

Modélisation hydraulique détaillée d'inondations extrêmes sur un tronçon transnational de la Meuse

Benjamin DEWALS, Pierre ARCHAMBEAU, Sébastien ERPICUM, Michel PIROTON

Université de Liège (ULg) – Hydraulics in Environmental and Civil Engineering (HECE) – Chemin des Chevreuils, 1 Bât B52/3, 4000 – Liège, Belgique – b.dewals@ulg.ac.be, hece@ulg.ac.be

RÉSUMÉ. – Des crues extrêmes de la Meuse ont été simulées au moyen d'un modèle hydraulique 2D détaillé et instationnaire (onde dynamique complète). Ces modélisations s'inscrivent dans le cadre d'un programme coordonné de modélisation transnationale de la Meuse. La zone d'étude considérée ici couvre une partie du cours de la Meuse en Belgique et les résultats générés serviront de condition limite amont à un second modèle hydraulique simulant les mêmes scénarios de crues dans la Meuse aux Pays-Bas. Lors de l'exécution des simulations présentées ici pour la partie belge de la Meuse, des données à haute résolution et haute précision ont été utilisées pour représenter le lit mineur et les lits majeurs fortement urbanisés du fleuve. Le fonctionnement des barrages mobiles a été implémenté dans le modèle. Les scénarios de crue considérés comprennent la crue centennale actuelle (Q_{100}), ainsi que deux inondations plus extrêmes: $Q_{100} + 15\%$ et $Q_{100} + 30\%$. Ces valeurs correspondent à des périodes de retour de l'ordre de 300 et 1000 ans dans le climat actuel, mais, selon un scénario de changement climatique transnational pour le bassin de la Meuse, ils correspondent également à des estimations de la crue centennale en 2050 et 2100. Les simulations ont montré un amortissement très limité de l'onde de crue dans la zone d'étude, ne dépassant pas de l'ordre de 1 % du débit de pointe pour Q_{100} et $Q_{100} + 15\%$, et pouvant atteindre environ 3 % pour $Q_{100} + 30\%$. Par rapport aux niveaux centennaux actuels, l'accroissement des niveaux d'eau pour $Q_{100} + 15\%$ et $Q_{100} + 30\%$ valent, respectivement, 0,5 à 0,9 m et 1,0 à 1,8 m. Des comparaisons avec les résultats de simulations stationnaires antérieures révèlent des écarts n'excédant pas 5 cm pour Q_{100} et $Q_{100} + 15\%$, et atteignant un maximum d'environ 30 cm pour $Q_{100} + 30\%$. Par conséquent, du point de vue d'un éventuel laminage de l'onde de crue et de la prédiction des niveaux d'eau, l'étude conclut que l'exécution du modèle hydraulique en mode stationnaire est valable, bien que certaines différences locales apparaissent en termes d'étendue d'inondation. Le modèle 2D instationnaire mis au point constitue également un outil privilégié disponible pour concevoir et évaluer des mesures de protection pour les zones inondables, dont la ville de Liège.

Mots-clés : Modélisation hydraulique détaillée, Ouvrages de gestion, Gestion transnationale de l'eau

Detailed hydraulic modeling of extreme floods along a transnational section of the river Meuse

ABSTRACT. – Extreme floods of the river Meuse were simulated based on a detailed 2D unsteady hydraulic model. As part of a coordinated transnational modeling program, the study area considered here extends from Ampsin (Belgium) to the Belgian-Dutch border. The results of the present simulations are passed as upstream boundary condition to a second hydraulic model simulating the same flood scenarios in the Meuse in the Netherlands. In the simulations discussed here for the Belgian part of the Meuse, high accuracy and high resolution data were used to represent the main riverbed and the urbanized floodplains. The operation of all influencing mobile dams was represented in the model. The considered flood scenarios include the 100-year flood in the present situation (Q_{100}), as well as two more extreme floods: $Q_{100} + 15\%$ and $Q_{100} + 30\%$. These values correspond to return periods of the order of, respectively 300 and 1000 years in the present climate; but, according to a transnational climate change scenario in the Meuse basin, they may also be considered as estimates of the 100-year flood in 2050 and 2100. The computations have shown a very limited damping of the flood wave in the study area, not exceeding approximately 1 % of the peak discharge for Q_{100} and $Q_{100} + 15\%$, and reaching about 3 % for $Q_{100} + 30\%$. Compared to Q_{100} , increases in the flood levels for $Q_{100} + 15\%$ and $Q_{100} + 30\%$ are, respectively, in the ranges 0.5-0.9 m and 1.0-1.8 m. Comparisons with the results from previous steady simulations revealed discrepancies not exceeding 5 cm for Q_{100} and $Q_{100} + 15\%$, and reaching a maximum of approximately 30 cm for $Q_{100} + 30\%$. Hence, from the perspective of the variation in peak discharge and flood levels, the study concludes that running the hydraulic model in steady mode is reasonable; although some differences occur in terms of inundation extents. The 2D unsteady model constitutes also a tool of primary interest, which is readily available to design and evaluate protection measures for flood-prone areas such as in the city of Liege.

