

**Prévision des crues et des inondations en cas de rupture de digue :
Performance de différentes architectures de modèles hydraulique 1D***Flood forecasting in case of dike breach : Performance of different hydraulic
model architectures***Auteurs :** BOUVARD Gabin^{1*}, HANS Pierre-Adrien², BOTTERO Mathieu³** auteur correspondant*¹Service de Prévision des Crues Loire-Allier-Cher-Indre, 5 Avenue Buffon 45000 ORLÉANS, France, gabin.bouvard@developpement-durable.gouv.fr¹Service de Prévision des Crues Loire-Allier-Cher-Indre, 5 Avenue Buffon 45000 ORLÉANS, France, pierre-adrien.hans@developpement-durable.gouv.fr¹Service de Prévision des Crues Loire-Allier-Cher-Indre, 5 Avenue Buffon 45000 ORLÉANS, France, mathieu.bottero@developpement-durable.gouv.fr

Résumé : L’objectif de ce travail est d’évaluer les performances de différentes architectures de modèles 1D (à casiers et en couplage 1D/2D) dans la prévision de débits et de hauteur d’eau dans un val lors d’une rupture de digue. On comparera ces différents modèles à un modèle Télémac2D qui servira de référence, sur une portion de la Loire au niveau d’Ouzouer-sur-Loire (45). Une large part du lit mineur de cette portion est protégée par une digue qui présente plusieurs zones de défaillance probable. Des brèches seront ouvertes dans les modèles au niveau de ces zones pour comparer les hydrogrammes obtenus par les différentes architectures. Les résultats montrent la meilleure représentation des hydrogrammes (en temps de propagation, laminage, débit de pointe et forme de l’hydrogramme) et des aléas d’inondation par les modèles 1D/2D.

Mots-clefs : rupture de digue, prévision des inondations, modélisation 1D et 2D

Abstract : The objective of this work is to evaluate the performance of different architectures of 1D models (with compartments and 1D/2D coupling) in the prediction of flows and water level in a valley during a dyke failure. These different models will be compared to a Telemac2D model which will be used as reference, on a portion of the Loire at the level of Ouzouer-sur-Loire (45). A large part of the minor bed of this portion is protected by a dyke which presents several probable failure zones. Breaches will be opened in the models to compare the hydrographs obtained by the different architectures. The results show the best representation of hydrographs (in term of travel time, lamination, peak flow and hydrograph shape) and flood hazards by the coupled 1D/2D models.

Keywords : dyke breach, flood forecasting, 1D and 2D model

1. INTRODUCTION

Le Service de Prévision des Crues (SPC) Loire-Allier-Cher-Indre réalise des prévisions aux stations hydrométriques de la Loire moyenne, dans le cadre de la vigilance aux crues. La spécificité de ce territoire est la présence de nombreux systèmes d’endiguement qui isolent une partie importante du lit majeur de la Loire. En cas de défaillance, une partie du débit de la Loire s’écoule à travers le val. Cette dérivation peut impacter sensiblement le débit dans le lit de la Loire en aval de la défaillance. À titre d’exemple, le débit transitant par la brèche de Jargeau en 1856 a été estimé à environ 30 % du débit total de la crue (J. Maurin A. B., 2012).

La plupart des stations hydrométriques peuvent être court-circuitées par des vals en cas de défaillance des systèmes d’endiguement. Disposer de modèles hydrauliques à même de représenter correctement ces configurations est donc primordial pour continuer à publier des prévisions cohérentes en cas de défaillance avérée et/ou pressentie. L’objectif de cette étude est de comparer les capacités de modèles 1D à casiers – technologie actuellement utilisée par le SPC – et de modèles à couplage 1D/2D à répondre à ces besoins opérationnels.

2. SECTEUR D’ÉTUDE

Le système d’endiguement du Val d’Ouzouer (Figure 1) a un niveau de protection apparent de l’ordre d’une crue de temps de retour 80 ans¹ soit environ 5 200 m³/s au bec d’Allier et un niveau de sûreté correspondant à celui atteint par la crue vicennale, soit un débit de 3 600 m³/s au bec d’Allier. L’étude de dangers de ce système d’endiguement montre que celui-ci présenterait un risque probable de fonctionnement anormal pour des crues supérieures ou égales à la crue cinquantennale (BRL Ingénierie, 2014). Quatre sites de défaillance ont été identifiés (Figure 1), chaque site étant associé à une cote (et donc un temps de retour) à partir de laquelle la rupture est probable.

