

# Modélisation numérique et gestion du risque inondation en milieu urbain sur base de modèles topographiques à haute résolution

S. Detrembleur\*, B.J. Dewals\*\*\*, P. Archambeau\*, S. Erpicum\* & M. Pirotton\*

\* Laboratoire d'Hydrologie, Hydrodynamique Appliquée et de Construction Hydrauliques - HACH, Département ArGEnCo, Université de Liège, Chemin des Chevreuils 1 Bât B52/3+1, 4000 Liège, Belgique.

(E-mail : [sylvain.detrembleur@ulg.ac.be](mailto:sylvain.detrembleur@ulg.ac.be), [pierre.archambeau@ulg.ac.be](mailto:pierre.archambeau@ulg.ac.be), [s.erpicum@ulg.ac.be](mailto:s.erpicum@ulg.ac.be), [michel.pirotton@ulg.ac.be](mailto:michel.pirotton@ulg.ac.be))

\*\* Fond national belge de la recherche scientifique F.R.S. – FNRS.

(E-mail : [b.dewals@ulg.ac.be](mailto:b.dewals@ulg.ac.be))

## Résumé

Dans le cadre général des grands événements récurrents d'inondation enregistrés à travers le monde et en Europe en particulier, des cartes d'inondation représenteraient un outil de grand intérêt pour les décideurs en matière d'aménagement du territoire mais aussi pour les compagnies d'assurance afin d'évaluer les risques liés à l'inondation ou encore pour permettre une gestion de crise efficace sur le terrain. Dans ce but, des cartes complètes et précises sont nécessaires pour différents événements de probabilités données.

En Belgique, début 2003, suivant une décision du gouvernement wallon, le modèle d'écoulements à surface libre WOLF2D a été officiellement choisi pour calculer des cartes d'inondation sur 800 kilomètres de cours d'eau en région wallonne en utilisant un modèle numérique de terrain à très haute résolution. Les résultats de ces calculs ont, par la suite, été utilisés par l'administration wallonne afin de concevoir la carte d'aléa inondation sur l'ensemble du territoire.

Le modèle hydraulique employé est intégré dans la suite logicielle WOLF, qui est développée depuis plus de dix ans à l'Université de Liège. Basée sur la formulation classique des équations en eaux peu profondes, sa discrétisation en volumes finis permet de traiter tout écoulement composé de mailles sèches et mouillées tout en assurant exactement la conservation du volume. Le caractère multiblocs du logiciel permet de modéliser des raffinements locaux du maillage au niveau des centres urbains tout en conservant, si nécessaire, des maillages plus lâches dans les grandes plaines inondables. Par ailleurs, des procédés de raffinement automatique du maillage permettent d'accélérer fortement les temps de calcul. Un modèle moyenné de turbulence type k- $\epsilon$ , peut également être employé et renforce ainsi les potentialités du modèle face aux écoulements complexes.

Une interface permet en outre de gérer l'ensemble des procédures de pré et post processing nécessaires à la conception des modélisations et à l'interprétation des résultats. Les opérations d'importation et d'exportation sont facilement réalisables vers la plupart des outils SIG classiques. Différentes couches de cartes peuvent être manipulées pour analyser les informations relatives à la topographie, à l'occupation du sol, à la densité de la végétation ou encore aux champs hydrodynamiques. Grâce à l'utilisation de modèles topographiques de haute résolution (1 point par mètre carré) disponible sur le lit principal comme sur les plaines d'inondation des cours d'eau étudiés, des modélisations basées sur des maillages composés de cellules carrées de 2m x 2m ont été réalisées notamment au droit des centres urbains traversés par les rivières.

Le modèle hydraulique a été intensivement validé par des comparaisons avec des observations lors d'événements récents. L'incertitude globale du modèle s'est avérée inférieure à 10 centimètres en termes de surface libre et permet de décrire l'inondation rue par rue et maison par maison.

