

# Modélisation hydrodynamique 2D et SIG à haute résolution pour l'évaluation de mesures de protection contre les inondations en milieu urbain

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

\*Laboratoire d'Hydrologie, d'Hydrodynamique Appliqué et de Constructions Hydrauliques, Institut de Génie Civil, Département ArGEnCO, Université de Liège, Ch. Des Chevreuils 1, B52/3+1, B-4000 Liege, Belgium, (E-mail: [j.ernst@ulg.ac.be](mailto:j.ernst@ulg.ac.be))

\*\* Fonds de la Recherche Scientifique F.R.S-FNRS

## Résumé

Dans le cadre général de l'évolution climatique, la plupart des modèles climatiques régionaux (RCM – Regional Climatic Model) prédisent une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements pluvieux. Les populations devront dès lors faire face à un risque d'inondation accru. Afin de planifier et de mettre en place une stratégie d'adaptation adéquate face à l'évolution de ce risque d'inondation, de nouveaux outils d'aide à la décision doivent être développés de manière à sélectionner la stratégie adéquate parmi l'ensemble des mesures de protections possibles. Ce type de système d'aide à la décision doit prendre en considération des paramètres tant hydrauliques qu'économiques, sociaux et environnementaux.

Cet article est focalisé sur l'intégration entre l'évaluation économique des dommages subis et les modélisations hydrodynamiques bidimensionnelles mises en œuvre à l'aide du modèle *WOLF 2D*. L'intégration est garantie par l'utilisation de systèmes d'information géographique pointus et une procédure automatisée, basée sur les méthodes de la géomatique, garantissant une applicabilité parfaite de la méthodologie pour l'analyse de zones urbaines ou fortement urbanisées. L'ensemble de la méthodologie est ensuite appliqué à l'évaluation d'une mesure d'adaptation sur l'Ourthe (bassin de la Meuse), à savoir la réhabilitation d'un ancien canal autrefois utilisé pour permettre le transport fluvial sur la rivière.

## Mots-clés

Modélisation d'inondation ; évaluation de dommage ; SIG ; modèle hydrodynamique 2D

## INTRODUCTION

### Contexte

Le projet national belge de recherche « ADAPT - *Towards an integrated decision tools for adaptation measures* » a pour but de développer un système d'aide à la décision dédié à l'évaluation intégrée de mesures de protection dans le contexte très actuel des changements climatiques. Ce système est basé sur la combinaison d'une analyse coût – bénéfice et d'une analyse multicritères, qui tient compte d'indicateurs non seulement hydrauliques, mais aussi économiques, sociales et environnementales.

L'article se focalise sur l'intégration de deux composants principaux de ce système d'aide à la décision, à savoir : la modélisation hydrodynamique des événements de crue et l'évaluation économique des dommages subis lors des inondations. La méthodologie d'intégration proposée est ensuite appliquée à un cas pratique pour une ville située sur les rives de l'Ourthe (affluent majeur de la Meuse). Les simulations hydrodynamiques des différents scénarii de crue sont réalisées à l'aide d'un modèle 2D permettant ainsi de fournir une cartographie détaillée des variables hydrauliques, que sont la hauteur d'eau et la vitesse d'écoulement sur l'ensemble de l'extension des zones inondées.

### Présentation de la méthodologie

Tel que présenté à la Figure 1, le risque d'inondation est défini par la somme sur tous les événements possibles du produit de la probabilité d'occurrence par les conséquences (Ernst et al., 2008). La probabilité d'occurrence d'une crue peut être dérivée de la période de retour statistique.

RISQUE D'INONDATION= somme ( probabilité * conséquences)			
Probabilité		Conséquences (dommage)	
Probabilité (période de retour)	Exposition (extension, profondeur, vitesse)	Éléments soumis au risque (population, bâti, réseaux, écosystèmes ...)	Vulnérabilité (susceptibilité, capacité d'adaptation, ...)

