

HACH - LABORATOIRE  
D'HYDRODYNAMIQUE APPLIQUÉE ET  
DES CONSTRUCTIONS HYDRAULIQUES  
DE L'UNIVERSITÉ DE LIÈGE

## Modélisation hydrodynamique des zones inondables en Région wallonne

### Contexte

En 2001, le gouvernement wallon arrête la méthodologie applicable à la détermination des zones inondables en Région wallonne conduisant, par le biais d'une subvention à l'Aquapôle, à l'élaboration de deux cartographies : la carte d'aléa inondation et la carte de dommages. Parmi les méthodes employées, la modélisation hydrodynamique en quasi trois dimensions couvre plus de 800 kilomètres de rivière. Elle a été confiée au Laboratoire d'Hydrodynamique Appliquée et des Constructions Hydrauliques (HACH) de l'Université de Liège, développeur et dépositaire d'un des rares modèles numériques capable de réaliser ce genre de simulation.

La réalisation d'une étude de ce type constitue un réel défi à plusieurs points de vue. Une modélisation hydrodynamique quasi tridimensionnelle à si large échelle n'a en effet jamais été envisagée, d'autant plus avec des données topographiques aussi précises sur l'ensemble du filaire des rivières à traiter. Signalons dès à présent que c'est cette même disponibilité de données de qualité, couplée avec l'augmentation sans cesse croissante des potentialités de calcul informatique, qui a permis une application du code Wolf2D aussi efficace et osée par son étendue.

### La suite logicielle WOLF

Parmi tous les domaines de l'hydraulique touchés par le numérique, l'intérêt du HACH à modéliser l'ensemble des écoulements à surface libre résulte simplement de leur prépondérance dans les phénomènes hydrodynamiques influents sur lesquels nous pouvons agir. A l'échelle du système hydrologique global, le souci de gérer, donc d'anticiper les phénomènes naturels et accidentels, conduit ainsi à couvrir avec des approches physiquement basées les différentes étapes que connaît la goutte d'eau lorsqu'elle frappe la surface terrestre. Cela va du ruissellement au gonflement des rus, rivières et zones de stockage, jusqu'aux grands fleuves et voies intérieures de navigation.

Toujours consécutif à une analyse rigoureuse des conditions de terrain, le travail de modélisation est entièrement réalisé au sein du HACH avec des outils réunis dans la

suite logicielle WOLF. Ceux-ci sont complètement développés en interne. Il s'agit là d'un atout déterminant à la fois pour interpréter adéquatement les résultats mais surtout pour pouvoir rester flexible en validant, en faisant évoluer et en intégrant aux modèles des fonctionnalités supplémentaires au gré de comparaisons permanentes avec des modélisations physiques menées au laboratoire et/ou avec des observations de terrain.

La suite WOLF [5] a l'ambition de couvrir la totalité du cycle terrestre de l'eau, depuis la modélisation physiquement basée du ruissellement hydrologique sur le bassin versant (WOLFHydro) jusqu'à la propagation d'ondes de rupture de barrage en topographie réelle érodable à l'aide de modèles quasi tridimensionnels intégrés sur la hauteur (WOLF2D) en passant par la modélisation de grands réseaux de rivière par approches unidimensionnelles (WOLF1D). Chacun des modèles peut, en outre, être chapeauté par un logiciel d'optimisation des paramètres basé sur les algorithmes génétiques (WOLF-AG) ou bien fonctionner avec des modules intégrant des équations complémentaires de transport (eau-polluant, eau-air, eau-solide, turbulence).