Key-words: Detailed hydraulic modeling, Flow regulation structures, Transnational water management

I. INTRODUCTION

Le bassin hydrographique de la Meuse compte environ 30.000 km² et s'étend sur cinq pays : France, Belgique, Pays-Bas, Allemagne et, pour une très petite partie du bassin versant, le Luxembourg. En Belgique, cinq grands barrages sont implantés dans le sous-bassin de l'Ourthe et de ses affluents (Warche-Amblève et Vesdre). L'Ourthe se jette dans la Meuse en rive droite à Liège (Belgique) et représente le principal affluent de la Meuse. La partie allemande du bassin versant correspond essentiellement aux sous-bassins d'autres affluents en rive droite, dont celui de la Rur qui est aussi partiellement régulé par un complexe de barrages.

Tandis que le cours supérieur de la Meuse est caractérisé par de larges plaines inondables, le trajet du fleuve en Région wallonne (Belgique) correspond à la traversée du massif des Ardennes, avec des vallées relativement encaissées, et à une succession de quinze biefs régulés par des barrages mobiles. Au-delà de la frontière belgo-néerlandaise, la vallée de la Meuse adopte une toute autre morphologie, puisque la pente longitudinale diminue d'un facteur quatre environ (en aval de Roermond, au Pays-Bas) et l'étendue des plaines inondables s'accroît substantiellement.

L'étude présentée ici est focalisée sur un tronçon de 100 km dans la partie centrale du cours de la Meuse, entre Ampsin (Belgique) et Maaseik, le long de la « Meuse mitoyenne » qui marque la frontière entre la Belgique et les Pays-Bas. Les analyses effectuées permettent de caractériser l'aléa d'inondation pour des événements plus extrêmes que la crue centennale actuelle. Ceux-ci peuvent néanmoins correspondre à une crue centennale estimée à un horizon temporel inférieur à un siècle en tenant compte de projections de changements climatiques.

Ces travaux s'inscrivent dans le cadre de l'élaboration d'une véritable gestion transnationale du bassin versant, notamment en matière d'extrêmes hydrologiques. Ils font partie du projet AMICE (www.amic-project.eu), qui vise à élaborer une stratégie transnationale d'adaptation du bassin de la Meuse aux impacts hydrologiques du changement climatique. Dans ce cadre, une modélisation du risque associé aux inondations a été mise en œuvre, incluant des composantes hydrologiques, hydrauliques et économiques.

Nous détaillons ici uniquement la modélisation de l'aléa d'inondation par le biais de simulations hydrauliques entre Ampsin et le barrage de Lixhe, situé à la frontière entre la Belgique et les Pays-Bas. Il s'agit d'un tronçon d'environ 50 km, fortement anthropisé et constitué de trois biefs chacun régulé par un barrage mobile. La zone d'étude traverse notamment le centre de Liège (environ 200.000 habitants directement concernés) et comporte des zones inondables fortement urbanisées, parmi lesquelles d'importantes zones d'activités économiques et industrielles (en amont de Liège).

II. MODÈLES, DONNÉES ET SCÉNARIOS

Afin de tirer parti de l'expertise considérable d'ores et déjà existante en Belgique (Région wallonne) et aux Pays-Bas en matière de modélisation d'écoulements d'inondations, l'élaboration d'un nouveau modèle hydraulique commun n'a pas été privilégiée ; mais la modélisation hydraulique transnationale a été réalisée par combinaison de modèles hydrauliques existants, le couplage étant assuré par l'échange de conditions limites à la frontière. Les deux modèles utilisés sont WOLF, pour la partie belge, et WAQUA, pour la partie néerlandaise. Ils présentent des caractéristiques très semblables,

puisqu'il s'agit tous les deux de modèles instationnaires et totalement bidimensionnels (lits mineur et majeur). La suite de cette communication est focalisée sur la modélisation et les résultats concernant la partie belge du tronçon de Meuse considéré, entre les barrages mobiles d'Ampsin et de Lixhe.

II.1. Modèle

Le modèle académique WOLF 2D est développé par le groupe de recherches *Hydraulics in Environmental and Civil Engineering* (HECE) à l'Université de Liège depuis environ 15 ans. Il constitue une composante du système de modélisation WOLF, incluant également des modules de simulation hydrologique [Dewals *et al.*, 2012b, Paulus *et al.*, 2012], de modélisation unidimensionnelle de réseaux hydrographiques [Khuat Duy *et al.*, 2010, Kerger *et al.*, 2011b] ou sous pression [Kerger *et al.*, 2011a, Kerger *et al.*, 2011c, Kerger *et al.*, 2012], ainsi qu'un module hydro-sédimentaire [Rulot *et al.*, 2012].

Le modèle hydraulique WOLF 2D résout la formulation conservative et complète (onde dynamique) des équations des eaux peu profondes. Le schéma numérique repose sur une discrétisation de type volumes finis, avec un décentrement original pour l'évaluation des flux. Les détails du schéma numérique ont été présentés par Dewals *et al.* [2008] et Erpicum *et al.* [2010a]. Le modèle exploite des maillages cartésiens de type multi-blocs, permettant d'offrir une flexibilité suffisante pour la représentation de géométries complexes, sans pénaliser l'efficience du calcul [Erpicum *et al.*, 2010b]. L'occurrence de bancs couvrants et découvrants est traitée numériquement, tout en maintenant la conservation des inconnues à la précision machine.