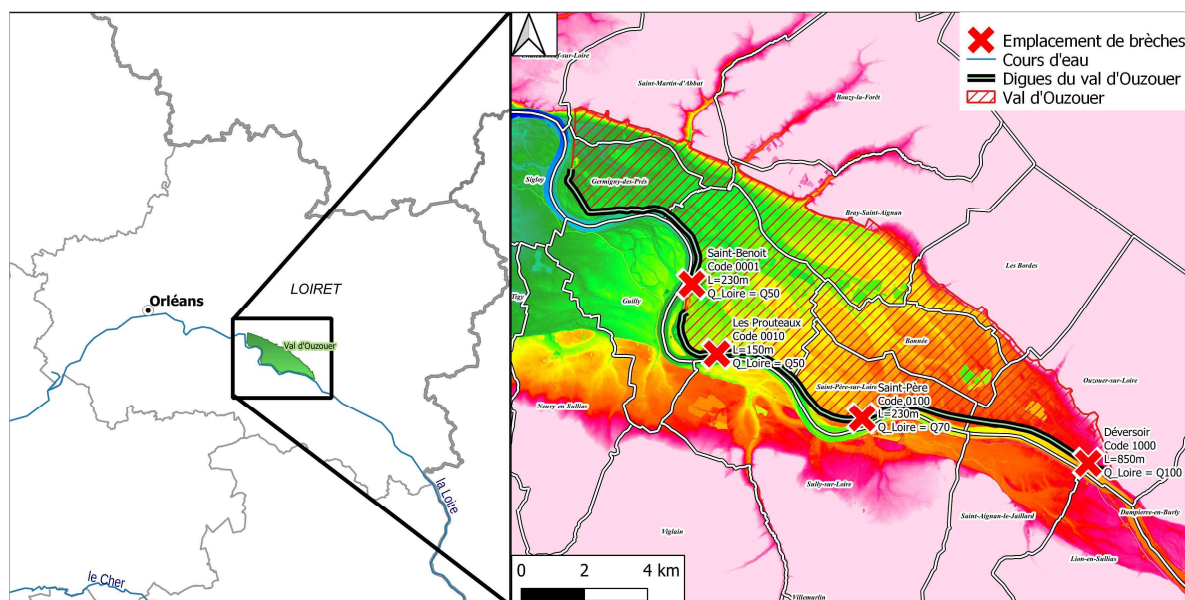


Figure 1: Zone d’étude et emplacements des brèches

¹Temps de retour au sens des études de dangers, et pas au sens des statistiques hydrologiques

3. MÉTHODE

3.1. Modèles hydrauliques

Les caractéristiques des différents modèles hydrauliques utilisées lors de cette étude sont synthétisées dans le Tableau 1.

- **Modèle de référence** : En l’absence de données de calage dans ce val en dehors des inondations du XIX^{ème} siècle, un modèle utilisant le cœur de calcul Télémac 2D constitue la référence. Il a été construit par extraction d’une portion du modèle Telemac2D des vals de l’Orléanais (L. Cuvillier, 2017). Ce modèle est très affiné, comportant 1,1 millions d’éléments triangulaires et 550 000 nœuds, avec une taille de maille variant de 60 m dans les zones de moindre intérêt hydraulique à 3 m dans les chenaux d’écoulements. Les coefficients de Strickler du modèle sont cohérents avec ceux de la littérature et un recoupement avec la base de donnée Corine Land Cover montre que ceux-ci tiennent compte des différentes occupations des sols (Chow, 1959).
- **Modèles étudiés** : Les quatre modèles utilisent le cœur de calcul Hydra. Le lit mineur est identique pour chacun des modèles, ainsi que la représentation des brèches. Ces modèles sont issus du modèle LM10, lui-même issu du modèle hydraulique construit à l’échelle de la Loire moyenne, dans le cadre du Plan Loire Grandeur Nature en 1998 (Jean Maurin, 2004). Les modifications apportées au modèle LM10 sont décrites ci-dessous. Les caractéristiques de chaque représentation sont présentées dans le Tableau 1.
 - Le **modèle SPC** est un modèle hydraulique 1D à casiers. Son emprise commence à la station de Gien pont et se termine à la confluence avec le Loiret, 83 km en aval. Le modèle a été repris en 2017 en intégrant de la donnée bathymétrique de 2015 et en subdivisant les casiers existants.
 - Le **modèle EDD** est un modèle hydraulique 1D à casier. Son emprise commence au Bec d’Allier et se termine à la station de Langeais. Le modèle a été modifié dans le cadre des Études de Dangers de la Loire dans le Loiret en intégrant une discrétisation des échanges Loire/Val (une liaison tous les 150m) et des échanges inter-casiers.
 - Les modèles 1D/2D à mailles larges (dit **modèle 2D Larges**) et à mailles fines (dit **modèle 2D Fins**) ont été créés dans le cadre de cette étude. Les casiers composant le val d’Ouzouer ont été remplacés par des pavés 2D. La représentation des autres vals des modèles, non concernés par l’étude, n’a pas été modifiée.