## Mots clés

Inondation, gestion de risque, modèle numérique de terrain, urbain

## INTRODUCTION

Dans le cadre général de l'apparition récurrente de grandes crues partout dans le monde et plus particulièrement en Europe, des cartes d'inondation pertinentes et détaillées sont sans aucun doute un outil d'intérêt majeur pour aider les responsables de l'aménagement du territoire, pour informer les habitants vivant dans les zones à risque, pour améliorer les plans d'urgence mais aussi pour aider les compagnies d'assurances à mieux appréhender le risque inondation. Pour être utilisées en pratique, de telles cartes doivent avoir été conçues rigoureusement en se reposant sur des bases scientifiques et en utilisant des données topographiques de grande précision. En outre, elles doivent prendre en compte un nombre important d'événements statistiques de crues incluant de possibles influences du changement climatique et ne doivent pas se limiter à la reproduction des événements enregistrés dans le passé. Par ailleurs, ces cartes doivent pouvoir être mises à jour facilement au regard des modifications topographiques pouvant apparaître au sein même du lit mineur où dans les zones de débordements.

Dans ce contexte, la modélisation hydraulique peut certainement fournir les réponses attendues et des résultats fiables et précis surtout lorsque ces modèles peuvent exploiter les nombreuses informations fournies de nos jours par les Modèles Numériques de Terrain (MNT) qui sont généralement acquis par la technique du laser interférométrique embarqué en avion ou par la méthode du sonar multifaisceaux embarqué en bateau (McMillan, 2007).

Au cours de ces dernières années, de nombreux progrès ont été réalisés au sein des modèles hydrauliques pouvant exploiter cette densité d'information. Les modèles originellement développés et utilisant des concepts relativement simples et parfois restrictifs ont peu à peu fait place aux modèles bidimensionnels permettant la résolution des équations complètes de Saint-Venant (Mignot, 2006; Erpicum, 2006).

L'application de modèles 2D complets sur l'entière d'une zone inondable permet de fournir une distribution de résultats fiables tels que les hauteurs d'eau et les vitesses d'écoulement même dans les zones fortement urbanisées. De tels résultats sont très importants notamment dans le contexte de détermination des dommages causés par les inondations (Dutta, 2003; Ernst, 2008) et par conséquent des risques liés au débordement de cours d'eau.

Une fois les paramètres du modèle calibrés sur base d'événements historiques, en particulier le coefficient de frottement, des modélisations des zones d'inondations peuvent être menées à bien sur base d'un ensemble statistique d'événements extrêmes afin de déterminer la carte d'« aléa inondation ».

Dans ce papier, un modèle hydrodynamique quasi-tridimensionnel complet est décrit. Il a été utilisé pour la détermination des zones d'inondation le long des principaux cours d'eau de la Région Wallonne en Belgique représentant environ 800 km de filaire. Ces modélisations ont été calculées sur base d'un levé topographique réalisé par laser aéroporté proposant une résolution spatiale de 1 point par m<sup>2</sup> ainsi qu'une erreur altimétrique maximale de 15 cm. Ces simulations permettent dès lors de modéliser explicitement les zones inondables à l'échelle de chaque rue ou de chaque bâtiment. Le modèle présenté repose sur la technique éprouvée des volumes finis en utilisant des schémas numériques simples et robustes permettant de résoudre les équations en eaux peu profondes sur des maillages comptant jusqu'à 1 million de cellules soit plus de 3 millions d'inconnues de calcul à l'aide d'ordinateurs de configuration standard (3.4 GHz – 4 Gb RAM).

Après la description détaillée du logiciel, plusieurs exemples de validation et d'application en milieu urbain seront présentés.

## MODELE HYDRAULIQUE

### Modèle mathématique

Le modèle développé est basé sur la résolution des équations de continuité et de conservation de la quantité de mouvement en 2 dimensions et moyennées sur la hauteur. Dans l'approche en « eau peu profonde », l'hypothèse de base réside dans le fait que les vitesses développées dans le plan de l'écoulement doivent être significativement plus grandes que celles développées dans le plan perpendiculaire à celui de l'écoulement. La conséquence de cette hypothèse est que le champ de pression est partout hydrostatique. La majorité des écoulements rencontrés dans nos rivières peuvent être raisonnablement considérés comme peu profonds si ce n'est à l'approche de singularités présentes dans le lit de la rivière. Il n'empêche que dans les applications envisagées dans cet article, l'approche envisagée est suffisante pour la modélisation des zones d'inondation.