**Figure 1.** Définition et composantes principales du risque d'inondation.

Les conséquences peuvent être définies par trois composantes : (i) l'exposition, déterminée par la cartographie des résultats des modélisations hydrodynamiques ; (ii) les caractéristiques des éléments soumis au risque (i.e. les personnes et les biens susceptibles d'être affectés par un événement de crue) ; (iii) la vulnérabilité, qui décrit la susceptibilité, la capacité d'adaptation et la résilience des personnes et des biens soumis au risque.

L'originalité de la méthode réside dans l'intégration au sein d'un même outil d'aide à la décision de l'aspect hydrodynamique, de l'analyse économique et, à terme, de l'analyse des impacts psychosociaux et environnementaux des inondations. De plus, l'outil développé permet d'analyser chaque bien indépendamment des autres (analyse dite « micro échelle » ou « orientée objet ») mais applicable sur des zones d'étude relativement importantes (plusieurs dizaines de kilomètres de rivière) et parfaitement adapté à l'analyse de zones urbaines ou fortement urbanisées.

## DONNEES D'ENTREE

Afin de mener à bien le processus d'évaluation de mesures d'adaptation, la qualité des données d'entrée est capitale. Plusieurs sources de données complémentaires sont nécessaires. Tout d'abord, des données hydrologiques sont utilisées pour définir la valeur des débits à modéliser, ensuite un modèle topographique de haute précision doit être généré afin de pouvoir exploiter les potentialités du modèle hydrodynamique 2D, et pour terminer un Système d'Information Géographique adapté doit permettre de faire le lien entre, d'une part, les résultats des simulations hydrodynamiques et l'analyse économique d'autre part.

## Données hydrologiques

Les débits statistiques utilisés pour cette étude ont été déduits à partir de mesures collectées à des stations limnimétriques sur l'Ourthe. Les observations s'étalent sur une période de plus 30 ans et incluent également les derniers événements d'inondation marquants survenus sur cette rivière depuis 1993 (i.e. 1993, 1995, 2002 et 2003). La distribution statistique liant le débit et la fréquence d'occurrence d'une crue est une loi Gamma dont l'expression est reprise dans l'équation (1) :

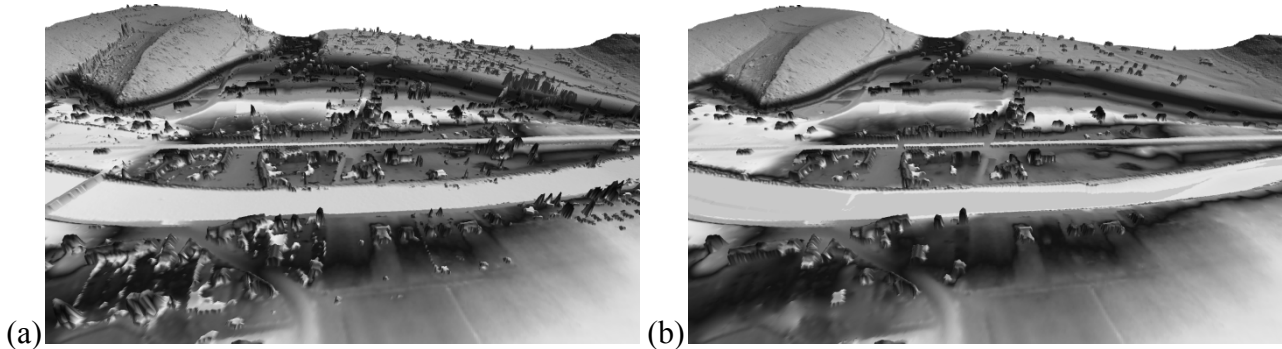
$$f(x) = \frac{\alpha^\lambda}{\Gamma(\lambda)} x^{\lambda-1} e^{-\lambda x} \quad \text{avec} \quad \Gamma(\lambda) = \int_0^{\infty} u^{\lambda-1} e^{-u} du. \quad (1)$$

Les paramètres de la loi sont optimisés par la méthode du maximum de vraisemblance ( $\alpha = 0.01464$ ,  $\lambda = 5.80874$ ).