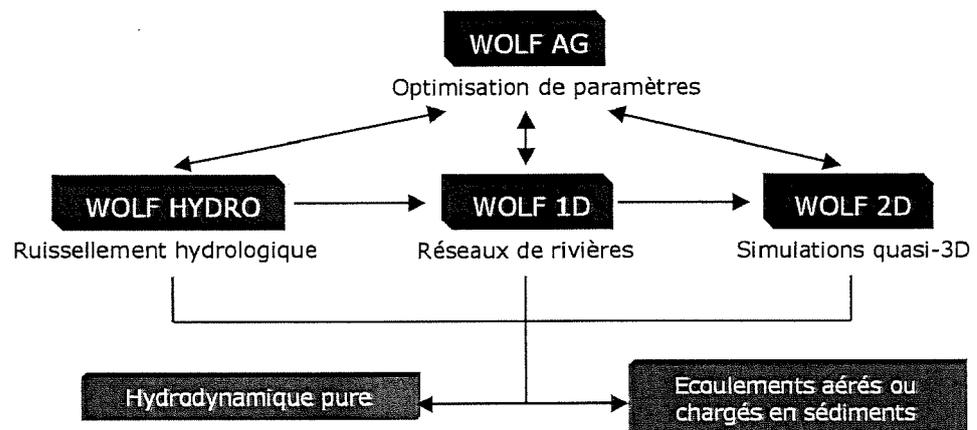


Figure 1 • Organigramme de la suite logicielle WOLF

Dans le cadre de la détermination des zones inondables, c'est le modèle quasi tridimensionnel WOLF2D qui est utilisé. Même s'il permet la modélisation de phénomènes instationnaires en régime quelconque (infra ou supercritique avec apparition et extinction de ressaut), la méthodologie mise au point pour la convention zones inondables prévoit un débit de crue suffisamment persistant pour générer un résultat stationnaire qui est exploité pour la détermination de la carte d'aléa.

## Méthodologie

Les différentes étapes de la modélisation, mises au point au sein du HACH et approuvées par le Groupe Transversal Inondations, consistent tout d'abord en l'établissement d'un modèle numérique de terrain (MNT) du lit majeur et du lit mineur des rivières. Ce MNT sert ensuite de base à la réalisation d'un modèle hydrodynamique qui est validé en simulant une crue historique documentée par des mesures de hauteurs d'eau, des relevés de laisses de crues, des photographies aériennes ou encore des informations glanées auprès des riverains. Enfin, les modélisations de débits de récurrence (périodes de retour de 25, 50 et 100 ans), issus d'études statistiques, fournissent des cartes d'emprises d'inondation, caractérisées par des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement, pour un événement d'occurrence donnée. Toutes ces informations sont exploitées pour générer la carte de l'aléa inondation.

Sur les 800 kilomètres de rivière qui seront ainsi modélisés à travers le territoire wallon, ces informations de submersion seront fournies sur un maillage régulier dont la surface des mailles varie entre 4 et 25 m<sup>2</sup> selon la taille du cours d'eau. L'erreur altimétrique du calcul est nettement inférieure à 10 cm.

La carte synthétique du réseau hydrographique wallon (fig. 2) illustre l'état d'avancement du travail avec les principaux cours d'eau actuellement étudiés par le HACH (en traits continus verts) et ceux qui seront modélisés d'ici juin 2007 (délimités par des points bleus).