La forme conservative des équations de continuité et de conservation de la quantité de mouvement peuvent s'écrire en notations vectorielles :

$$\frac{\partial \mathbf{s}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{f}_d}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{g}_d}{\partial y} = \mathbf{S}_0 - \mathbf{S}_f \quad (1)$$

où  $\mathbf{s} = [h \quad hu \quad hv]^T$  est le vecteur des inconnues,  $\mathbf{f}$  et  $\mathbf{g}$  représentent respectivement les flux advectifs et de pression dans les directions  $x$  et  $y$ ,  $\mathbf{f}_d$  et  $\mathbf{g}_d$  sont les flux diffusifs:

$$\mathbf{f} = \begin{pmatrix} hu \\ hu^2 + \frac{1}{2}gh^2 \\ huv \end{pmatrix}, \quad \mathbf{g} = \begin{pmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 + \frac{1}{2}gh^2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{f}_d = -\frac{h}{\rho} \begin{pmatrix} 0 \\ \sigma_x \\ \tau_{xy} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{g}_d = -\frac{h}{\rho} \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{xy} \\ \sigma_y \end{pmatrix} \quad (3)$$

$\mathbf{S}_0$  et  $\mathbf{S}_f$  désignent la pente de fond et les termes de frottement :

$$\mathbf{S}_0 = -gh \begin{bmatrix} 0 & \partial z_b / \partial x & \partial z_b / \partial y \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

$$\mathbf{S}_f = \begin{bmatrix} 0 & \tau_{bx} \Delta \Sigma / \rho & \tau_{by} \Delta \Sigma / \rho \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

Dans les équations (1) à (5),  $t$  est le temps,  $x$  et  $y$  les coordonnées spatiales,  $h$  la hauteur d'eau,  $u$  et  $v$  les composantes de vitesse moyennée,  $z_b$  le niveau du fond,  $g$  l'accélération de la gravité,  $\rho$  la densité de l'eau,  $\tau_{bx}$  et  $\tau_{by}$  les tensions de cisaillement au fond,  $\sigma_x$  et  $\sigma_y$  les contraintes normales de turbulence et  $\tau_{xy}$  la contrainte turbulente de cisaillement.

$$\Delta \Sigma = \sqrt{1 + \left( \partial z_b / \partial x \right)^2 + \left( \partial z_b / \partial y \right)^2} \quad (6)$$

représente l'augmentation de la surface frottante au fond en présence d'une topographie irrégulière (Dewals, 2006).

### Modélisation du frottement

Le frottement de fond est modélisé par la loi expérimentale de Manning-Strickler. Le modèle permet d'utiliser une distribution du coefficient de frottement de manière à différencier certains terrains ou des occupations du sol. Outre le frottement de fond, un frottement latéral peut également être pris en compte (Dewals, 2006).

Par ailleurs, la dissipation interne peut être modélisée grâce à des modèles de turbulence. Au sein de la littérature, différentes approches sont proposées allant d'une simple relation

algébrique (Fisher, 1979) à des modèles plus complexes faisant intervenir des équations additionnelles (Rodi, 1984; Erpicum, 2006). Cette dissipation interne n'a cependant pas été modélisée explicitement dans les exemples présentés ci-dessous. Les pertes qui en découlent ont été globalisées au sein du coefficient de frottement imposé.

### Maillage et schéma numérique

Le solveur inclut un module de maillage permettant de générer des maillages multiblocs (Erpicum, 2006). A l'intérieur de chaque bloc, le maillage est cartésien afin de proposer de plus faibles temps de calcul et une meilleure précision que les maillages non structurés. Les caractéristiques multiblocs du solveur permettent de raffiner localement le maillage dans des zones d'intérêts tout en ne générant pas un nombre de mailles trop important comme ce serait le cas dans un maillage cartésien classique non multibloc. En complément, une adaptation automatique du maillage permet de circonscrire la zone de calcul aux zones mouillées uniquement limitant de ce fait le nombre de mailles calculées. L'espace modélisé est discrétisé à l'aide de volumes finis permettant une exacte conservation de la masse et de la quantité de mouvement qui est indispensable pour gérer efficacement les discontinuités de la solution (i.e. les ressauts hydrauliques). La reconstruction aux bords des volumes finis peut être réalisée de manière constante ou linéaire, cette dernière offrant, avec l'aide de limiteurs, une précision spatiale du second ordre.