## Modèle Numérique de Terrain

Le LiDAR pour Light Detection And Ranging (par analogie au RADAR pour Radio Detection And Ranging) est une technique d'acquisition aéroportée de données altimétriques à très haute résolution géométrique, qui constitue la technologie la plus pointue en la matière dans le domaine de la modélisation hydraulique des rivières. Le principe de base du LiDAR est de mesurer le temps de parcours d'une impulsion laser émise vers le sol et réfléchi vers la source. Connaissant l'orientation tridimensionnelle de cette impulsion, le temps de parcours et la position de la source, la position de l'obstacle rencontré par le laser peut être déduite.

La difficulté principale associée à cette technique d'acquisition est qu'elle produit un modèle numérique de surface incluant des obstacles non pertinents pour une modélisation de l'écoulement. Une phase préliminaire de préparation du modèle est donc indispensable afin d'éliminer, par exemple, les résidus de la végétation qui subsistent sur le modèle topographique (Figure 2) (Ernst, 2007). Dans cette étude, le modèle de terrain final aura une résolution au sol de 2 mètres de côté, permettant ainsi de représenter fidèlement toutes les particularités topographiques du milieu urbain.



**Figure 2.** Extrait du modèle topographique utilisé au sein des modélisations hydrodynamiques : (a) avant et (b) après correction des obstacles non pertinents pour l'écoulement.

### **Modélisation hydraulique**

Durant les périodes de crue, il est démontré que les interactions des écoulements entre les lits mineur et majeur ne peuvent pas être négligées. Un modèle 1D, qui par ailleurs est largement utilisée pour des modélisations hydrodynamiques de crue dans les cours d'eau ne peut, par définition, reproduire fidèlement ce type d'interaction. De plus, le besoin croissant de quantification précise des dommages lors d'inondations, en particulier dans des zones urbaines ou fortement urbanisées, rend les hypothèses d'un écoulement unidimensionnel inacceptable (McMillan et al., 2008). Dans le présent article, dans un souci de modéliser les interactions entre le lit majeur et le lit mineur, mais aussi de reproduire le plus fidèlement possible les écoulements sur un modèle topographique complexe tel que des zones urbanisées, un modèle hydrodynamique 2D a été utilisé.

L'unité de recherche d'Hydrologie, d'Hydrodynamique Appliquée et des Constructions Hydraulique de l'Université de Liège développe depuis une dizaine d'année un ensemble cohérent d'outils dévolus à la modélisation hydrodynamique en général. Les différents modèles conçus sont intégrés dans un seul système de modélisation appelé *WOLF*. Parmi ceux-ci, *WOLF 2D*, le code de calcul dédié à la modélisation d'écoulements bidimensionnels en plan horizontal, est exploité dans cette étude. Il se base sur les équations d'écoulement en eaux peu profondes et résout les équations de conservation du volume et de la quantité de mouvement (Dewals et al., 2008 ; Erpicum et al., 2008).

### **Base de données d'occupation du sol**

Dans l'optique d'une automatisation de l'ensemble de la procédure, l'utilisation des bases de données à caractère géographique (géoréférenciation des objets qui y sont contenus) est d'une grande utilité, non seulement dans un objectif d'identification des biens mais aussi pour la détermination de la fonction de ceux-ci. Dans cette étude, deux bases de données différentes seront couplées pour en extraire un maximum d'information. Elles sont fournies par les deux principaux pourvoyeurs belges de ce type de données, à savoir l'Institut Géographique National (base de données : *Top10v-GIS*) et la Région Wallonne (base de données : *PICC*). Toutes deux sont des bases de données à large échelle (1 :10000) et de qualité sémantique remarquable.