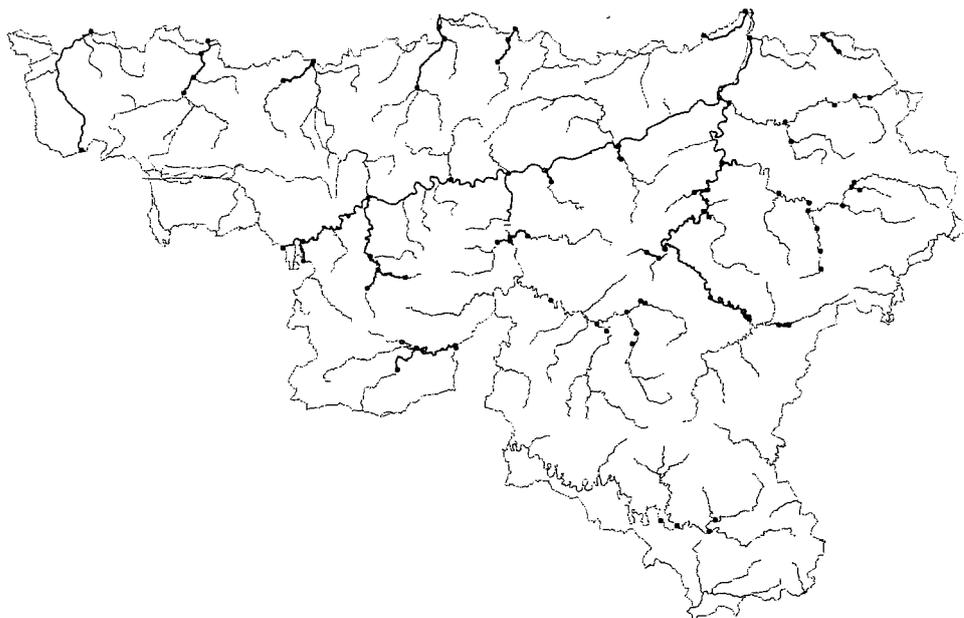


Figure 2 • Réseau hydrographique wallon simplifié, modélisations numériques du HACH terminées (traits verts), en cours (traits rouges) et futures (points bleus)

## Modèle numérique de terrain

### DONNÉES DE BASE

Comme données de base, la Région wallonne a acquis, au début des années 2000, un modèle numérique de terrain remarquable par sa précision et la densité de son information. Généré par passage d'un laser interférométrique embarqué à bord d'un avion (Fig. 3a), il est constitué de données altimétriques d'une précision de 15 cm sur des mailles carrées de 1 m de côté couvrant la majeure partie des cours d'eau de la Région wallonne.

La méthode du laser interférométrique ne permet pas de traverser la végétation dense et ne traverse pas non plus la surface de l'eau. En conséquence, il est nécessaire d'obtenir des informations complémentaires permettant de reconstituer l'information du lit mineur des rivières notamment.

Pour les cours d'eau navigables, une méthode de balayage a également été utilisée. Elle consiste à embarquer un sonar multifaisceaux à bord d'un bateau (Fig. 3b et c). L'information numérique fournie est identique à celle issue du levé laser, avec également une résolution de 1 point par mètre carré. La superposition adéquate des deux informations (laser et sonar) permet d'obtenir rapidement un modèle numérique de terrain complet, pratiquement opérationnel, constitué de plusieurs millions de mailles (Fig. 4).

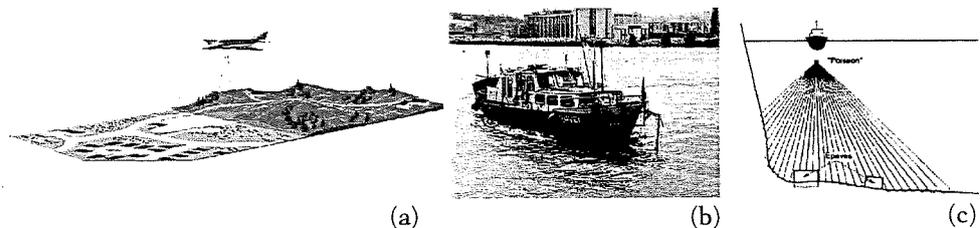


Figure 3 - Principe du levé topographique par laser interférométrique (a) et par sonar multifaisceaux (b et c)

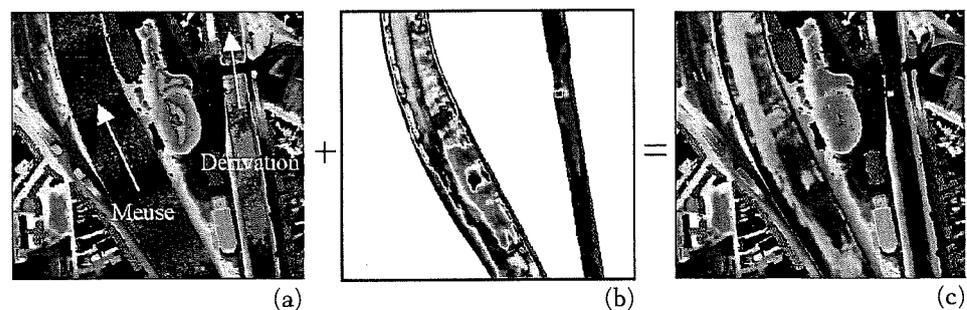


Figure 4 - Levé laser (a), levé bathymétrique (b), superposition des 2 informations (c) sur la Meuse et la Dérivation à Liège

Dans le cas des cours d'eau non navigables, le relevé par sonar n'est pas envisageable et le travail de reconstitution de la topographie distribuée du lit mineur doit être effectué à partir des seules données disponibles de sections transversales variablement espacées le long du cours d'eau. Un procédé d'interpolation en trois dimensions de cette information a entièrement été développé au sein du HACH. Sans cesse validé et amélioré par les résultats obtenus au cours des différentes modélisations, il permet de générer efficacement l'information manquante (Fig. 5).

