

La modélisation hydraulique 2D globale dans le cadre d'un programme de fiabilisation des levées : exemple des vals de l'Orléanais

The large-scale 2D hydraulic modelling used as part of a levees work program: example of valleys of Orleans

L. Cuvillier¹, A. Bontemps¹, S. Braud², S. Patouillard²

¹ Cerema Normandie-Centre, Blois, France, loann.cuvillier@cerema.fr

² DREAL Centre-Val de Loire, Orléans, France, stephane.braud@developpement-durable.gouv.fr

Résumé

Le val d'Orléans est l'une des plus importantes zones endiguées de la Loire, en termes de surface, de linéaire de digues et d'enjeux socio-économiques. Le programme de fiabilisation des levées protégeant cette zone est essentiellement basé sur l'étude de dangers (EDD) du val d'Orléans et la démarche « Étude des vals de l'Orléanais – ECRIVALS » [3]. Outre les travaux d'amélioration du niveau de sûreté, il prévoit la réalisation de tronçons résistants à la surverse, le rehaussement ponctuel de digues pour empêcher la surverse lors de crues de faible période de retour et enfin, un réajustement de l'altimétrie du déversoir de Jargeau.

Dans ce cadre et afin de mieux appréhender le fonctionnement de cette zone endiguée, la DREAL Centre-Val de Loire a sollicité le Cerema afin de réaliser une modélisation hydraulique en deux dimensions (2D), de façon globale, en intégrant le lit mineur, le lit majeur et les digues. Pour évaluer les interactions hydrauliques entre les différentes zones endiguées du secteur, le modèle inclut également des vals situés en amont ainsi que l'ensemble des vals possédant tout ou partie de leur système d'endiguement en face de celui d'Orléans.

L'objet du présent article est de réaliser un retour d'expérience sur la construction de ce modèle et sur ses apports pour comprendre le fonctionnement du système endigué d'Orléans et ses interactions avec les systèmes limitrophes. In fine, l'objectif de cet outil est de fournir une aide au gestionnaire pour définir et dimensionner les aménagements à prévoir sur le système.

Trois aspects sont développés : d'abord, un bilan des apports/limites du nouveau modèle 2D étendu en comparaison avec la solution retenue pour l'EDD qui consistait à représenter les vals en 2D, le lit mineur en 1D et à coupler ces deux outils. La méthode d'identification des zones de surverse par dessus les levées, enjeu clef de ce nouveau modèle, est présentée dans un second temps. Enfin, sont abordées les perspectives d'utilisation du modèle pour

prendre en compte l'évolution morphologique de la Loire liée à sa dynamique fluviale (développement de la forêt alluviale et l'évolution topographique du lit). L'objectif est d'évaluer la pérennité et la sensibilité à moyen terme des aménagements envisagés.

Mots-Clés

Modélisation hydraulique 2D, digues, systèmes d'endiguement, aménagement, végétation alluviale

Abstract

With more than 50 000 inhabitants protected, the Orleans levee system is one the most important of all Loire valley, in terms of areas, of dike length and of economic issues. The risk assessment study named « Etudes de dangers » and the « ECRIVALS » [3] approach showed the need to reduce the hazard of dikes breaching during an exceptional flood.

In order to reduce flood hazards, a levee improvement program is being developed. Three possible improvements are considered : increasing the resistance to overflowing of some levee sections, raising low levee sections to prevent overflow and resizing the spillway crest of Jargeau.

In order to quantify and qualify the dike development program, a 2-dimensional hydraulic model was developed by the Cerema, including floodplains, levee system and main channel. It allows describing flows within zones protected by the levee system.

This article presents a feedback from the construction of this model. This feedback focuses on three main aspects: Firstly, a balance assessment of the contributions/limits of this extended model is made with regard to the previous tools. Secondly, a specific focus on the characterization of overtopping is realized. Finally, a perspective on the morphological evolution of the Loire River is given. The aim

is to assess the medium term longevity and sensitivity of the suggested improvements.