# METHODOLOGIE

## Introduction

La méthodologie globale d'évaluation des dommages économiques subis lors d'inondations est assez largement répandue, mais l'originalité de cette méthode réside dans le fait que chaque maille composant la modélisation hydrodynamique bidimensionnelle est soumise au processus qui est expliqué ci-dessous (Ernst et al., 2008).

## Etape 1

La première étape de la méthodologie d'évaluation des dommages est l'identification des éléments soumis au risque. Fondamentalement cela peut être réalisé par la combinaison des cartes d'inondation et des bases de données géographiques. Cependant, les simulations sont menées sur un modèle numérique de surface incluant les obstacles pertinents à l'écoulement. En conséquence, les hauteurs d'eau sont nulles sur les mailles qui composent ces obstacles même s'ils sont touchés par l'inondation. Ces valeurs de hauteurs d'eau doivent donc être générées a posteriori par une analyse des mailles à la frontière des biens identifiés.

## Etape 2

Il existe deux approches pour aborder le problème de l'évaluation des dommages par l'intermédiaire de fonction des dommages (FloodSite, 2006) : soit les fonctions de dommage fournissent directement une valeur absolue des dommages, soit une valeur relative (fraction de la valeur totale des biens). Bien que la seconde approche nécessite la connaissance séparée de la valeur des biens, elle est plus facilement transposable d'une région d'analyse à l'autre. Un grand nombre de fonctions de dommage de ce type sont présentes dans la littérature (International Commission for the Protection of the Rhine, 2001; Dushmanta et al., 2003; Penning-Rowsell et al., 2003). Le plus souvent ces fonctions lient les hauteurs d'eau et le dommage. En particulier, de récents développements effectués dans le cadre du projet MEDIS ont mené au développement d'un nouveau modèle d'estimation des dommages dus aux inondations : FLEMO (Thieken et al., 2008).

## Etape 3

Une fois les paramètres économiques déterminés pour chaque type d'élément soumis au risque, l'étape suivante du processus consiste à estimer le dommage relatif de chaque bien affecté par l'inondation. Comme il a été expliqué plus haut, les simulations d'écoulement sont menées sur un modèle numérique de surface ce qui impose une étape de supplémentaire pour déterminer les hauteurs d'eau à l'intérieur des biens en « sur sol » et touchés par l'inondation. La méthode utilisée permet d'interpoler les valeurs de hauteur à partir des mailles mouillées au voisinage de ces biens (moyenne ou interpolation suivant un plan calé par moindre carré).

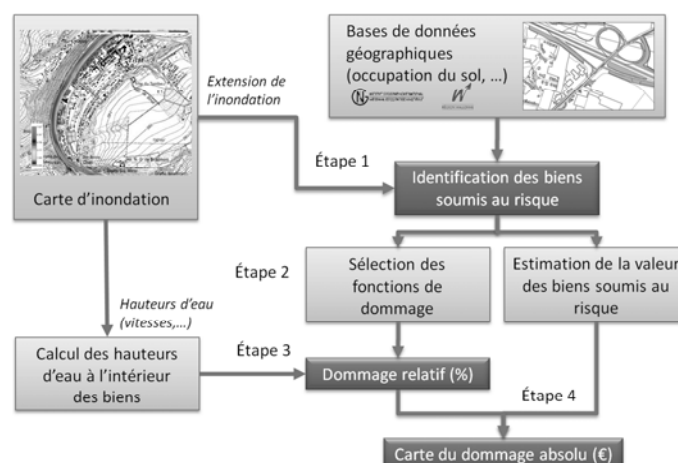


Figure 3. Organigramme des quatre étapes de la méthodologie développée.