Les flux  $\mathbf{f}$  et  $\mathbf{g}$  sont calculés par une méthode de séparation des flux où la direction de décentrement est simplement indiquée par le signe de la vitesse aux bords des volumes finis. Cette séparation peut s'écrire sous la forme :

$$\mathbf{f}^+ = \begin{pmatrix} hu \\ hu^2 \\ huv \end{pmatrix} ; \quad \mathbf{f}^- = \begin{pmatrix} 0 \\ gh^2/2 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{g}^+ = \begin{pmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 \end{pmatrix} ; \quad \mathbf{g}^- = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ gh^2/2 \end{pmatrix} \quad (10)$$

où les exposants + et – font référence respectivement à un décentrement amont ou aval des termes correspondants. Des études de stabilité ont montré que cette séparation des flux assurait un schéma spatial stable lors de la résolution des équations (Dewals, 2006). De par leur caractère diffusifs, les flux  $\mathbf{f}_d$  et  $\mathbf{g}_d$  peuvent être calculés sur base d'un schéma centré.

### Discretisation temporelle

Le modèle est appliqué dans le cadre de cet article pour le calcul de solutions stationnaires bien qu'il soit capable de représenter tout phénomène instationnaire. L'intégration temporelle est réalisée de manière explicite grâce aux schémas de Runge-Kutta à 3 pas qui fournissent la dissipation numérique adéquate pour atteindre rapidement une solution stationnaire. Pour des raisons de stabilité, le pas de temps de temps est limité par le condition de Courant-Friedrichs-Levy reposant sur la célérité des ondes de gravité. Les phénomènes instationnaires peuvent être aisément représentés par une simple modification des coefficients pondérateurs du schéma Runge-Kutta et par conséquent de la dissipation numérique associée.

### Conditions aux limites

Dans les applications présentées, les valeurs de débit alimentant le modèle sont imposées en tant que flux entrant normal au domaine. Le flux transversal est généralement fixé à 0 bien qu'il puisse être imposé à une valeur différente. Dans le cas d'un écoulement torrentiel, une condition limite de hauteur d'eau peut être imposée en plus à l'amont du domaine. Dans les

cas exposés dans cet article, les écoulements sont majoritairement infracritiques et, par conséquent, une condition limite à l'aval du domaine doit être imposée. Celle-ci peut prendre la forme d'une hauteur d'eau ou d'un nombre de Froude. Au droit de murs imperméables, la valeur du débit normal est fixée à 0.

### **Aspects complémentaires**

Le modèle décrit précédemment est une partie d'un système global de modélisation nommé « WOLF » et entièrement développé à l'Université de Liège. WOLF regroupe plusieurs modèles complémentaires qui peuvent être éventuellement interconnectés pour simuler la plupart des écoulements à surface libre : écoulements hydrologiques, hydrodynamique 1D et 2D (en plan horizontal ou vertical), transport d'air ou de sédiments ainsi qu'un module d'optimisation basé sur le concept des algorithmes génétiques (Archambeau, 2006; Dewals, 2006; Erpicum, 2006; Detrembleur, 2008).

Par ailleurs, une interface graphique évoluée (Archambeau, 2006) permet de gérer l'ensemble des opérations de pré et post traitement de l'ensemble des données (topographie, occupation du sol,...) et des résultats (hauteur d'eau, champs de vitesse et de débits,...).

### **DONNEES TOPOGRAPHIQUES**

Au cours des dernières années, les modèles topographiques à haute résolution se sont multipliés dans plusieurs pays dans le but de fournir l'information nécessaire à la modélisation précise des zones d'inondation. En Belgique, au début des années 2000, un levé a été réalisé à l'initiative de la Région Wallonne dans la partie sud du pays sur les cours d'eau majeurs. Ce levé, basé sur la technique du laser aéroporté, a permis d'acquérir les données décrivant les zones d'inondation entourant les rivières. Par ailleurs, sur les cours d'eau navigables, une technique sonar a permis d'acquérir la bathymétrie du cours d'eau avec la même précision que le levé des lits majeurs. Les données mises à disposition présentent une résolution d'1 point par m<sup>2</sup> avec une erreur altimétrique maximale de 15 cm.