Le modèle a été largement utilisé et validé pour la détermination détaillée de zones inondables [Ernst *et al.*, 2010, Erpicum *et al.*, 2010b, Beckers *et al.* 2013], mais également pour la simulation de la propagation d'intumescences induites par la rupture de digues et de barrages [Roger *et al.*, 2009, Erpicum *et al.*, 2010a, Dewals *et al.*, 2011, Stilmant *et al.*, 2013] et d'autres écoulements turbulents complexes, avec prise en compte d'équations additionnelles [Dewals *et al.*, 2006, Dewals *et al.*, 2008, Erpicum *et al.*, 2009, Dufresne *et al.*, 2011].

II.2. Données

Des données de type altimétrie laser sont utilisées pour représenter la topographie des plaines inondables, tandis que la bathymétrie est obtenue à partir de mesures sonar. Ces deux ensembles de données, acquis par le Service Public de Wallonie (SPW), offrent une précision verticale de l'ordre de 15 cm et sont disponibles à une résolution spatiale d'un point par m². Le modèle numérique de terrain généré par combinaison de ces données topographiques et bathymétriques a été validé et enrichi par de nombreuses mesures prises *in situ*.

Les modélisations détaillées dans cette communication couvrent trois biefs, numérotés de 1 à 3 et délimités par les barrages mobiles d'Ampsin, Ivoz-Ramet, Monsin et Lixhe (Figure 1). La résolution du maillage de simulation est de 5 m × 5 m, ce qui conduit à plusieurs centaines de milliers de mailles potentielles de calcul.

Chaque modélisation hydraulique est exécutée sur base d'un hydrogramme synthétique, fourni en condition limite en amont de la simulation (Ampsin, bief n°1) ainsi qu'à la confluence entre l'Ourthe et la Meuse dans le bief n°2 (Figure 1b). Un prélèvement constant (35 m³/s) est pris

en compte dans le canal Albert, dont l'embranchement se situe en rive gauche à l'extrémité aval du bief n°2. Le débit sortant des biefs n°1 et 2 sont injectés, respectivement, en amont des biefs n°2 et 3. L'hydrogramme des débits sortant du bief n°3 sert de donnée d'entrée pour les modélisations effectuées sur le tronçon néerlandais.

La condition limite aval pour chacun des biefs est déterminée sur base des caractéristiques des barrages mobiles. Dans la gamme de débits pour lesquels un barrage sait réguler son niveau amont, la cote de consigne est imposée en aval des simulations. Afin de tenir compte d'un temps d'adaptation (mancœuvre des vannes), la cote de consigne n'est pas déterminée simplement sur base du débit instantané calculé au droit du barrage, mais une équation différentielle du premier ordre est résolue de sorte qu'un certain retard puisse être reproduit dans le modèle lors de phases instationnaires :

$$\frac{dz_j}{dt} = -\frac{z_j - z_{cj}}{T_j}, \quad (1)$$

z_j désigne la cote prescrite en condition limite aval du bief à l'amont du barrage j , z_{cj} la cote de consigne associée au débit instantané passant par ce barrage et T_j un temps caractéristique, estimé ici à 25 min.

II.3. Scénarios

Trois scénarios de crues ont été simulés. Conformément aux exigences de la Directive «inondation» (2007/60/EC), ils correspondent non seulement à la crue centennale (débit de pointe = Q_{100}), mais également à des événements plus extrêmes, à savoir des crues dont les débits de pointe valent respectivement $Q_{100} + 15\%$ et $Q_{100} + 30\%$. Les périodes de retour de ces deux types de crues valent approximativement 300 ans et 1000 ans dans la situation actuelle. Néanmoins, sur base de scénarios de changement climatique faisant l'objet d'un consensus à l'échelle du bassin versant de la Meuse, les valeurs $Q_{100} + 15\%$ et $Q_{100} + 30\%$ peuvent également être interprétées comme des estimations de la crue centennale aux horizons temporels 2021-2050 et 2071-2100 [Dewals *et al.*, 2013]. Il s'agit là d'un scénario climatique « humide », c.à.d. relativement défavorable du point de vue de l'intensité des crues ; tandis que le scénario homologue « sec » suggère un maintien au niveau actuel, voire une diminution, des débits de pointe des crues.

En effet, afin de caractériser l'évolution des débits de crue dans le bassin de la Meuse au cours du XXI^e siècle, le maximum annuel des débits horaires a été retenu comme variable hydrologique représentative [Dewals *et al.*, 2013]. Différentes périodes de retour ont ensuite été considérées, entre 2 et 100 ans (voire 250 et 1250 ans pour la partie inférieure du bassin) ; mais les analyses ont été principalement concentrées sur la crue centennale. Par modélisations hydrologiques, les débits de crue ont été calculés pour les deux horizons temporels considérés (2021-2050 et 2071-2100), et ce sur base de scénarios climatiques humide et sec. Un facteur de perturbation a été défini comme le rapport entre la valeur simulée du débit pour un scénario donné et la valeur simulée dans la situation actuelle. Un facteur de perturbation supérieur à l'unité correspond donc à une augmentation du débit de crue et vice-versa. Le signe de la variation du débit maximum obtenu est logiquement homogène dans tout le bassin: une augmentation (diminution) des débits de crue est obtenue pour le scénario humide (sec). L'ampleur du changement est plus importante pour la fin du siècle.