Key Words

Bidimensionnal hydraulic model, dike, work program, alluvial vegetation

Introduction

La vallée de la Loire dans la traversée de l'Orléanais se compose d'une succession de vals inondables protégés par des digues entre lesquelles le fleuve s'écoule. Ces territoires abritent plusieurs dizaines de milliers d'habitants et n'ont, depuis 100 ans, plus connu de crue majeure. Les événements historiques du XIX^e siècle étant arrivés hier et pouvant se reproduire demain, la connaissance mais aussi la fiabilisation des systèmes de protection sont aujourd'hui au cœur des préoccupations de l'Etat et des territoires.

Le val d'Orléans fait partie des 3 plus grandes zones endiguées de la Loire moyenne et de ses affluents [Figure 1]. Il est protégé par une digue de classe A¹. Protégeant près de 60 000 habitants et de nombreux enjeux sur une surface supérieure à 160 km², ce val fait l'objet d'études régulières de prévention du risque inondation. Plus long que large (36 km contre 7 km environ), ce val, situé en rive gauche de la Loire, est bordé, au sud, par un coteau d'une vingtaine de mètres de hauteur et, au nord, par un système d'endiguement ouvert à l'aval composé de 40 km de digues et du déversoir de Jargeau. Ce val est précédé par un autre val important situé en rive droite : le val d'Ouzouer dont le système d'endiguement est de classe B², est également ouvert à l'aval et comporte aussi un déversoir. Ces deux vals sont fortement interdépendants puisqu'ils sont situés en vis à vis sur près de 11 km. À noter que trois autres vals de plus petite taille sont présents dans la zone : le val de Sully, le val de Châteauneuf-sur-Loire et le val de Bou.

En 2012, l'État, gestionnaire des digues d'Orléans, a réalisé une étude de dangers (EDD) permettant d'apporter de nouvelles connaissances sur l'état et le fonctionnement du système d'endiguement [6]. Cette étude a montré que la levée (autre nom donné aux digues sur le bassin de la Loire) d'Orléans subirait probablement un dysfonctionnement en cas de crue atteignant un débit de pointe de 4 660 m³/s (T70). Les résultats principaux de cette étude sont les suivants :

- le niveau de protection apparent du système d'endiguement est associé à la crue de débit 6 300 m³/s à Orléans (T200) qui provoque des surverses significatives au dessus de la crête de digue ;
- le niveau de sûreté est associé à la crue de débit 4 660 m³/s à Orléans (T70) ;
- le fonctionnement du déversoir de Jargeau est anormal puisque les eaux ne franchiraient cet ouvrage que bien après le déversement par-dessus certains tronçons non résistants à la surverse du système d'endiguement. Cet aspect avait déjà été mis en évidence au début des années 2000 par l'équipe pluridisciplinaire du Plan Loire Grandeur Nature [7].

Dans le but d'adapter les activités anthropiques et le développement des territoires, l'Etat et les collectivités territoriales ont terminé, en 2013, l'Etude Concertée face au Risque Inondation dans les Vals de l'Orléanais (ECRIVALS) [3]. Le partage des connaissances et la concertation entre les différents acteurs étant la genèse de cette nouvelle étude, celle-ci a abouti à la définition de principes d'occupation des sols et de réduction de la vulnérabilité mais aussi à des mesures structurelles d'aménagement et de fiabilisation des levées.

À la suite de ces études, la DREAL Centre-Val de Loire a élaboré le programme de fiabilisation de la levée d'Orléans [8]. Les objectifs de ce programme sont d'abord de remonter le niveau de sûreté du système d'endiguement, ensuite de gérer surverses en cas de crue majeure. La gestion



FIGURE 1 - DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE ET DES DIFFERENTS SYSTEMES D'ENDIGUEMENT LA COMPOSANT (SOURCE: SCAN 100® – IGN©)

des surverses comporte trois axes de confortement :

- consolider certains tronçons de digue pour leur permettre de résister à la surverse ;
- rehausser certaines digues pour empêcher les surverses dans des zones à forts enjeux ;
- réajuster le déversoir de Jargeau pour en assurer un fonctionnement fiable et efficace pour la sûreté des digues et guider les eaux lors de l'inondation du val.

Afin de mieux définir et dimensionner ce programme de travaux à une échelle cohérente, la DREAL Centre-Val de Loire (DREAL CVL) a entrepris en 2015 d'approfondir sa connaissance du fonctionnement hydraulique actuel du val d'Orléans couplé à celui d'Ouzouer. L'évaluation des impacts avant et après aménagements a été confiée au Cerema, qui a développé un outil de modélisation hydraulique 2D à l'aide du code de calcul TELEMAC [4].