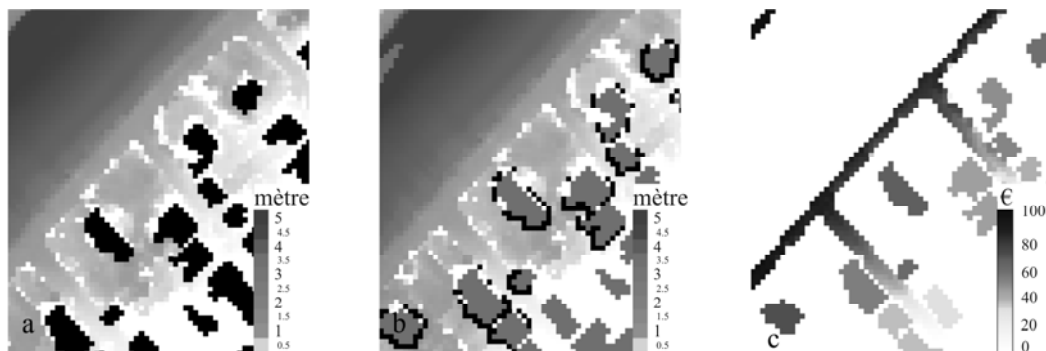
#### Etape 4

La dernière étape consiste à combiner la valeur de chacun des types de biens inclus dans l'analyse avec le dommage relatif calculé précédemment à l'étape 3. Le résultat final de cette procédure est une cartographie détaillée des pertes subies lors d'un événement de crue, et ce à une résolution identique à celle des modélisations hydrodynamiques.

#### Aperçu de la procédure

L'ensemble de la procédure est illustrée à la figure suivante (Figure 4), les trois images représentent respectivement la première, la troisième et la quatrième étape de la procédure :

- identification des éléments soumis au risque par la combinaison des cartes d'inondation (hauteurs d'eau représentée par une palette de couleur en niveau de gris) et des bases de données géographiques (en noir sur la figure) (Figure 4a) ;
- interpolation de la valeur des hauteurs d'eau à l'intérieur des constructions en « sur sol » dans ce cas en moyennant les mailles mouillées (représentées en noir) à la frontière des bâtiments (Figure 4b) ;
- estimation des pertes économiques subies par les biens en exploitant des fonctions de dommages relative et une estimation de la valeur des biens (Figure 4c).



**Figure 4.** Illustration de l'application de la procédure d'évaluation des dommages subis lors d'un événement d'inondation.

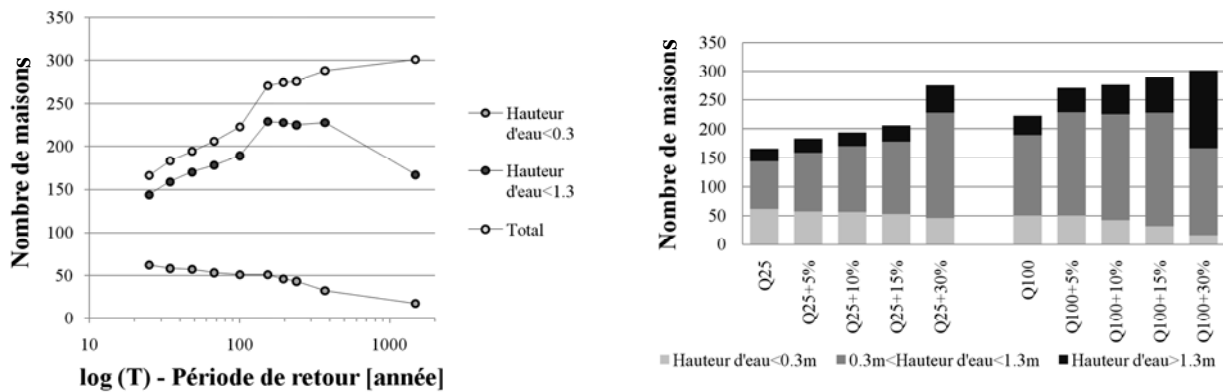
## VALIDATION DE LA PROCEDURE

### Modèle hydrodynamique

Le modèle hydrodynamique exploité, *WOLF2D*, a déjà été validé sur un grand nombre de benchmarks internationaux (ex. Dewals, 2006) mais également sur des cas pratiques par la modélisation de crues sur plus de 800 km de rivière sur l'ensemble de la Région Wallonne (Dewals et al., 2008 ; Erpicum et al., 2008).

