu visible. Le fait d'avoir fixé la surverse à 10 cm seulement est plutôt pénalisant, puisque c'est avec cette valeur que le maximum de brèches se forme (14 brèches). Notons que certaines études de terrain semblent indiquer qu'il y a une forte probabilité qu'une brèche se forme pour une surverse comprise entre 0 et 20 cm [14, 15].

La méthode de propagation d'incertitudes illustre surtout la forte variabilité des résultats par rapport à la première méthode. Cela montre que la circulation peut être très complexe, surtout en amont et le rôle des brèches n'est pas négligeable.

La propagation d'incertitudes, ainsi que l'analyse FAST, donnent des résultats similaires et montrent notamment la forte différence entre amont et aval : les casiers en amont ont une réaction beaucoup plus marquée face à la formation des brèches, pourtant majoritairement localisées en aval, à la différence des casiers en aval. Enfin, les paramètres les plus influents concernent la géométrie de la brèche (FBE et FBW).

L'analyse de sensibilité FAST permet de classer l'influence des paramètres contrairement à la première méthode. En effet, elle montre que les paramètres de temps de formation et de seuil ont une influence non négligeable et surtout une interaction marquée avec les autres paramètres, particulièrement dans les casiers en amont.

De manière générale, l'intérêt de l'analyse de sensibilité est de mieux caractériser les paramètres des brèches pour améliorer, entre autres, le modèle hydraulique. Une possible amélioration consiste à simplifier le modèle en se focalisant sur les paramètres les plus influents et en fixant les autres à des valeurs moyennes. Cela permettra notamment une diminution de la variabilité des sorties mais aussi une

diminution du temps de calcul.

Améliorations et perspectives

Du fait des simplifications réalisées au préalable pour les besoins de la modélisation, le modèle comporte quelques limites et certaines améliorations pourraient être faites.

Tout d'abord, afin d'avoir un faible nombre de paramètres en entrée, nous avons considéré que les brèches qui se formaient avaient toutes la même géométrie et que leurs dimensions étaient proportionnelles, ce qui n'est pas forcément le cas. Comme l'étude a montré une forte différence entre amont et aval, il faudrait différencier au moins ces deux zones par la suite et attribuer des paramètres différents aux brèches localisées en amont de celles en aval.

Ensuite, dans le modèle, uniquement les brèches formées par surverse ont été prises en compte. Cela correspond à la majorité des brèches réelles mais il serait intéressant d'intégrer les brèches formées par érosion interne ou externe. De plus, la géométrie des brèches formées par surverse, modélisées est relativement simple alors que ce n'est pas du tout le cas dans la réalité.

Par ailleurs, les calculs ont uniquement été réalisés à partir de l'hydrogramme de crue de 1981, or il serait intéressant de voir les effets d'autres crues, par exemple moins débordantes, ou avec des débits de pointe plus forts mais des durées plus courtes.

Enfin, seules les hauteurs d'eau maximales dans les casiers ont été étudiées, mais il faudrait également se focaliser sur l'influence des brèches sur les hauteurs d'eau dans le lit mineur.

Le modèle de la Garonne est certes très simplifié et nécessite des améliorations mais la méthode d'analyse d'incertitudes semble plutôt robuste. La construction d'un modèle 2D de la Garonne est en cours et le but est de géoréférencer les digues, les casiers, les liaisons, *etc.* pour pouvoir améliorer la géométrie générale du modèle et améliorer l'affichage des résultats. L'objectif est de coupler ce nouveau modèle avec Prométhée afin de préciser les analyses de sensibilité.

Enfin cette méthode n'a pour l'instant été appliquée que sur un tronçon de la Garonne. Une des perspectives est de l'appliquer à d'autres cours d'eau, soumis également à des ruptures de digues afin de voir, entre autres, si les paramètres des brèches les plus influents sont les mêmes ou encore si les incertitudes sont aussi fortes.

Références

- [1] Marrel, A., et al., Calculations of sobol indices for the Gaussian process metamodel. *Reliability Engineering & System Safety*, 2009. 94(3): p. 742-751.

- [2] Iooss, B., Revue sur l'analyse de sensibilité globale de modèles numériques. *Journal de la Société Française de Statistique*, 2011. 152(1): p. 3-25.
- [3] Faivre, R., et al., *Analyse de sensibilité et exploration de modèles: application aux sciences de la nature et de l'environnement*, 2013, Editions Quae.
- [4] Saltelli, A., et al., *Global sensitivity analysis: the primer*, 2008, John Wiley & Sons.
- [5] Bacchi, V., et al., Feedback from Uncertainties Propagation Research Projects Conducted in Different Hydraulic Fields: Outcomes for Engineering Projects and Nuclear Safety Assessment, in *Advances in Hydroinformatics*, 2018, Springer. p. 221-241.
- [6] Allsop, W., et al., Failure mechanisms for flood defence structures. FLOODsite Report. T04_06_01, 2007.
- [7] Rapport Technique LPCB Laboratoire des Ponts et Chaussées de Bordeaux, F., Vallée de la Garonne: Enquête sur les ruptures de digues de décembre 1981 entre Meilhan et Port Sainte-Marie. 1983.
- [8] Lalanne-Bertoudicq, G., R. Lambert, and B. Plus, *Monographie des crues de la Garonne: du Pont du Roy au Bec d'Ambès*, 1989, Smepag.
- [9] SMEAG, R.S.-M.d.C.E.p.l., *Etude Diagnostic: Endiguements en lit majeur de la Garonne entre Port Saint-Marie et Castets-en-Dorthe*. 1998.
- [10] Brunner, G., HEC-RAS, *River Analysis System User's Manual*, version 5.0. US Army Corps of Engineers, Institute For Water Resources, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA, USA, 2016.
- [11] Bertrand, N., et al., Uncertainties of a 1D Hydraulic Model with Levee Breaches: The Benchmark Garonne, in *Advances in Hydroinformatics*, 2018, Springer. p. 189-204.
- [12] Saltelli, A., S. Tarantola, and K.-S. Chan, A quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model output. *Technometrics*, 1999. 41(1): p. 39-56.
- [13] Cukier, R., et al., Study of the sensitivity of coupled reaction systems to uncertainties in rate coefficients. I Theory. *The Journal of chemical physics*, 1973. 59(8): p. 3873-3878.
- [14] EGIS, *Études de dangers des digues domaniales de classe B du département de la Nièvre – Val de Decize - S7 Etude des aléas de rupture sur la digue (diagnostic)*. 2016.
- [15] Maurin, J., et al. *Études de dangers des digues de classe A de la Loire et de ses affluents-retour d'expérience*. in *Digues maritimes et fluviales de protection contre les submersions-2ème colloque national-Digues2013*. 2013.