Tableau 1. Architecture et taille des éléments des modèles étudiés

Nom du modèle	Représentation du val	Surface maille (moyenne)
EDD	casiers	200.10 ⁴ m ²
SPC	casiers	30.10 ⁴ m ²
2D Larges	pavés 2D	10.10 ⁴ m ²
2D Fins	pavés 2D	2,5.10 ⁴ m ²

3.2. Scénarios

Pour chaque brèche, un scénario hydrologique proche du débit de rupture probable est injecté. L’ouverture de la brèche s’effectue dès que la cote de rupture identifiée dans l’étude de dangers est atteinte. Le reste des ouvrages fonctionne normalement. La possibilité de surverse sans rupture est conservée pour chaque scénario sur toute la longueur de la digue. Les différents scénarios ainsi que leurs caractéristiques sont présentées dans le Tableau 2.

Tableau 2. Scénarios modélisés présentant les caractéristiques de la brèche étudiée et l’hydrologie

Scénario ²	Localisation de la brèche	Caractéristiques de la brèche			Hydrologie	
		Cote de seuil (mNGF)	Cote de rupture (mNGF)	Largeur	Temps de retour	Débit de la Loire à Gien ³ (m³/s)
1000-Q170	Déversoir	119,75	120,38	850 m	170 ans	5500
0100-Q70	St-Père	114,94	116,88	230 m	70 ans	4300
0010-Q50	Prouteaux	112,5	113,19	150 m	50 ans	3800
0010-Q170	Prouteaux (+ déversoir)	112,5	113,19	150 m	170 ans	5500
0001-Q50	St-Benoît	109,9	111,7	230 m	50 ans	3800

3.3. Critères de comparaison

L’effet de l’ouverture du val dans un modèle peut être schématiquement décrite par trois fonctions, illustrées dans le diagramme fonctionnel de la Figure 2. Le fonctionnement du lit mineur de la Loire est identique d’un modèle à l’autre. La comparaison des sorties de modèles sans activer les brèches permet de vérifier qu’aucun déphasage du temps de propagation n’est observé, et le laminage induit par le lit mineur de la Loire est le même pour tous les modèles. Les deux fonctions qui nous intéressent donc dans cette étude sont :

- ② La fonction de répartition des débits entre la brèche et le lit mineur de la Loire.
- ③ La transformation de l’hydrogramme par l’effet du val, nommé Fonction de transfert du val

² Le nom d’un scénario est composé d’un préfixe indiquant la brèche étudiée (ex : 0010 indique que la 3eme brèche en partant de l’amont, celle des Prouteaux, est active) et du temps de retour

³ Débit total, comprenant le flux dans le lit mineur de la Loire et le flux à travers le déversoir de Saint-Martin-sur-Ocre