La forme de l'hydrogramme d'entrée pour la crue dont le débit de pointe vaut Q_{100} a été déterminée par une procédure mise au point par le groupe de recherches HECE et présentée en détail par Dewals *et al.* [2012a]. L'hydrogramme synthétique généré est mono-fréquence et sa construction repose sur l'analyse de séries temporelles de débits horaires mesurés de 1986 à 2010. Une remarquable adéquation est obtenue entre cet hydrogramme synthétique et l'hydrogramme mesuré dans la Meuse au cours de la crue de 1993 [Dewals *et al.*, 2012a], dont la période de retour était proche de 100 ans.

La même procédure a été appliquée pour l'hydrogramme injecté à Ampsin, en amont du tronçon de Meuse, ainsi que dans l'Ourthe. Le phasage entre les hydrogrammes injectés dans la Meuse et dans l'Ourthe a été fixé de sorte que les débits de pointe soient concomitants à la confluence. Cette hypothèse est corroborée par la majorité des mesures effectuées lors de crues antérieures, notamment en décembre 1993, février 2002 et janvier 2003, tandis qu'en janvier 1995, les hydrogrammes mesurés présentaient des pics multiples et l'interprétation s'avère dès lors plus délicate.

Pour les deux scénarios plus extrêmes que la crue centennale, une simple mise à l'échelle des débits a été appliquée à l'hydrogramme synthétique de période de retour 100 ans (Figure 2). A nouveau, cette opération a été appliquée de la même manière pour les apports dans la Meuse et dans l'Ourthe.

III. RÉSULTATS

III.1. Hydrogrammes

La Figure 2 fournit les hydrogrammes calculés au Val Benoît (amont de la confluence Meuse-Ourthe, voir la localisation à la Figure 1b) pour les trois scénarios de crues simulés. L'évolution des hydrogrammes entre la limite amont du modèle et le Val Benoît diffère significativement selon le scénario considéré. Dans les deux premiers cas (Q_{100} et $Q_{100} + 15\%$), la diminution du débit de pointe au cours de la propagation s'élève, respectivement, à 12 et 17 m³/s, soit dans les deux cas environ 0,5 % du débit de pointe à l'entrée. A contrario, l'amortissement de l'hydrogramme correspondant à $Q_{100} + 30\%$ s'avère nettement plus substantielle, avec une diminution de débit d'environ 80 m³/s.

Cette atténuation correspond à plus de 2,5 % du débit de pointe en amont, soit un amortissement relatif cinq fois plus élevé que pour les scénarios Q_{100} et $Q_{100} + 15\%$. Cette différence s'explique bien entendu par l'ampleur des débordements, qui conduisent dans le cas de la crue $Q_{100} + 30\%$ à un stockage en lit majeur de l'ordre de 8×10^6 m³, tandis que, pour les deux autres scénarios, ce volume reste inférieur à 1.5×10^6 m³. Des résultats comparables ont été obtenus pour les hydrogrammes plus en aval, avec des étiendues d'inondation particulièrement limitées le long du bief n°3. Quoi qu'il en soit, l'amortissement des hydrogrammes demeure globalement limité, ce qui cadre parfaitement avec le caractère relativement encaissé de la vallée de la Meuse dans sa partie centrale.

III.2. Niveaux de crue

La sensibilité des niveaux d'eau a également été analysée pour les trois scénarios de crue. Les niveaux maximums atteints pour le scénario $Q_{100} + 15\%$ valent généralement entre 0,5 à 0,9 m de plus que pour le scénario Q_{100} . Pour le cas $Q_{100} + 30\%$, ces différences atteignent 1,0 à 1,8 m. Dans