Cet article ne vise pas à détailler les résultats et les réflexions de cette étude qui ont fait l'objet d'un précédent article dans le cadre du colloque « Hydraulique des barrages et des digues » organisé par le Cibr et la SHF [5]. Il a pour objet de présenter l'utilisation de ce modèle comme source d'informations pour mieux comprendre et décrire les écoulements. Les gains apportés par ce modèle construit à une échelle hydraulique cohérente mais aussi les difficultés de construction et les différents types de résultats sont détaillés dans le présent article.

Ainsi, après avoir décrit les différents outils développés sur la zone d'étude, trois sujets auront pour rôle d'illustrer cette réflexion :

1. un bilan des apports/limites d'un tel modèle global ;
2. le cas précis de la gestion des surverses ;
3. l'évolution du lit à +50ans.

Les outils de modélisation disponibles et développés

Anciens outils de modélisation

Historiquement, les digues de Loire ont été étudiées selon deux aspects : l'un concerne la prévision et la propagation des crues en raison des multiples enjeux présents le long de ce fleuve tandis que l'autre s'intéresse à la résistance des levées pour évaluer le risque d'exposition des populations. Dans ces deux cadres, des outils de modélisations et de caractérisation du fonctionnement des systèmes d'endiguement distincts ont été élaborés et développés au fur et à mesure des connaissances. Trois outils majeurs ont ainsi été construits :

1. Le Service de Prévision des Crues (SPC) Loire Cher Indre dispose d'un modèle hydraulique de prévision couvrant la Loire de la commune d'Imphy (58) à celle de Langeais (37) en incluant l'Allier depuis Moulin (03). Sur notre zone d'étude des vals de l'Orléanais, ce modèle est de type unidimensionnel à casier [Figure 2]. Il représente les différents

bras d'écoulement de la Loire et gère les surverses par-dessus les levées sous forme de « lois seuils » ; les casiers sont gérés par des lois hauteur-volume. Ce modèle opérationnel est conçu pour la prévision des crues et a été mis à jour et de nouveau calé sur le tronçon Gien-Orléans en 2016 à partir des relevés bathymétriques réalisés en 2015 ainsi que par affinement des liaisons hydrauliques entre biefs [1].



FIGURE 2 – VUE LOCALISEE DU MODELE 1D LM10-EDD (SECTEUR JARGEAU – SANDILLON)

2. Dans le cadre des Etudes de danger (EDD) des digues de Loire, plusieurs modèles bi-dimensionnels représentant uniquement les vals sans le lit mineur de la Loire ni les digues ont été conçus dans plusieurs vals de la Loire-moyenne. Ainsi, 3 des 5 vals de notre zone d'étude (Orléans, Ouzouer et Bou) sont pourvus d'un modèle de type Telemac 2D, 1 des 5 vals (Sully) n'en est doté que partiellement tandis que le dernier a été étudié uniquement via le modèle 1D à casiers (Châteauneuf-sur-Loire). Tous ces modèles de val ne représentent pas les digues puisque celles-ci en constituent les frontières. Les conditions aux limites des modèles hydrauliques 2D (hydrogrammes de surverses et de brèches) sont fournies par le modèle 1D à casiers.

3. Enfin, pour ces EDD, un outil de caractérisation des défaillances de digue a été élaboré grâce à la collaboration entre le Cerema, l'Irstea et la DREAL CVL. Cet outil nommé « CARdigue » a pour objet de qualifier et quantifier le risque de rupture d'un tronçon d'ouvrage au regard d'une multitude de paramètres comme le niveau d'eau côté Loire et côté val, les données géotechniques, les données d'occupation du sol ou la topographie de l'ouvrage. Cet outil est conçu sur la base de lois empiriques et scientifiques de calcul de stabilité d'ouvrage mais aussi sur de l'expertise. Il permet de comparer les tronçons de digue entre eux et d'en identifier les plus vulnérables au glissement, au soulèvement, à l'érosion ou à la surverse.