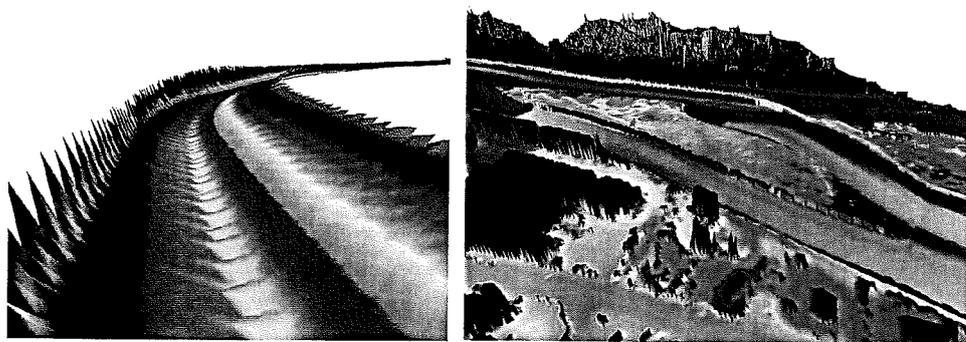


Figure 5 - Vue tridimensionnelle de la topographie d'un lit mineur générée par interpolation de sections transversales et assemblage avec l'information du laser - L'Ourthe à Tilff

### SINGULARITÉS

Malgré la précision du levé laser et du procédé d'interpolation, des situations parfois complexes, souvent liées à la présence de structures d'origine humaine, peuvent se présenter ponctuellement. Le modélisateur est alors contraint, après une analyse détaillée du site, de corriger le MNT manuellement. Ce travail est extrêmement important car les singularités topographiques jouent généralement un rôle primordial dans l'écoulement de la rivière et des débordements qui y sont liés. En pratique, la géométrie de ces particularités est appréhendée en croisant diverses informations topographiques fournies par l'Administration avec des renseignements glanés lors de visites de terrain, indispensables à l'actualisation des données.

Les singularités le plus souvent rencontrées sont constituées de déversoirs, de piles de pont, de murs anti-crues,... Un ruisseau illustrant parfaitement ces considérations est le Hoyoux, affluent de la Meuse, où une succession impressionnante de ces particularités existe (Fig. 6).