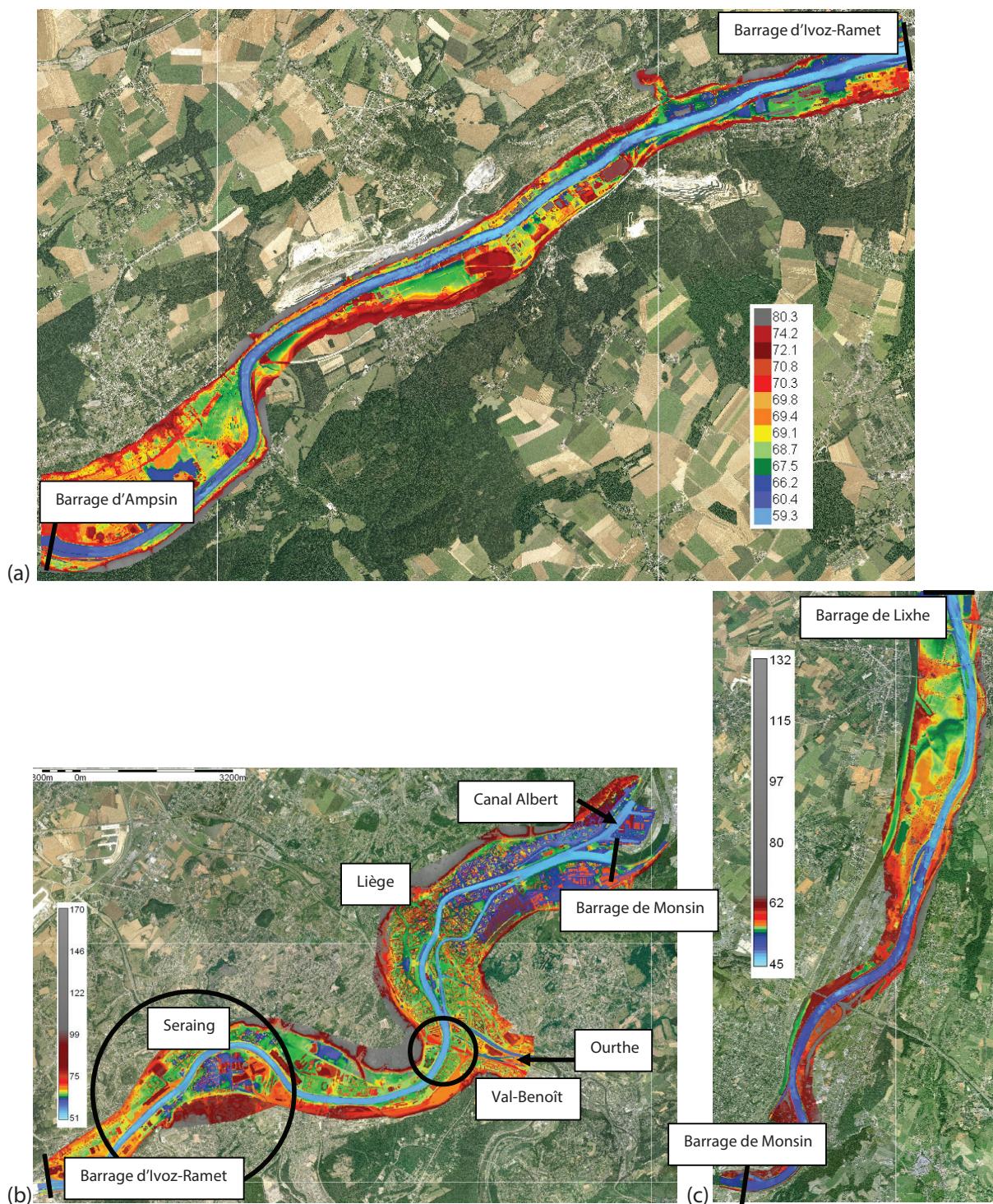


Figure 1 : Modèles numériques, incluant la bathymétrie et la topographie des plaines inondables, tels qu'utilisés pour les modélisations hydrauliques (résolution : $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$) des biefs n°1 (a), n°2 (b) et n°3 (c). Données : Service Public de Wallonie (SPW).

les zones situées juste en amont des barrages mobiles de Monsin et de Lixhe, ces différences sont réduites à presque zéro, dès lors que les caractéristiques de ces barrages permettent de réguler le niveau d'eau même pour des débits de crue aussi élevés dans le fleuve. Ailleurs, des différences significatives d'étendue d'inondations sont observées, surtout pour le scénario $Q_{100} + 30\%$ (Figure 3).

En termes de niveaux d'eau, les résultats obtenus ici au moyen de modélisations instationnaires s'avèrent très cohérents

avec ceux modélisés antérieurement moyennant un calcul stationnaire pour un débit équivalent au débit de pointe de l'hydrogramme [Dewals *et al.*, 2013]. Les écarts sont généralement de l'ordre de 5 cm au maximum, hormis dans le cas du scénario $Q_{100} + 30\%$ pour lequel l'amortissement de l'hydrogramme conduit à des diminutions de niveaux d'eau de 30 cm maximum par rapport aux résultats de modélisations stationnaires. Ces écarts limités en termes de niveau conduisent néanmoins localement à des surestimations