Outils complémentaires développés

Suite aux préconisations de confortement issues de ces études, la DREAL CVL a identifié des méconnaissances sur l'interdépendance des vals (influence du laminage des crues sur un val situé en amont d'un autre val) mais aussi sur la caractérisation des surverses sur les levées. Dans ce cadre, la DREAL CVL a missionné le Cerema Normandie-Centre afin de concevoir un modèle hydraulique bi-dimensionnel incluant l'ensemble des vals de l'Orléanais [4].

Conçu entre 2016 et 2017, ce modèle englobe l'intégralité du lit majeur en intégrant les modèles de vals existants et représente les digues mais aussi le lit mineur de la Loire. L'ensemble des écoulements est géré dans un unique outil qui inclut la propagation des crues en Loire, le déversement par les déversoirs ou les digues et les écoulements en lit majeur. Seulement deux frontières d'injection jouent le rôle de condition aux limites et sont localisées uniquement dans le lit mineur de la Loire. Celles-ci sont définies à partir du modèle 1D du SPC et ont fait l'objet d'allers-retours afin de vérifier que ces deux modèles présentaient des résultats similaires, notamment sur la propagation des ondes de crues.

Ce sont ces deux groupes d'outils de modélisation qui font l'objet d'une comparaison dans cet article.

Bilan technique et opérationnel du développement d'un modèle à échelle globale

Cette section s'intéresse à la comparaison des modèles, tant d'un point de vue technique qu'opérationnel.

Éléments positifs du retour d'expérience

D'un point de vue technique ou hydraulique, ce modèle global représentant le lit de la Loire, les digues et les vals dans un unique outil a permis des améliorations notables dans la modélisation de la propagation des crues mais aussi dans la représentation du comportement des levées.

Dans un premier temps, le modèle 2D a permis une meilleure représentation des écoulements dans le lit mineur. Les méandres de la Loire étant nombreux dans cette zone et contraints par les levées, le modèle 2D a permis de gagner en précision sur les lignes d'eau pour une crue de plein bord. En effet, le calage du modèle 2D a été réalisé à partir des données de la crue de décembre 2003. Au droit du val d'Orléans, cette crue est restée circonscrite dans le lit inter-digues.

Le modèle 1D a été calé sur 10 crues, dont 2003 est la plus forte. Le graphique suivant représente les calages obtenus avec le modèle 1D et le modèle 2D sur cette crue. L'erreur quadratique moyenne commise avec le modèle 1D est de 16 cm (maximum absolu de +37 cm) tandis qu'elle passe à 6 cm avec le modèle 2D (maximum absolu de +21 cm) [Figure 3]. Il est possible d'y constater une meilleure homogénéité de représentation de la ligne d'eau de la crue 2003 avec le modèle 2D. À noter que la comparaison de ces deux modèles n'est que théorique puisque ceux-ci ne sont pas conçus pour les mêmes objectifs et donc non dimensionnés de la même façon.

Le modèle 2D a également permis de mieux représenter le laminage de crue généré par le val d'Ouzouer, faisant face à la partie amont val d'Orléans. L'interdépendance hydraulique entre ces deux vals a pu être décrite de manière plus précise et plus fiable qu'avec une modélisation 1D.

Pour la crue 6 600 m³/s (T200) (débit générant les premières surverses sur le val d'Orléans), le val d'Ouzouer, dont le niveau de protection apparent est plus faible (5 300 m³/s (T80)), est fortement sollicité hydrauliquement. Trois modes d'inondation, participant à l'interdépendance du val d'Orléans avec celui d'Ouzouer, ont ainsi pu être caractérisés :

1. le détournement des débits de la Loire par le déversoir d'Ouzouer (déclenchement à 5 300 m³/s) permet de contrôler les niveaux d'eau dans le lit inter-digues. Le passage d'une crue de 5 600 m³/s à 6 600 s'accompagne d'une augmentation de +30 cm de la ligne d'eau dans les zones sous influence du déversoir (partie amont de la zone endiguée d'Orléans) tandis que les zones hors de cette influence se voient augmenter de +70 cm. Cette relative maîtrise des hauteurs d'eau permet de diminuer la mise en charge de la partie amont de la digue d'Orléans ;

2. l'inondation par remous possible en aval du val d'Ouzouer écriète ainsi une crue de débit de pointe 6 600 m³/s (T200). La pointe de crue au niveau d'Orléans passe à 6 300 m³/s (- 300 m³/s) ;

3. l'influence du déclenchement d'une brèche dans la levée d'Ouzouer sur la ligne d'eau en Loire en aval de ce système d'endiguement dépend de la localisation, de la taille et de l'instant de la rupture par rapport à l'hydrogramme de crue.