Sur de plus petites rivières, la donnée bathymétrique n'a pu être acquise par la technique du sonar et seules des sections transversales espacées d'environ 50 mètres sont disponibles pour décrire le lit mineur de la rivière. L'information bidimensionnelle représentant le fond du cours d'eau est générée sur base de ces sections ponctuelles au moyen d'un module spécifique développé au sein de l'interface graphique de WOLF (Detrembleur, 2003).

En plus de ces informations, il importe d'intégrer toutes les spécificités locales de la rivière telles que les seuils, barrages mobiles ou encore les protections contre les crues (murs,...) qui représentent des détails capitaux dans la modélisation des crues en général mais encore plus lors de la prédiction des inondations en milieu urbain.

Finalement, ce modèle numérique de terrain doit être épuré de la plupart de la végétation subsistant sur les données puisque celle-ci est représentée, au sein du modèle topographique, par des obstacles imperméables largement surestimés par rapport à la réalité.

Dans le cadre des modélisations réalisées le long des 800 km de cours d'eau et dans plusieurs centres urbains, la pleine résolution du modèle numérique de terrain n'a pas systématiquement été employée étant donné la longueur des rivières et la surface des zones inondées simulées d'un seul tenant (entre 3 et 15 km de cours d'eau). Dans le cadre des applications proposées dans cet article, des mailles carrées de 2 m de côté ont été utilisées permettant néanmoins de décrire très précisément chaque bâtiment ou rue au sein des agglomérations. Il est bien entendu acquis que des modélisations à la plus haute résolution disponible (i.e. 1m) peuvent être envisagées en restreignant quelque peu la zone calculée.

## RESULTATS ET DISCUSSION

### Méthodologie de simulation

Après les phases de préparation du MNT décrites au paragraphe précédent, les paramètres du modèle et principalement la valeur du coefficient de frottement doit être calibrée. Ce processus est réalisé en simulant une crue historique relativement bien documentée (photographies aériennes, mesures locales du niveau d'eau,...). Par après, les débits statistiques correspondants à des périodes de retour de 25, 50 et 100 ans sont simulés afin de fournir les données nécessaires à la création de la carte de l'aléa d'inondation.

### Applications

Un exemple de validation est présenté (Fig. 1 et Fig. 2) et illustre la modélisation d'une crue historique sur la rivière Vesdre. Ce cours d'eau est un affluent de la Meuse et serpente sur environ 70 km dans le massif ardennais belge. Le bassin versant drainé au droit de la modélisation est d'environ 700 km<sup>2</sup>. La modélisation représente les inondations causées par un débit de 255 m<sup>3</sup>/s apparu durant l'année 1998 suite à des orages exceptionnels sur l'aval du bassin. Les emprises modélisées sont tout à fait en accord avec les photographies prises sur place comme l'indique les points de repères. La présence d'un mur anti-crue ne peut cependant empêcher l'inondation provenant de l'aval.