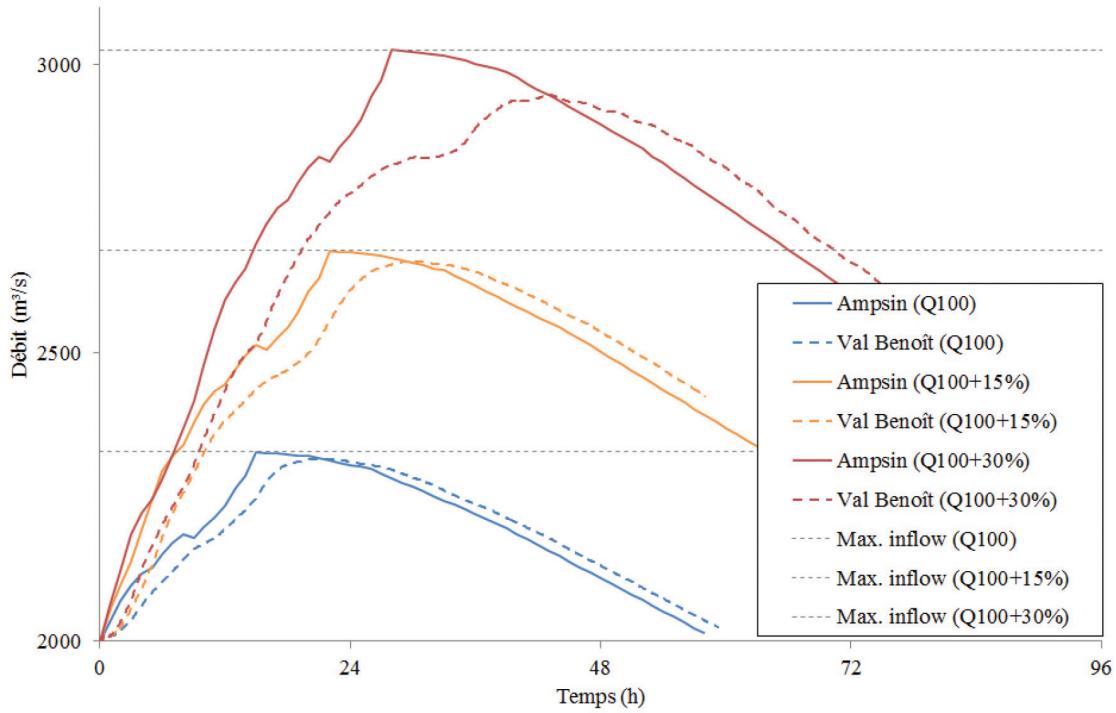


Figure 2 : Hydrogrammes prescrits en condition limite amont dans la Meuse (à Ampsin) et calculés en amont de la ville de Liège (Val Benoît), pour les trois scénarios de crues considérés.

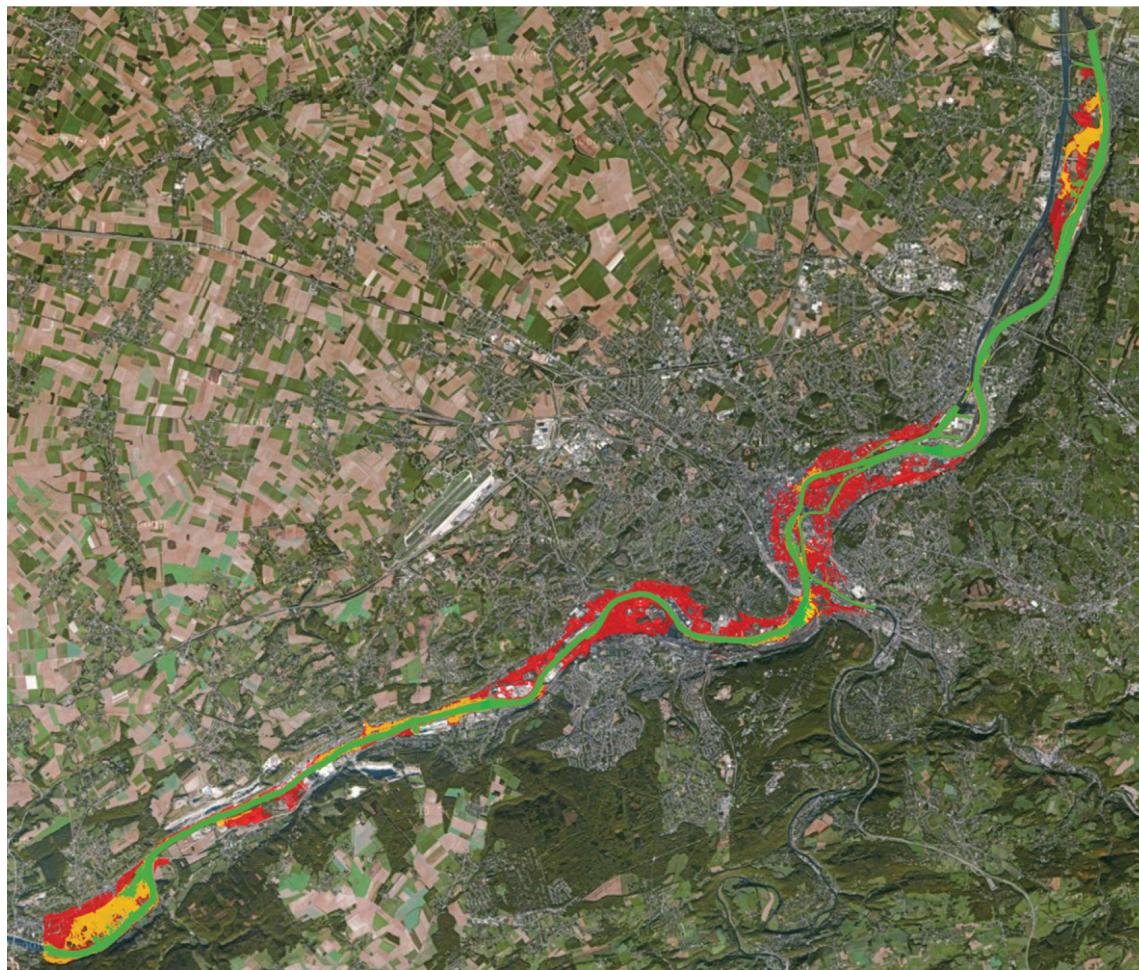


Figure 3 : Etendues d'inondation, entre le barrage d'Ampsin (B) et celui de Lixhe (proche de la frontière belgo-néerlandaise), pour une crue centennale dans la situation actuelle (n), ainsi qu'étendues additionnelles pour les scénarios $Q_{100} + 15\%$ (n) et $Q_{100} + 30\%$ (n).

locales de l'étendue d'inondations et des volumes stockés lorsque l'approche stationnaire est privilégiée.