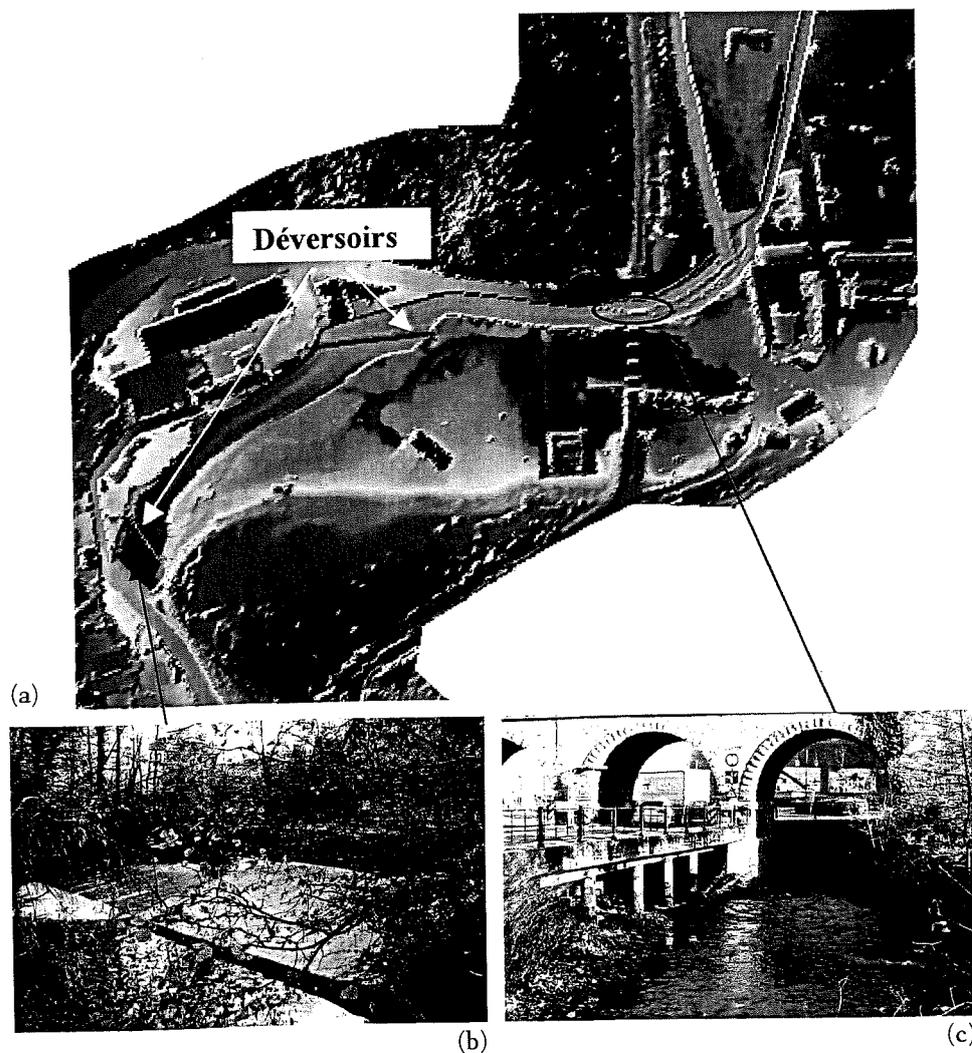


Figure 6 - Modèle numérique de terrain d'un tronçon du Hoyoux (a) - Déversoir oblique dans la rivière (b) et piles de pont dans la rivière avec recouvrement partiel du cours d'eau (c)

#### CORRECTION DU MNT

La dernière manipulation à réaliser pour finaliser le MNT consiste à valider l'information sur le lit majeur du cours d'eau. La technologie du laser interférométrique permet d'obtenir deux valeurs d'altitude pour un même point. La première, appelée «premier écho», représente le sommet de la végétation, tandis que la seconde, le «second écho», fournit la valeur théorique du niveau de sol. Dans un cas de végétation fort dense, il est cependant impossible de traverser totalement le couvert-végétal et d'atteindre le sol. La végétation apparaît alors comme une surélévation dans le modèle numérique de terrain qui est interprétée comme une obstruction artificielle pour le passage de l'écoulement. L'opération de correction consiste à supprimer ces anomalies en recréant le plus fidèlement possible le niveau du sol réel (Fig. 7).

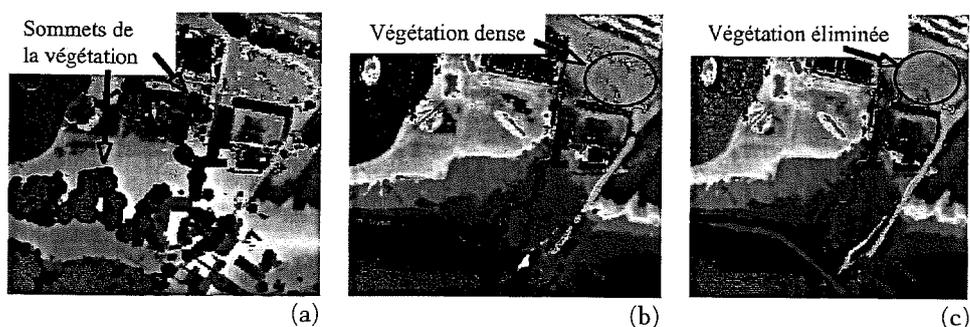


Figure 7 - Modèle laser premier écho (a) et second écho (b) - Modèle numérique de terrain épuré (c)

### SYNTHÈSE

Au final, le résultat obtenu est souvent saisissant. Par exemple, la figure 8 représente, à Ham-sur-Heure sur l'Eau d'Heure, le levé laser brut d'une part et le MNT final obtenu après creusement du lit mineur, ajout des singularités et élimination de la végétation dans le lit majeur d'autre part.