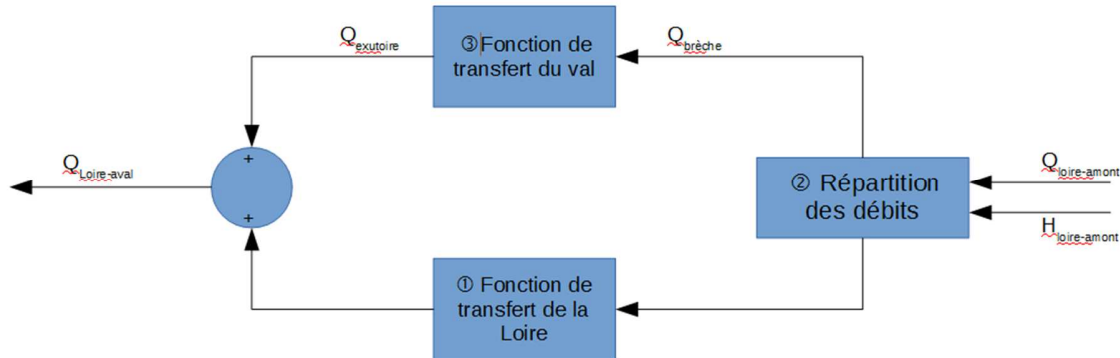


Figure 2 : Diagramme fonctionnel d'ouverture d'un val

Pour comparer ces deux fonctions, nous comparerons les hydrogrammes en brèche ($Q_{brèche}$ sur la Figure 2) et en sortie de val ($Q_{exutoire}$), en prenant comme référence le modèle Télémac à l'aide du critère normalisé de Nash-Sutcliff (NNSE) :

$$NNSE = \frac{1}{2 - NSE}, \text{ et } NSE = 1 - \frac{\sum_t (Q_{télémac}^t - Q_{modèle}^t)^2}{\sum_t (Q_{télémac}^t - Q_{télémac}^t)^2} \quad (1)$$

Le critère normalisé de Nash-Sutcliff compare ici l'erreur quadratique moyenne entre le modèle étudié et le modèle Télémac à la variance du modèle Télémac. Plus la valeur est proche de 1, meilleure est l'adéquation du modèle étudié au modèle Télémac. Un NNSE de 0.75 est considéré comme bon, 0.83 est très bon. À l'inverse, un NNSE de 0.5 indique que le modèle a la même capacité prédictive que la moyenne de l'hydrogramme de référence et est considéré comme une performance médiocre.

La capacité de chaque modèle à produire une cartographie d'aléa pertinente sera aussi analysée, en comparant les variations de surfaces en eau. La capacité d'un modèle à représenter une surface en eau sera basé sur le calcul du score S1 (S. Teweles, 1954):

$$S_1 = 100 \frac{\sum_{i-\text{ème couple de pts adjacents}} |\Delta Z_{i,hydra} - \Delta Z_{i,T2D}|}{\sum |\max(\Delta Z_{i,hydra}, \Delta Z_{i,T2D})|} \quad (2)$$

Le calcul du Score S1 implique de disposer d'un ensemble de couples de points. Les points utilisés ici sont les centroïdes des pavés 2D Fins, et chaque liaison pavé/pavé définit un couple de point. Les hauteurs d'eau obtenues par le modèle étudié et par le modèle Télémac sont échantillonnées sur chacun de ces points avant d'être comparé (Figure 3).

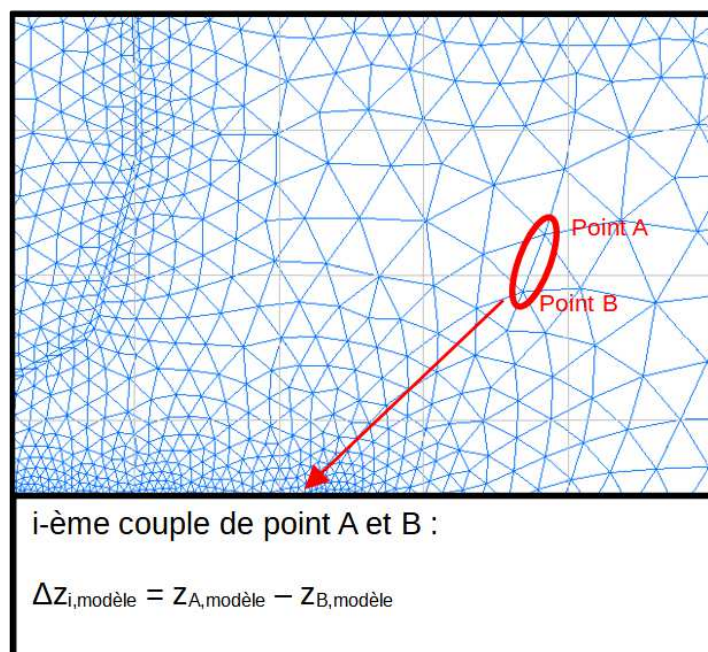


Figure 3 : échantillonnage des hauteurs d'eau d'un modèle suivant un maillage

L'utilisation du maillage d'un modèle donné pour le calcul de S1 ne semble pas affecter significativement la valeur du score, et ne semble pas induire de biais en faveur du modèle utilisé.