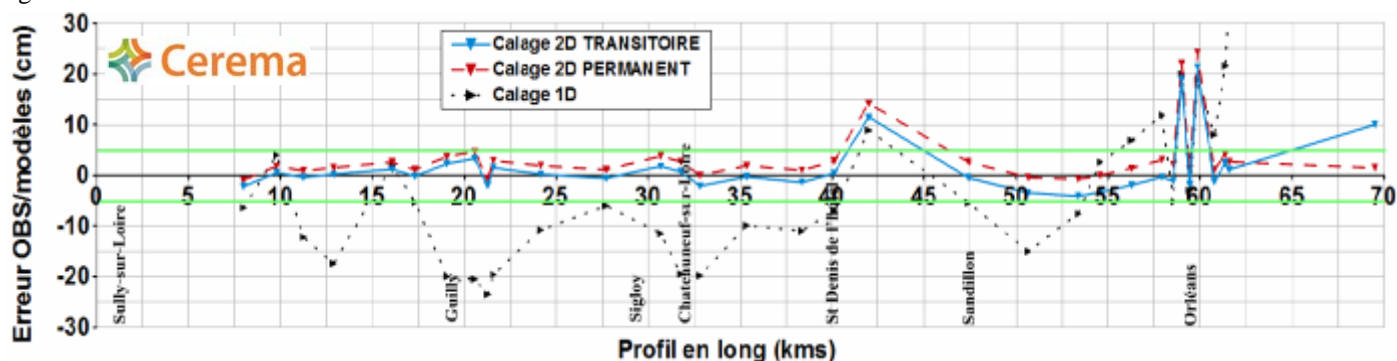


FIGURE 3 – CALAGE DES MODELISATIONS : COMPARAISON DES LIGNES D'EAU ENTRE L'OBSERVATION ET LES MODELES 1D ET 2D POUR LA CRUE DE 2003

Après avoir décrit les améliorations techniques concernant la représentation des écoulements, des progrès notables ont également été réalisés sur la représentation du fonctionnement des levées. Les digues étant entièrement représentées dans le maillage du modèle avec leur altimétrie précise, la caractérisation des surverses par-dessus celles-ci a été affinée et fiabilisée. Cet aspect est plus largement abordé dans la section suivante « Exploitation du modèle pour la caractérisation des surverses ». La prise en compte des digues dans le modèle a également permis une meilleure simulation des brèches afin d'étudier leurs conséquences sur les lignes d'eau et les écoulements. Cependant, le seul mécanisme de rupture pris en considération est la surverse. Ce choix constitue une hypothèse de travail forte car les retours d'expériences sur les crues historiques et les études de dangers ont montré que d'autres mécanismes, comme l'érosion interne, ont également participé à la rupture de levées. Auparavant, la comparaison des lignes d'eau, issues du modèle 1D, avec la crête des digues permettait d'identifier les zones de surverse et donc les frontières d'injection dans les modèles 2D des vals. Le nouveau modèle global réalise toutes ces étapes en une simulation. L'hypothèse d'une lame d'eau surversante limite susceptible de déclencher une brèche par surverse (20 cm) a été appliquée à l'ensemble des digues en les discrétisant par tronçons de 50 m. Avec cette condition, le modèle gère ensuite le scénario de crue et de brèche en une unique simulation donnant à la fois l'inondation provoquée par les brèches dans le lit majeur mais aussi l'impact sur la ligne d'eau en lit mineur [Figure 4].

Enfin, d'un point de vue opérationnel, ce modèle global évite le couplage manuel ou automatique entre modèles et gère plusieurs processus hydrauliques en une seule simulation. L'accumulation d'erreurs entre modèles y est ainsi limitée tout comme les manipulations du modélisateur.

Il est possible d'interroger les résultats de modélisation assez librement. Par exemple, l'extraction des hauteurs d'eau ou des vitesses d'écoulement est possible tant en pied de digue, qu'en intrados ou extrados de méandre ou en lit majeur à l'intérieur de la zone protégée.

Dans le cadre de l'aide à la décision pour définir un programme de travaux de confortement, cette liberté de fonctionnement et d'exploitation du modèle constitue un réel avantage.