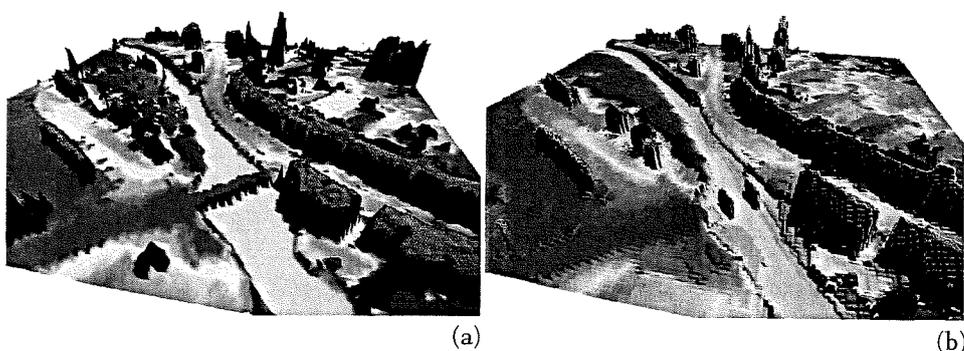


Figure 8 - Vue tridimensionnelle du levé laser brut (a) et du MNT final (b)

C'est sur ce modèle topographique final que la simulation d'un débit de crue historique est réalisée. Ce test de pertinence permet de valider le seul paramètre inconnu de frottement, propre à chaque tronçon de rivière, ainsi que de mettre en évidence d'éventuelles singularités topographiques non encore décelées ou intégrées (travaux et dragages récents, ...).

## Exemples de validation

Au terme du travail préparatoire, long et complexe, d'un MNT pertinent pour la modélisation hydraulique, le modèle est apte à représenter les emprises inondables avec une précision largement inférieure à 10 cm en altitude. De nombreuses informations peuvent alors être tirées, dépassant largement le cadre de la construction de la carte d'aléa, telles que le mode de fonctionnement des lits majeurs, des profils de vitesses distribués sur la largeur de la plaine inondable, des zones d'intervention prioritaires pour le gestionnaire sur base de l'analyse du nombre de Froude ou d'autres nombres adimensionnels, ...

Les exemples qui suivent, montrent la précision et la fiabilité des modélisations réalisées ainsi que la richesse des résultats générés. La confrontation des emprises d'inondations simulées avec les observations réalisées lors d'événements réels est éloquent, par exemple dans le cas de l'Ourthe à Rendeux (Fig. 9) ou à Tabreux (Fig. 10).