4. RÉSULTATS

4.1. Répartition des débits et fonction de transfert du val

Répartition des débits Le calcul du score de ce critère est basé sur le calcul du critère normalisé de Nash entre l'hydrogramme en brèche du modèle étudié et l'hydrogramme en brèche de référence. Les modèles à casiers représentent assez mal la répartition des débits. Suivant les cas, les modèles à casiers ont des résultats très variables, pouvant être très performants comme médiocres (colonnes EDD et SPC du Tableau 4). Les performances des modèles 1D/2D sont moins variables, et globalement bonnes (colonnes 2D Larges et 2D Fins du Tableau 4).

Tableau 4. Comparaison des NNSE des hydrogrammes en brèche

		EDD	SPC	2D Larges	2D Fins
NASH Brèche	XX1000-Q170	81,74 %	82,48 %	77,27 %	82,31 %
	XX0100-Q170	23,31 %	23,57 %	85,72 %	87,78 %
	XX0010-Q50	91,23 %	86,76 %	76,63 %	75,37 %
	XX0001-Q50	7,29 %	5,89 %	81,50 %	85,45 %
	moyenne	50,89 %	49,68 %	80,28 %	82,73 %

Les modèles EDD et SPC ont des résultats comparables en termes de débit de pointe en brèche, avec des débits de pointes très semblables de même que les deux modèles 1D/2D obtiennent des résultats très

similaires. Ainsi, le débit de pointe semble très dépendant du type d’élément (pavés 2D ou casiers) qui constituent le val. La taille de ces éléments ne semble pas jouer directement sur le débit de pointe, du moins dans le cas des casiers (la différence de taille des pavés 2D n’est pas très différente sur les frontières des 2 modèles 1D/2D)

La forme des hydrogrammes apparaît généralement bien reproduite par les modèles 1D/2D dans les quatre configurations testées. Les comportements complexes qui peuvent se produire en brèches sont bien représentés par ces modèles (sursaut de débit lors de l’ouverture, reflux du débit en décro, etc.). Les hydrogrammes obtenus par les modèles casiers sont semblables et plus simplistes.

La répartition des débits entre la brèche et le lit endigué s’approche davantage de la référence avec les modèles 1D/2D qu’avec les modèles 1D à casiers. Les débits calculés dans les brèches sont très similaires pour une même architecture de modèle (1D à casiers et 1D/2D) : la taille des éléments du val (casiers et pavés 2D) ne semble donc pas déterminante sur le débit de pointe.

Fonction de transfert du val Le calcul du score de ce critère est basé sur le calcul du critère normalisé de Nash entre l’hydrogramme en sortie du val du modèle étudié et l’hydrogramme en sortie du val de référence. Les performances des modèles à casiers (colonnes EDD et SPC du tableau 5) sont moyennes à médiocres tandis que celles des modèles 1D/2D (colonnes 2D Grandes et 2D Fines du tableau 5) sont généralement bonnes.

Tableau 5. Comparaison des NNSE en sortie du val

		EDD	SPC	2D Grandes	2D Fines
NASH Sortie	XX1000-Q170	86,90 %	78,68 %	51,94 %	76,22 %
	XX0100-Q170	22,87 %	30,34 %	94,19 %	94,22 %
	XX0010-Q50	73,98 %	70,53 %	73,66 %	59,54 %
	XX0001-Q50	11,30 %	11,16 %	75,12 %	78,38 %
	moyenne	48,76 %	47,68 %	73,73 %	77,09 %

Synthèse Les modèles 1D/2D apparaissent globalement plus performants dans les configurations étudiées que les modèles 1D à casiers.

Un seul scénario de défaillances multiples a été testé. Les répartitions des débits entre ces brèches et le lit mineur sont médiocres dans cette configuration, quelle que soit l’architecture du modèle (1D à casiers ou 1D/2D). Ce résultat pourrait être lié à la présence d’un déversoir parmi les sites de défaillance testés, puisque l’arasement ne s’y fait pas jusqu’au sol contrairement à une brèche classique. La somme des débits dérivés dans les deux entrées d’eau est plus proche de la référence avec les modèles 1D à casiers qu’avec les modèles 1D/2D.

4.2 Représentation de l’aléa

Un des principaux avantages des modèles hydrauliques sur les modèles à fonctions de transfert est la possibilité de rapidement générer des fichiers exploitables pour réaliser des cartographies d’aléas. Dans le cadre opérationnel, cette capacité pourrait être mise à contribution pour visualiser et prévoir l’évolution de l’inondation dans un val suite à une brèche. Les emprises inondées obtenues avec les différents modèles sont présentées sur la Figure 4.