### Application de la combinaison des cartes et des bases de données géographiques

Dans cette section, la première étape de la méthodologie de l'évaluation des dommages, à savoir l'identification des biens soumis au risque, est appliquée à la ville de Tilff sur l'Ourthe. De plus, afin de raffiner l'analyse, les maisons touchées par la crue sont classées selon trois catégories de hauteur d'eau, catégories standardisées largement utilisées dans l'analyse de modélisations de débits de crue en Belgique. Les débits modélisés sont basés sur des hypothèses réalistes de l'augmentation des débits statistiques actuels (période de retour de 25 et 100 ans ou « Q25 » et « Q100 ») en fonction de l'évolution climatique. L'intérêt de ce chapitre est de montrer que même préalablement à l'analyse économique, la méthodologie permet d'ores et déjà d'extraire un grand nombre d'informations pour évaluer des mesures de protection contre les inondations.

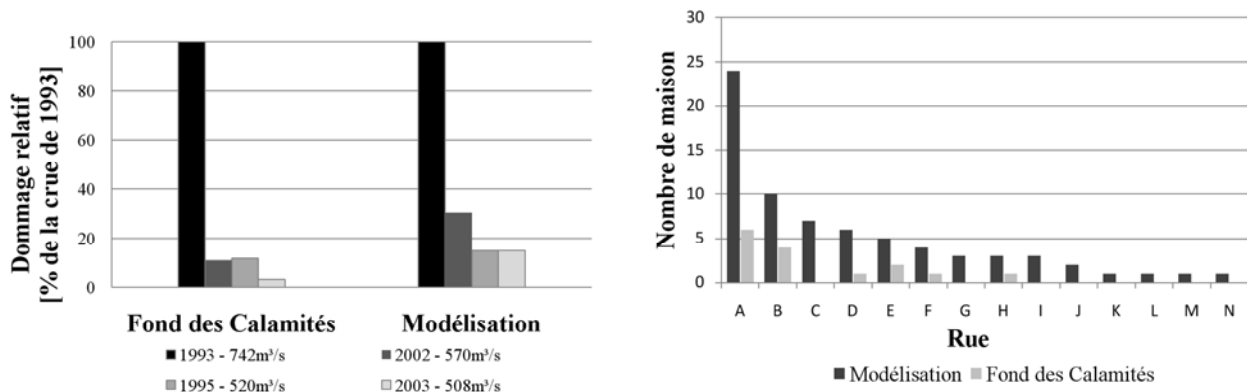


**Figure 5.** Dénombrement du nombre de maisons touchées par les inondations dans la ville de Tilff en fonction des hypothèses d'évolution climatiques.

L'analyse de la **Figure 5** révèle une diminution constante du nombre de maisons touchées dans la classe de hauteur la plus faible au fur et à mesure de l'augmentation du débit. Aux environs du débit correspondant à la crue centennale, il y apparaît une élévation brusque du total de maisons touchées. En effet, cette crue est le débit de dimensionnement d'un mur de protection dans la partie aval de la zone d'étude. Après ce palier, les emprises d'inondation restent assez stables. Par contre, les hauteurs d'eau observées dans les bâtiments augmentent régulièrement, et en particulier pour le débit le plus important (Q100+30%).

### Validation de l'évaluation monétaire des dommages

La validation de l'estimation économique des dommages subis nécessite la connaissance de la valeur réelle des dommages. Pour faire, nous disposons uniquement des données du Fond des Calamités qui est l'organisme chargé d'indemniser les personnes ayant subi des dommages à la suite de catastrophes naturelles. Les valeurs dédommagées sont connues pour chaque rue touchée par l'inondation.