Éléments négatifs du modèle global

Bien que de nombreux avantages à ce modèle global aient été identifiés, trois inconvénients principaux ont tout de même été rencontrés :

D'une part, la taille importante et les fonctions gérées par le modèle (ouverture de brèches) nécessitent une grande densité de calcul et une assimilation de données importantes (topobathymétrie, description des brèches, représentation des canalisations, ...). Outre la durée importante des crues de la Loire (plusieurs jours), un modèle de cette taille (1,3 million

de nœuds) est donc gourmande en temps de calcul pour des machines « standards ». Cela rend difficile sa construction, son calage et son exploitation. À titre d'exemple, une simulation de 7 jours de crue tourne sur un ordinateur de 16 processeurs en 15 jours. Des durées plus faibles peuvent être obtenues avec du matériel informatique perfectionné et correctement paramétré comme un cluster (durée de calcul de 2,5 jours avec un cluster de 96 processeurs), ce matériel nécessitant de l'investissement et des compétences spécifiques.

D'autre part, la prise en compte de toutes les contraintes pour un modèle d'une telle envergure avec de tels objectifs est complexe à mettre en place et requiert un modélisateur aguerri. Les contraintes sont à la fois dans la construction du maillage, dans la représentation de la bathymétrie de la Loire et dans le calage du modèle avec la prise en compte d'une morphologie fluviale et d'une dynamique sédimentaire complexes.

Après ces deux remarques plutôt orientées sur l'opérationnel, ce dernier point concerne un aspect technique. La représentation, dans le modèle 2D, des ponts traversants la Loire a soulevé la question de leur mise en charge. Que ces ouvrages soient mis en charge ou pas, ils nécessitent une représentation fine dans le maillage, augmentant du même coup les durées de calcul. Une représentation plus grossière de ces ouvrages peut mener à des instabilités de calcul de la ligne d'eau pouvant accentuer artificiellement des surverses ou perturber le référencement d'une crue à une échelle limnimétrique, souvent située à proximité des ponts.

Quelques remarques complémentaires

Après le bilan avantages/inconvénients du développement d'un tel modèle sur les digues de Loire, trois remarques complémentaires permettent d'enrichir ce bilan sur les outils utilisés :

1. Ce nouvel outil de modélisation globale des vals de l'Orléanais a permis de confirmer les résultats issus des EDD concernant la survenance et la localisation des surverses et donc la définition des niveaux de protection apparents. En revanche, le référencement de la crue générant le niveau de protection apparent (Crue T200 – 6 600 m³/s à l'amont du val) à l'échelle limnimétrique d'Orléans a été remis en question. Le développement et l'actualisation des outils de modélisation et la prise en compte de données plus récentes ont conduit à modifier le référencement de cette crue à l'échelle d'Orléans, le faisant passer de 5,75 m à 6,60 m pour un débit de pointe de l'ordre de 6 300 m³/s. Les modélisations 1D et 2D sont convergentes à ce sujet. L'écart de près d'1 m en hauteur d'eau met en évidence l'importance de la mise à jour des données mais aussi des choix réalisés sur la modélisation. Les résultats obtenus correspondent à une incertitude de +/- 9% par rapport à la courbe de tarage du SPC, ce qui est encourageant et raisonnable au vu des niveaux de crue élevés étudiés.



FIGURE 4 – CARTE DE SYNTHÈSE DU SCÉNARIO DE CRUE (6600 M³/S) AVEC PLUSIEURS DECLENCHEMENTS DE BRECHES (CROIX JAUNES)

2. Ce modèle global incluant plusieurs processus à la fois est conçu dans un objectif précis : aider à la décision dans la définition d'un programme de travaux de confortement. Malgré les améliorations notables détaillées précédemment, il n'est donc pas aujourd'hui envisageable d'employer un tel modèle dans le cadre de la prévision de crue en conditions opérationnelles. Il pourrait toutefois être utilisé pour cartographier l'emprise des zones inondables des vals de l'Orléanais dans le cadre de la démarche « Zones inondées potentielles » (ZIP)

3. Enfin, à noter qu'un tel modèle requiert l'acquisition de nombreuses données : la bathymétrie, la topographie précise des levées, etc. Bien que difficiles à collecter, les données sur les crues historiques, nécessaires au calage du modèle, sont également essentielles pour représenter de façon fidèle les surverses et les interactions entre vals.