Tableau 6. Comparaison des score S1 de chaque modèle pour chaque scénario. Plus le score S1 est grand, plus l'aléa modélisé s'éloigne de l'aléa de référence (erreur cumulative)

		EDD	SPC	2D Larges	2D Fins
Score S1	XX1000-Q170	47	40	34	29
	XX0100-Q70	66	62	49	44
	XX0010-Q50	69	63	46	43
	XX0001-Q50	77	71	49	45
	Moyenne	65	59	45	40

Le Tableau 6 montre que la représentation de l'aléa dans le val est nettement améliorée par l'utilisation de pavés 2D, et plus le nombre de pavés utilisé est grand, meilleure est cette représentation. La figure ci-dessous présente différences d'emprises entre le modèle testé et le modèle Télémac ainsi que les scores S1 (erreur cumulative) de chaque modèle en comparant les hauteurs d'eau modélisées. Les modèles à couplages 1D/2D ont un score nettement plus bas, ils s'écartent donc moins de la prévision de Telemac2D que les modèles à casiers. Il s'agit vraisemblablement de la plus grande plus-value des modèles 1D/2D par rapport aux modèles à casiers.

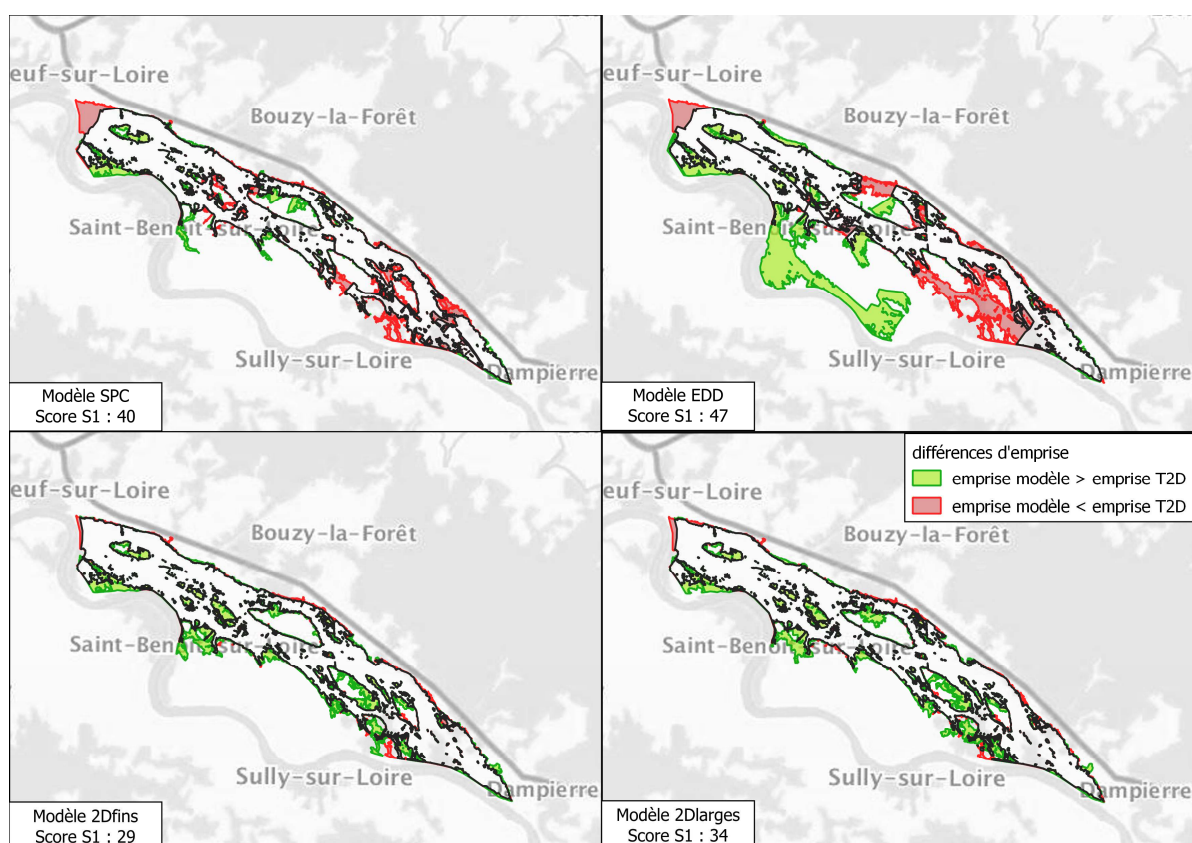


Figure 4 Différences d'emprises entre les modèles et score S1 sur les hauteurs d'eau modélisées, cas XX1000-Q170