Ces modélisations stationnaires, effectuées précédemment sur la partie belge de la Meuse, s'inscrivaient dans le cadre d'une démarche coordonnée de modélisation hydraulique transnationale de l'ensemble du cours de la Meuse, depuis sa source jusqu'à son embouchure. Cette étude avait également mis en évidence que l'augmentation des niveaux d'inondation à la suite d'un accroissement de débit (soit + 15 % et + 30 %) est environ deux fois plus élevée dans la partie centrale de la Meuse par rapport aux parties supérieure et inférieure [Dewals *et al.*, 2013].

IV. CONCLUSIONS

Des épisodes de crue sur la Meuse ont été simulés au moyen d'un modèle hydraulique bidimensionnel et instationnaire. Le tronçon étudié s'étend sur environ 50 km, entre Ampsin (Belgique) et la frontière belgo-néerlandaise. Des données bathymétriques et topographiques de haute précision et haute résolution (5 m × 5 m) ont été utilisées pour la représentation des lits mineur et majeur du fleuve, ce qui permet une représentation valable de la géométrie détaillée des plaines inondables urbanisées (ex. ville de Liège). Les ouvrages de régulation (barrages mobiles) ont été reproduits dans la modélisation. Les crues modélisées correspondent à un événement centennal (Q_{100}), ainsi qu'à deux scénarios plus extrêmes : $Q_{100} + 15\%$ et $Q_{100} + 30\%$.

Ces simulations hydrauliques détaillées ont montré que l'amortissement des ondes de crue reste très limité dans le tronçon considéré de la Meuse. L'amortissement n'excède pas environ 1% du débit de pointe pour les scénarios Q_{100} et $Q_{100} + 15\%$. Pour le scénario le plus extrême ($Q_{100} + 30\%$), l'amortissement du débit de pointe atteint 3 à 4%, en raison d'étendues de débordements nettement supérieures. Par rapport à la crue centennale, les accroissements de niveaux pour les scénarios $Q_{100} + 15\%$ et $Q_{100} + 30\%$ valent respectivement 0,5-0,9 m et 1,0-1,8 m. Par conséquent, les modélisations montrent que certaines villes importantes le long de la Meuse, comme Liège (200.000 habitants), ne sont pratiquement pas affectées pour une crue centennale, ni même pour le scénario $Q_{100} + 15\%$, et ce en raison du dimensionnement des ouvrages de protection et de la revanche associée. En revanche, l'importance des débordements s'accroît substantiellement pour des événements les plus extrêmes ($Q_{100} + 30\%$).

Les résultats de l'étude présentée ici servent de données d'entrée pour des modélisations réalisées sur la Meuse plus en aval aux Pays-Bas. Les résultats de ces simulations instationnaires restent cohérents avec ceux de modélisations stationnaires antérieures en ce qui concerne les niveaux, dès lors que des écarts supérieurs à environ 5 cm ne sont obtenus que pour le scénario le plus extrême ($Q_{100} + 30\%$), pour lequel ils ne dépassent pas 30 cm environ.

Le modèle instationnaire 2D établi dans le cadre de cette recherche est d'ores et déjà exploité pour évaluer différentes mesures d'adaptation structurelles pour protéger les zones inondables les plus vulnérables telles que la ville de Liège. Il permet également de mettre en évidence le rôle potentiel des ouvrages de régulation (barrages mobiles) sur l'aléa d'inondations et d'évaluer des mesures de réduction du risque, notamment par une gestion adaptée de ces ouvrages et une priorisation des zones à protéger. Par la suite, les interactions possibles entre les écoulements de crues extrêmes

et les superstructures des barrages mobiles de la Meuse devraient être davantage étudiés, ainsi que l'amortissement possible des ondes de crues dans les biefs en amont de la limite amont actuelle du modèle 2D instationnaire.

V. REMERCIEMENTS

La recherche a été menée grâce à une subvention de l'Union Européenne (E.U.) dans le cadre du projet AMICE, INTERREG IVB Europe du Nord-Ouest. Les auteurs remercient également le Service Public de Wallonie (SPW) pour la mise à disposition des données topographiques, bathymétriques et hydrologiques indispensables à la réalisation de cette étude.