De tous les éléments décrits ci-dessus, l'élément le plus remarquable obtenu grâce à ce modèle global concerne la représentation et la description des surverses, élément présenté dans la section suivante.

Identification des zones de surverse à partir de la modélisation

Le positionnement des zones de premières surverses du val d'Orléans est directement dépendant du fonctionnement du val d'Ouzouer. Les premières surverses apparaissent à l'amont du val d'Orléans si le val d'Ouzouer n'est pas mobilisé ou en face du débouché aval du val d'Ouzouer si ce dernier est inondé. La qualification de cette interdépendance ainsi que la caractérisation des surverses susceptibles de mener à la formation de brèches constituent les principaux besoins ayant justifié le développement d'un nouvel outil de modélisation.

Identification des points de faiblesses du système d'endiguement et caractérisation de la surverse avec le modèle 1D à casiers

Avec l'outil 1D à casiers, la méthodologie de description des surverses suivait les étapes suivantes :

1. définition d'un scénario de crue et modélisation avec l'outil 1D à casiers ;
2. extraction de la ligne d'eau calculée au droit du lit mineur ;
3. projection de cette ligne d'eau sur le profil en long des digues. Cette étape est complexe car la projection du niveau d'eau dans le lit actif sur la digue ne peut se faire de façon automatique par projection orthogonale. La présence d'ouvrages et le fait que les digues ne sont pas systématiquement parallèles au lit mineur nécessitent une approche spécifique tronçon par tronçon. De plus, la représentation des écoulements dans un méandre de cours d'eau n'est pas optimale en 1D (basculement de la ligne d'eau transversale entre l'intrados et l'extrados du méandre) ;
4. comparaison des niveaux d'eau avec le profil en long de la crête de digue pour en extraire les hauteurs de lame d'eau surversante ou les hauteurs de revanche restante avant surverse ;
5. selon les lames d'eau obtenues, un hydrogramme de brèche était défini et constituait la condition limite amont du modèle 2D. Cette seconde simulation permettait d'évaluer l'impact de la brèche sur les zones inondables et les lignes d'eau.

Identification des points de faiblesses du système d'endiguement et caractérisation de la surverse avec le modèle 2D global

Dans le modèle 2D global, l'inclusion des digues dans le maillage du modèle fait que l'information du niveau d'eau est

directement raccordée à une digue. De plus, chaque tronçon de digue de 50m a été doté d'une loi de brèche (paramétré conformément au retour d'expérience historique) qui se déclenche automatiquement si une lame d'eau de plus de 20 cm surverse sur ce tronçon. Le modèle est donc autonome en ce qui concerne la formation des brèches.

Ainsi, la caractérisation des surverses est obtenue en suivant les étapes suivantes :

1. définition d'un scénario de crue et le faire tourner avec le modèle 2D ;
2. extraction depuis le modèle 2D, de la ligne d'eau située le long de la digue ;
3. comparaison directe des niveaux d'eau avec l'altimétrie de la crête de digue pour en extraire les hauteurs de lame d'eau surversante [Figure 4 – points bleus foncés] et les zones de faible revanche [Figure 4 – points orange] ;
4. vérification d'un comportement similaire du modèle 1D pour valider a posteriori la condition limite aval.

La gestion des surverses étant le principal objectif de ce modèle global, la fiabilité, la précision et la facilité de traitement de celui-ci sont actuellement appréciées dans l'exploitation des nombreux scénarios de crues qui sont aujourd'hui étudiés.

Perspectives

Deux principales perspectives concernent l'exploitation de ce modèle à échelle globale : l'utilisation opérationnelle du modèle pour simuler les scénarios du projet de fiabilisation de la levée d'Orléans et la question de la durabilité d'un tel programme au regard de l'évolution géomorphologique de la Loire.

Le projet global de fiabilisation de la levée d'Orléans et ses scénarios

La modélisation des scénarios du programme de travaux de confortement lorsque celui-ci sera en phase projet afin de profiter de cet outil pour aider et affiner les prises de décision. Son exploitation selon différents scénarios permettra de bien comprendre le fonctionnement hydraulique des vals de l'Orléanais mais aussi d'assurer une meilleure communication sur les travaux de fiabilisation des levées auprès des nombreux acteurs locaux (citoyens, élus, entreprises...).