5. LIMITES ET DISCUSSIONS

Tous les modèles utilisés sont des modèles pour lesquels la représentation de la brèche et de la surverse sont simplifiées. Après analyse, les débits modélisés par Télémac se rapprochent des formulations de seuil latéral type Coleman et Smith, alors que les débits modélisés par Hydra se rapprochent plus des formulations de seuils fins dénoyés en travers. Un modèle hydro-sédimentaire pourrait venir confirmer quelle représentation est la meilleure.

Comme évoqué plus haut, la définition de la fonction de transfert est relativement sommaire. Son évaluation basée sur le NNSE de la sortie est biaisée : en effet, les NNSE de sortie sont fortement corrélés aux NNSE en brèche : la majorité de la variance en sortie est donc expliquée par la variance d'entrée. Une approche plus poussée aurait pu être de « caler » des fonctions de transfert type SCS/MOHYS (répartition par convolution d'hydrogrammes unitaires). La comparaison de fonctions de transfert plutôt que d'hydrogrammes aurait peut-être permis de tirer des conclusions lorsque les hydrogrammes en brèche sont dissemblables, voire même dans les situations de défaillances multiples. Cette approche n'a pas été retenue par gain de temps, et malgré sa simplicité, notre approche a permis d'observer des tendances de comportement entre les modèles.

Les temps de calculs très importants – plusieurs jours – nécessaires aux modélisations Télémac ont imposé un nombre limité de scénarios de défaillances. Malgré ce petit nombre de scénarios testés, nous avons pu mettre en évidence des tendances de comportements en fonction de la typologie de modèle.

6. CONCLUSION

D'une manière générale, les performances des modèles 1D/2D apparaissent légèrement supérieures à celles des modèles à casiers. Toutefois, le gain apporté par l'utilisation des modèles 1D/2D pour la grandeur des débits calculés en brèche avec les deux architectures sont proches.

Au regard des fortes incertitudes qui entourent le mécanisme d'ouverture des brèches (Paquier, 2019), l'impact de l'architecture du modèle hydraulique sur la prévision en aval d'un site de défaillance ne semble pas déterminant. Dans ces gammes de débits, l'incertitude de débit associée à une prévision (J. Viatgé, 2019) est supérieure à la centaine de mètre cube par secondes, et l'incertitude sur le moment de la pointe, notamment en Loire Moyenne, est supérieure à la dizaine d'heure. Comme la Figure 5 le montre, même en comparant Télémac au moins bon modèle (modèle EDD) sur le scénario le plus défavorable (xx0010-Q50), les écarts de débit de pointe et d'instant d'arrivée du pic sont compatibles avec l'opérationnel, car toujours dans l'intervalle d'incertitude de la prévision. Si une station venait à être court-circuitée par une brèche sur un val de taille comparable, la prévision à la station suivante est toujours possible, et ce avec une relativement bonne précision.