**Figure 6.** Comparaison des coûts relatifs estimés par le modèle et indemnisés par le Fond des calamités.

La figure ci-dessus (Figure 6) compare le dommage subi dans la ville de Tilff lors des quatre inondations majeures au cours des vingt dernières années. Le dommage est présenté en tant que pourcentage du coût des dommages induits par l'inondation de 1993 (crue la plus lourde de conséquences). En l'état actuel d'avancement des recherches, la validation des coûts absolus n'est pas encore envisageable en utilisant les données de validation actuelles, qui ne sont pas assez exhaustives pour une étude de ce type. Néanmoins, sachant que les dédommagements octroyés par les Fond des Calamités sont soumis à l'acceptation d'un dossier qui doit rendre compte de dégâts, il semble fort probable que les valeurs fournies par ce Fonds soient sous-estimées. Cette hypothèse est corroborée par le second graphique de la Figure 6 qui exprime le nombre de bâtiments touchés (plus

de 5 cm d'eau dans le bâtiment) selon la modélisation et ceux qui ont été indemnisés (crue de 2002) rue par rue (A, B, C, etc.). En effet, celui-ci montre qu'il y a environ entre 3 et 4 fois moins de bâtiments indemnisés que de bâtiments réellement affectés par l'inondation.

## EXEMPLE D'ÉVALUATION D'UNE MESURE D'ADAPTATION

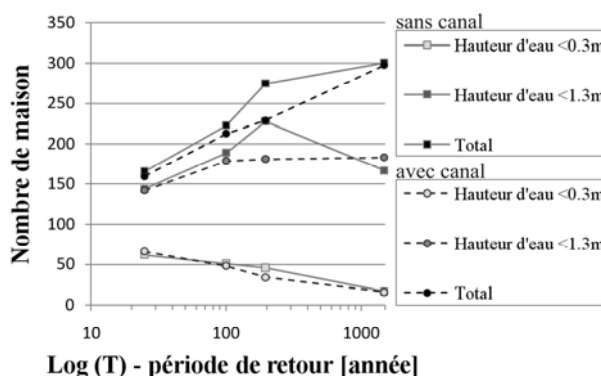
### Présentation du cas d'étude

Le cas d'étude est localisé sur l'Ourthe une dizaine de kilomètre en amont de la confluence avec la Meuse. La mesure de protection qui est évaluée ici consiste en la réhabilitation d'un canal, anciennement exploité pour le transport fluvial sur l'Ourthe, mais qui a été remblayé au siècle passé. L'objectif de cette mesure de protection est de protéger efficacement et donc réduire les dommages pour plusieurs villes présentes le long du cours d'eau.

Bien que des traces du canal soient visibles sur le modèle numérique LiDAR, des recherches historiques et des visites de terrain ont dû être effectuées pour reporter fidèlement le tracé et le gabarit de ce dernier sur le modèle topographique actuel.

### Résultats

Les résultats présentés sont de deux types : premièrement, le décompte des maisons touchées par classe de hauteur d'eau et deuxièmement (Figure 7), les résultats d'évolution des pertes monétaires avec (« Canal réhabilité ») et sans (« Situation actuelle ») la mesure de protection (Tableau 1). Ces résultats fourniront une donnée tangible pour les décideurs quant à l'efficacité de cette mesure d'adaptation.



**Figure 7.** Evolution du nombre de maisons touchées par l'inondation dans chaque classe de hauteur d'eau suite à la réhabilitation de l'ancien canal de l'Ourthe.

**Tableau 1.** Evaluation du bénéfice retiré par la réhabilitation de l'ancien canal de l'Ourthe pour quatre crues statistiques.