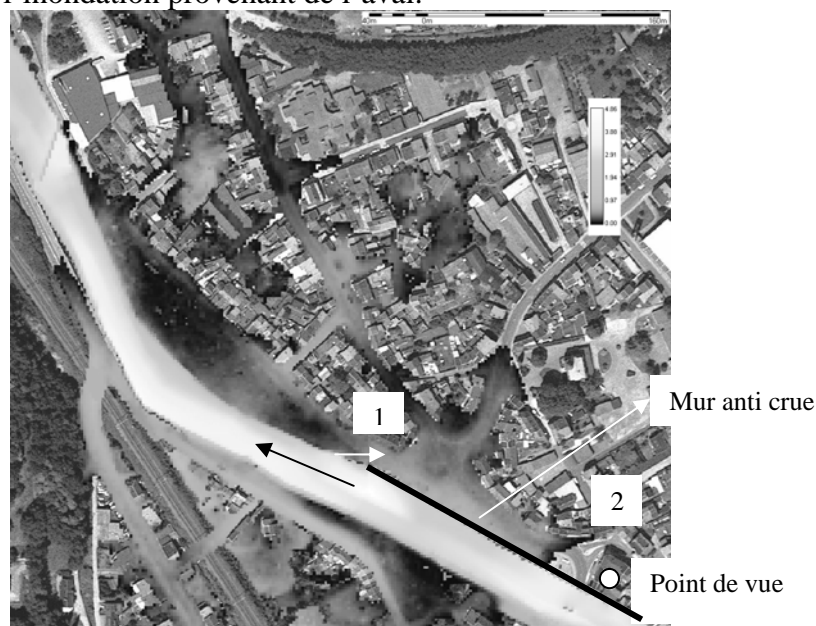


Fig. 1 : Hauteur d'eau pour un débit de 255 m<sup>3</sup>/s



Fig. 2: Photographie de crue en 1998

Le second exemple concerne la rivière Eau d'Heure, affluent de la Sambre. Cette rivière d'environ 35 kilomètres de long possède un bassin versant de 310 km<sup>2</sup> au droit de la localité illustrée. La modélisation de validation est présentée pour un débit de 80 m<sup>3</sup>/s apparu au cours de l'année 2002. Les Fig. 3 et Fig. 4 montrent la bonne correspondance des zones inondées numériquement avec la photographie aérienne de cette zone durant le pic de crue.



Fig. 3 : Hauteur d'eau modélisées pour un débit de 80 m<sup>3</sup>/s



Fig. 4 : Photographie de crue en 2002

## CONCLUSIONS

Un modèle hydrodynamique 2D performant a été présenté. Il résout les équations de l'hydraulique en « eau peu profonde » en utilisant des volumes finis et un maillage multibloc structuré. L'efficacité et la simplicité des schémas numériques programmés permettent de traiter environ 1 million de cellules soit 3 millions d'inconnues. Le modèle permet de prédire

des étendues d'inondation en se basant sur une donnée topographique très précise et très dense. Le seul paramètre devant être calibré est le coefficient de frottement qui peut être spatialement distribué tant dans le lit principal que dans le lit majeur. Suite à la validation du modèle sur base d'événements historiques, des modélisations prédictives utilisant des valeurs de débits statistiques ont été entreprises le long de 800 km de cours d'eau et y compris au droit de centre urbains. Les données issues de ces simulations, après exploitation par l'Administration belge, permettent de créer les cartes d'aléa inondation.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Service Public de Wallonie pour la fourniture des données du MNT.

## REFERENCES

- Archambeau, P., 2006. Contribution à la modélisation de la genèse et de la propagation des crues et inondations. Thèse, HACH, Université de Liège, Belgique.
- Detrembleur, S. et Al, 2008. An Explicit Projection Method for Solving Incompressible Navier-Stokes Equations. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Junior Researcher and Engineer Workshop on Hydraulic Structures, Pise, Italie.
- Detrembleur, S., 2003. Elaboration d'outils intégrés de gestion des données topographiques et morphologiques pour la modélisation des crues et inondations. DEA , HACH, Université de Liège, Belgique.
- Dewals, B.J., 2006. Une approche unifiée pour la modélisation des écoulements à surface libre, de leur effet érosif sur une structure et de leur interaction avec divers constituants. Thèse, HACH, Université de Liège, Belgique.
- Dutta, D., Herath, S., Musiak, K., 2003. A mathematical model for flood loss estimation. Journal of Hydrology, 277(1-2): 24-49.
- Epicum, S., 2006. Optimisation objective de paramètres en écoulements turbulents à surface libre sur maillage multibloc. Thèse, HACH, Université de Liège, Belgique.
- Ernst, J., B. J. Dewals, E. Giron, W. Hecq et M. Pirotton, Integrating hydraulic and economic analysis for selecting flood protection measures in the context of climate change. Proc. 4th Int. Symp. on Flood Defence, Toronto, Canada, 2008.
- Fischer, H., List, E., Koh, R., Imberger, J., Brooks, N., 1979. Mixing in inland and coastal waters. Academic Press, New York.
- McMillan, H.K., Brasington, J., 2007. Reduced complexity strategies for modelling urban floodplain inundation. Geomorphology, 90: 226-243.
- Mignot, E., Paquier, A., Haider, S., 2006. Modelling floods in a dense urban area using 2D shallow water equations. Journal of Hydrology, 327: 186-199.
- Rodi, W., 1984. Turbulence models and their application in hydraulics - A state-of-the-art review (second revised edition). Balkema, Leiden.