La pérennité du dimensionnement du système d'endiguement à horizon 50 ans au regard de l'évolution géomorphologique de la Loire

Cet outil de modélisation 2D permet, à la différence d'une modélisation 1D, de distinguer, en lit mineur, le lit actif (bande active) du lit végétalisé. La finalité de cette étude est de tester le programme de travaux de confortement sur une

configuration de la Loire estimée dans 50 ans. Ce scénario futur a pour but d'étudier la pérennité de ces travaux au regard de l'évolution de deux paramètres [2] :

- l'augmentation de la rugosité du lit à travers le développement de la forêt alluviale et la réduction possible de la pression de gestion exercée sur ce milieu ;
- la réduction de la section d'écoulement du fait de la recharge sédimentaire naturelle du fond du lit de la Loire.

L'étude de la première composante se base sur une analyse diachronique de l'évolution de la végétation dans le lit interdigués. Des hypothèses de développement de la végétation par section de cours d'eau seront proposées par la DREAL CVL et intégrées dans la géométrie du modèle 2D. Les résultats du modèle sur ce volet pourraient notamment servir à évaluer la pertinence des actions de gestion sur la forêt alluviale ligérienne.

Enfin, l'ensemble des gains décrits dans le présent article a conduit la DREAL à construire un outil semblable sur les vals du Blaisois, également concernés par un programme de fiabilisation des levées.

Conclusion

Cet article s'est attaché à réaliser un bilan du développement d'un nouvel outil de modélisation construit à une échelle globale sur une portion de la Loire moyenne (lit mineur et lit majeur incluant les digues).

En s'affranchissant des échanges itératifs habituels entre 1D et 2D sur ce type d'étude, d'autant plus dans le cas d'interdépendance des vals en vis-à-vis, de réels progrès ont été constatés dans la précision des résultats et dans leur exploitation. Ils ont permis une meilleure connaissance du fonctionnement hydraulique d'un système endigué comportant plusieurs zones de stockage/laminage, de levées pouvant surverser et dotées de déversoirs mais aussi d'une géomorphologie complexe de la Loire. Des gains en précision sur la représentation et la description des surverses ont été constatés, tout comme durant la phase d'exploitation de cet outil.

Il est certain qu'un tel outil ne peut convenir, aujourd'hui, à une mission de prévision des crues en raison de sa complexité de manipulation et des temps de calcul trop importants.

Références

- [1] Belin T. (2017). – Reprise du modèle hydraulique de Gien à Orléans - Rapport d'étude. DREAL Centre Val de Loire / DPEC, 27p.
- [2] Braud S. (2016). – Fiabilisation du val d'Orléans - Volet géomorphologique étapes 1 et 2. DREAL Centre Val de Loire / DETL, 25p.
- [3] Cébron F. (2014). - Étude des vals de l'Orléanais - Schéma d'aménagement, (ECRIVALS). BRL ingénierie, 100p.

- [4] Cuvillier L. (2018). – Gestion des surverses des levées des vals de l'Orléanais – Modélisation hydraulique bi-dimensionnelle. CEREMA Normandie Centre / Laboratoire Régional de Blois, 48p.
- [5] Cuvillier L. (2017). – Connaissance et prévention du risque inondation sur le val d'Orléans – Apport de la modélisation hydraulique 2D à une échelle globale. Colloque CFBR-SHF « Hydraulique des barrages et des digues, Chambéry, 29-30 novembre 2017 », 12p.
- [6] Maurin J., Boulay A., Tourment R., Beullac B. (2012). – Étude de dangers de la levée d'Orléans. DREAL Centre Val de Loire / DETL, 244p
- [7] Maurin J, Pasquet. F. (2004). – Les digues de Loire – utilisation du modèle hydraulique Loire moyenne pour le dimensionnement fonctionnel des levées et des ouvrages annexes – exemple de la protection du val d'Orléans. Colloque CFGB/MEDD « Sécurité des digues fluviales et de navigation, Orléans, 25-26 novembre 2004 », 12p
- [8] Patouillard S. (2015). – Projet global de fiabilisation de la levée d'Orléans. DREAL Centre Val de Loire / DETL, 72p