Période de retour [année]	Situation actuelle [€]	Canal réhabilité [€]	Gain en %
25	381024	352220	7.6
100	634519	591155	6.8
196	867734	747062	13.9
1480	1314783	1238677	5.8

Bien que la réhabilitation du canal soit non négligeable au niveau de la diminution des dommages, son influence est surtout visible pour la période de retour de 196 ans. Cela est expliqué par le fait qu'un mur de protection initialement dimensionné pour la crue centennale est rendu effectif pour une crue quasi bi-centennale. En ce qui concerne le débit modélisé le plus important, il y a certes

une diminution de la hauteur d'eau moyenne dans les maisons touchées par l'inondation mais le nombre total de maisons touchées ne diminue plus significativement, ce qui explique la plus faible diminution des dommages.

## CONCLUSIONS

Dans cet article, une méthodologie innovante d'évaluation à « micro échelle » de mesures de protection contre les impacts d'inondations a été présentée et appliquée à un cas particulier sur une rivière en Belgique. Bien que certains pans de cette recherche multidisciplinaire doivent encore être approfondis, notamment au niveau de la validation de l'analyse économique mais aussi en ce qui concerne la quantification des incertitudes dans l'ensemble du processus, il a été démontré que l'outil d'aide à la décision développé permet une planification sûre et objective de mesures de protection possibles.

## REMERCIEMENTS

Une partie de ces recherches a été menée avec le soutien de la *Politique Scientifique Fédérale (BELSPO)* dans le cadre du programme « *Science pour un Développement Durable* ». Les auteurs remercient également le Service Public de Wallonie pour la mise à disposition des modèles numériques de terrain et des autres données géographiques.

## REFERENCES

- Dewals, B.J., *Une approche unifiée pour la modélisation d'écoulements à surface libre, de leur effet érosif sur une structure et de leur interaction avec divers constituants*. 2006, Thèse de doctorat, Université de Liège : 636 p.
- Dewals, B.J., S. Detrembleur, P. Archambeau, S. Erpicum and M. Pirotton, *Detailed 2D hydrodynamic simulations as an onset for evaluating socio-economic impacts of floods considering climate change*, in Proc. European Conference on Flood Risk Management - FloodRisk 2008. 2008, Balkema: Rotterdam.
- Dushmanta, D., H. Srikantha et M. Katumi, *A mathematical model for flood loss estimation*. J. Hydrol., 2003. **277**: p. 24-49.
- Ernst, J. *Développement d'une procédure automatisées de segmentation de données LiDAR appliquée à la modélisation hydrodynamique*. Mémoire de DEA, Université de Liège, 2007.
- Ernst, J., B. J. Dewals, S. Detrembleur, P. Archambeau, S. Erpicum et M. Pirotton (2008). *Integration of accurate 2D inundation modelling, vector land use database and economic damage evaluation*. Proc. European Conference on Flood Risk Management - FloodRisk 2008. Rotterdam, Balkema.
- 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.
- Erpicum, S., B. J. Dewals, P. Archambeau, S. Detrembleur et M. Pirotton, *Detailed 2D numerical modeling for flood extension forecasting*. Proc. 4th Int. Conf. on Fluvial Hydraulics, 2008.
- FloodSite (2006). Guidelines for socio-economic flood damage evaluation: 170.
- International Commission for the Protection of the Rhine. *ICPR Rhine atlas*. 2001.
- McMillan, H. K. et J. Brasington, *End-to-end risk assessment: A coupled model cascade with uncertainty estimation*. Water Resources Research, 2008. **44**(W03419): p. 14.
- Penning-Rowsell, E. C., C. Johnson, S. M. Tunstall, S. M. Tapsell, J. Morris, J. B. Chatterton, A. Coker et C. Green (2003). *The Benefits of Flood and Coastal Defence: Techniques and Data for 2003*, Flood Hazard Research Centre, Middlesex University.
- Thieken, A. H., V. Ackermann, F. Elmer, H. Kreibich, B. Kuhlmann, U. Kunert, H. Maiwald, B. Merz, M. Müller, K. Piroth, J. Schwarz, R. Schwarze, I. Seifert et J. Seifert, *Methods for the evaluation of direct and indirect flood losses*. Proc. 4th Int. Symp. on Flood Defence, Toronto, Canada, 2008.