VI. REFERENCES

- BECKERS A., DEWALS B., ERPICUM S., DUJARDIN S., DETREMBLEUR S., TELLER J., PIROTTON M. & ARCHAMBEAU P. (2013) — Contribution of land use changes to future flood damage along the river Meuse in the Walloon region. *Natural Hazards & Earth System Sciences*. **13**(9) : 2301-2318
- DEWALS B., DETREMBLEUR S., BECKER B., MOESKOPS S., ERPICUM S., DE KEIZER O., VANNEUVILLE W., BUITEVELD H., PIROTTON M. & ARCHAMBEAU P. (2012) — Transboundary assessment of the effect of climate change on river Meuse: flood wave selection for hydraulic modelling from Ampsin (B) to Maaseik (NL). Water - infinitely deformable but still limited. *Proc. 2nd European IAHR Congress. Munich*
- DEWALS B., DROGUE G., ERPICUM S., PIROTTON M. & ARCHAMBEAU P. (2013) — Impact of climate change on inundation hazard along the river Meuse. In: Dewals, B. & Fournier, M. (eds.) *Transboundary Water Management in a Changing Climate*. Leiden: CRC Press
- DEWALS B., ERPICUM S., DETREMBLEUR S., ARCHAMBEAU P. & PIROTTON M. (2011) — Failure of dams arranged in series or in complex. *Natural Hazards*. **56** : 917-939
- DEWALS B. J., ARCHAMBEAU P., DUY B. K., ERPICUM S. & PIROTTON M. (2012) — Semi-explicit modelling of watersheds with urban drainage systems. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. **6** : 46-57
- DEWALS B. J., ERPICUM S., ARCHAMBEAU P., DETREMBLEUR S. & PIROTTON M. (2006) — Depth-integrated flow modelling taking into account bottom curvature. *Journal of Hydraulic Research*. **44** : 785-795
- DEWALS B. J., KANTOUSH S. A., ERPICUM S., PIROTTON M. & SCHLEISS A. J. (2008) — Experimental and numerical analysis of flow instabilities in rectangular shallow basins. *Environmental Fluid Mechanics*. **8** : 31-54
- DUFRESNE M., DEWALS B. J., ERPICUM S., ARCHAMBEAU P. & PIROTTON M. (2011) — Numerical investigation of flow patterns in rectangular shallow reservoirs. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. **5** : 247-258
- ERNST J., DEWALS B. J., DETREMBLEUR S., ARCHAMBEAU P., ERPICUM S. & PIROTTON M. (2010) — Micro-scale flood risk analysis based on detailed 2D hydraulic modelling and high resolution geographic data. *Natural Hazards*. **55** : 181-209
- ERPICUM S., DEWALS B., ARCHAMBEAU P. & PIROTTON M. (2010) — Dam-break flow computation based on an efficient flux-vector splitting. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. **234** : 2143-2151
- ERPICUM S., DEWALS B. J., ARCHAMBEAU P., DETREMBLEUR S. & PIROTTON M. (2010) — Detailed inundation modelling using high resolution DEMs. *Engineering. Applications of Computational Fluid Mechanics*. **4** : 196-208

- ERPICUM S., MEILE T., DEWALS B. J., PIROTON M. & SCHLEISS A. J. (2009) — 2D numerical flow modeling in a macro-rough channel. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. **61** : 1227-1246
- KERGER F., ARCHAMBEAU P., DEWALS B. J., ERPICUM S. & PIROTON M. (2012) — Three-phase bi-layer model for simulating mixed flows. *Journal of Hydraulic Research*. **50** : 312-319
- KERGER F., ARCHAMBEAU P., ERPICUM S., DEWALS B. J. & PIROTON M. (2011) — An exact Riemann solver and a Godunov scheme for simulating highly transient mixed flows. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. **235** : 2030-2040
- KERGER F., ARCHAMBEAU P., ERPICUM S., DEWALS B. J. & PIROTON M. (2011) — A fast universal solver for 1D continuous and discontinuous steady flows in rivers and pipes. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. **66** : 38-48
- KERGER F., ERPICUM S., DEWALS B. J., ARCHAMBEAU P. & PIROTON M. (2011) — 1D unified mathematical model for environmental flow applied to steady aerated mixed flows. *Advances in Engineering Software*. **42** : 660-670
- KHUAT DUY B., ARCHAMBEAU P., DEWALS B. J., ERPICUM S. & PIROTON M. (2010) — River modeling and flood mitigation in a Belgian catchment. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water Management*. **163** : 417-423
- PAULUS R., DEWALS B. J., ERPICUM S., PIROTON M. & ARCHAMBEAU P. (2013) — Innovative modelling of 3D unsaturated flow in porous media by coupling independent models for vertical and lateral flows. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. *In press*
- ROGER S., DEWALS B. J., ERPICUM S., SCHWANENBERG D., SCHUTTRUMPF H., KONGETER J. & PIROTON M. (2009) — Experimental and numerical investigations of dike-break induced flows (*Journal of Hydraulic Research*. **47** : 349-359
- RULOT F., DEWALS B. J., ERPICUM S., ARCHAMBEAU P. & PIROTON M. (2012) — Modelling sediment transport over partially non-erodible bottoms. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. **70** : 186-199
- STILMANT F., PIROTON M., ARCHAMBEAU P., ROGER S., ERPICUM S. & DEWALS B. (2013) — Dike-break induced flows: A simplified model. *Environmental Fluid Mechanics*. **13** : 89-100