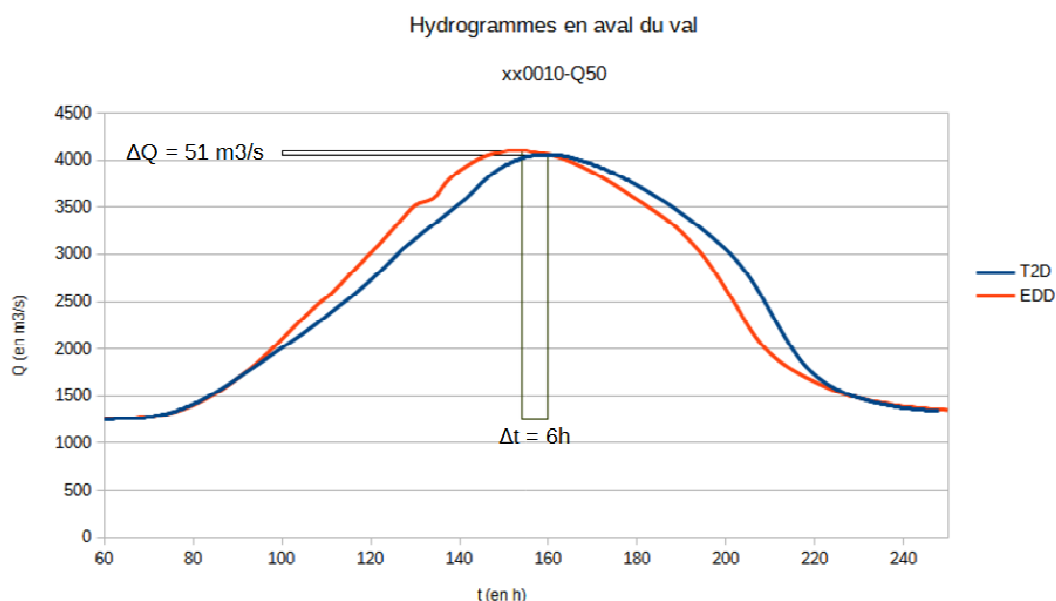


Figure 5. Comparaison des hydrogrammes issus des modèles T2D et EDD quelques centaines de mètre à l'aval de la confluence entre la Loire et la Bonnée

Pour répondre aux objectifs de prévisions des débits aux stations hydrométriques de la Loire moyenne et de prévision de l'aléa en cas de défaillance du système d'endiguement, il ne semble donc pas indispensable d'utiliser un couplage 1D/2D et l'utilisation des modèles 1D à casiers actuels ressort suffisant (A. Besnard, 2011). Par ailleurs, les temps d'exécution constatés avec les modèles 1D/2D sont déjà sensiblement plus importants avec un unique val modélisé en 2D (environ 1h pour les modèles 1D/2D, 15 minutes pour les modèles à casiers), ce qui laisse craindre des temps d'exécution de plusieurs heures incompatibles pour un usage opérationnel avec la représentation de la plupart des vals de cette manière. L'utilisation de ces modèles 1D à casiers en cas de défaillance d'un ouvrage devra être encadrée par une procédure opérationnelle à définir.

7 RÉFÉRENCES

- A. Besnard, N. G. (2011). Comparaison de modèles 1D à casiers et 2D pour la modélisation hydraulique d'une plaine d'inondation - Cas de la Garonne entre Tonneins et La Réole. *La Houille Blanche*(3), pp. 42-47. doi:10.1051/lhb/2011031
- BRL Ingénierie. (2014). *Étude de dangers du système de protection du val d'Ouzouer-sur-Loire contre les inondations de la Loire*.
- Chow, V. (1959). *Open-channel hydraulics*. New-York: McGraw-Hill Books Co.
- J. Maurin, A. B. (2012). Les Brèches des levées de la Loire : brèche de Jargeau. *Congrès SHF Événements extrêmes fluviaux et maritimes* (p. 8). Paris: hal-00731293.
- J. Maurin, A. B. (2013). Études de dangers des digues de classe A de la Loire et de ses affluents - modèle d'aléas de rupture. *Digues maritimes et fluviales de protection contre les submersions - 2ème colloque national* (pp. 209-216). Aix-en-Provence: hal-01122579.
- J. Viatgé, L. B.-H. (2019, 2). Vers une production en temps réel d'intervalles prédictifs associés aux prévisions de crue dans Vigicrue en France. *La Houille Blanche*, pp. 63-71.
- Jean Maurin, F. P. (2004). Les digues de Loire : utilisation du modèle hydraulique Loire Moyenne pour le dimensionnement fonctionnel des levées et des ouvrages annexes. *Colloque Technique CFGB et MEDD, sécurité des digues fluviales et de navigation*, (pp. 227-238). Paris.
- L. Cuvillier, A. B. (2017). Connaissance et prévention du risque inondation sur les vals d'Orléans - Apport de la modélisation hydraulique 2D à une échelle globale. *Colloque CFBR-SHF - Hydraulique des barrages et des digues*. Chambéry.
- LeBarbu, E. (2011). *Étude de dangers - Incertitudes du modèle hydraulique 1D*.
- Paquier, A. (2019). Modélisations du développement d'une brèche par surverse et du transport sédimentaire associé. *3ème colloques sur les Digues Maritimes et Fluviales de Protection contre les Inondations* (p. 8). Aix-en-Provence: IRSTEA. doi:hal-02609869
- S. Teweles, H. W. (1954). Verification of pronostic charts. *Bulletin of American Meteorological Society*, 35(10), pp. 455-463.