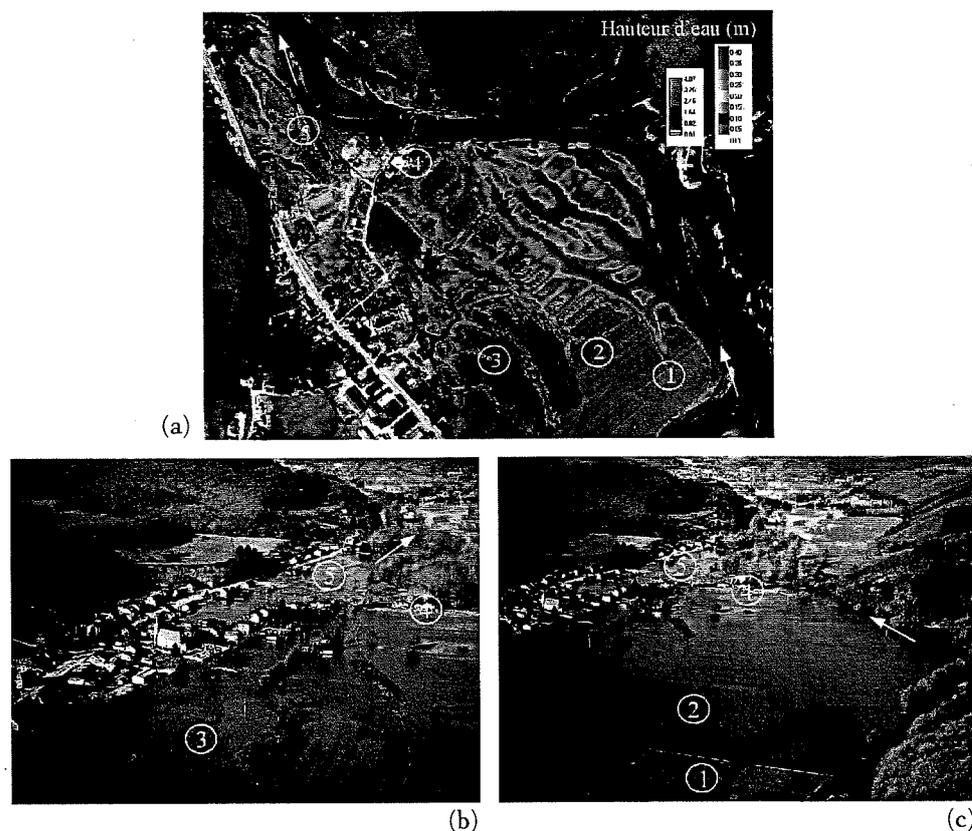


Figure 9 - Exemple de validation sur l'Ourthe à Rendeux : crue de février 2002. Résultats de la modélisation numérique (a - hauteurs d'eau en m) et photographies aériennes des zones inondées (b et c)

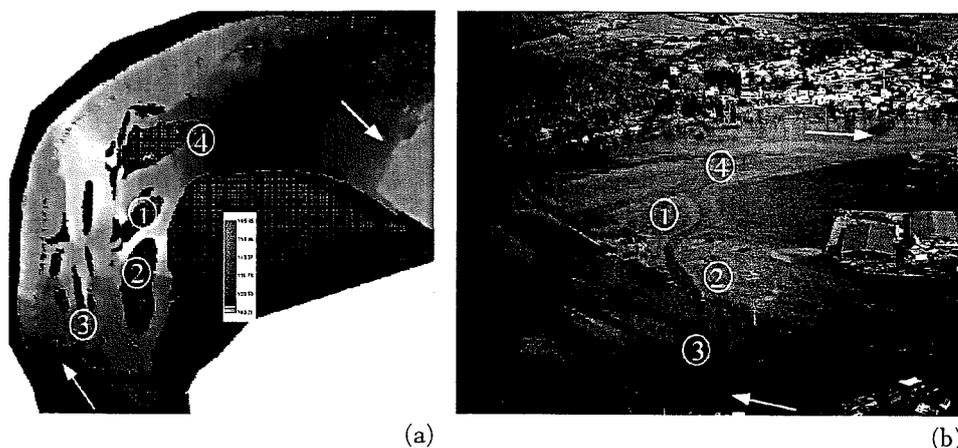


Figure 10 • Exemple de validation sur l'Ourthe à Tabreux : crue de février 2002. Résultats de la modélisation numérique (a - altitudes de surface libre en m) et photographie aérienne des zones inondées (b)

On comprend aisément à l'examen de ces images que toute erreur dans la modélisation des phénomènes physiques hydrodynamiques ou toute imprécision sur le MNT utilisé conduirait directement à une incompatibilité des informations générées par rapport à la réalité des événements observés.

Ce constat est valable aussi bien dans les zones bâties où la simulation permet une analyse rue par rue (Fig. 11) que dans les zones moins urbanisées où l'extension des zones inondées et le développement de chemins préférentiels d'écoulement sont intimement liés à des variations souvent imperceptibles de la topographie (Fig. 12).



Figure 11 • Exemple de validation sur l'Eau d'Heure à Ham-sur-Heure : crue de février 2002. Résultats de la modélisation numérique (a - hauteurs d'eau) et photographie aérienne des zones inondées (b)

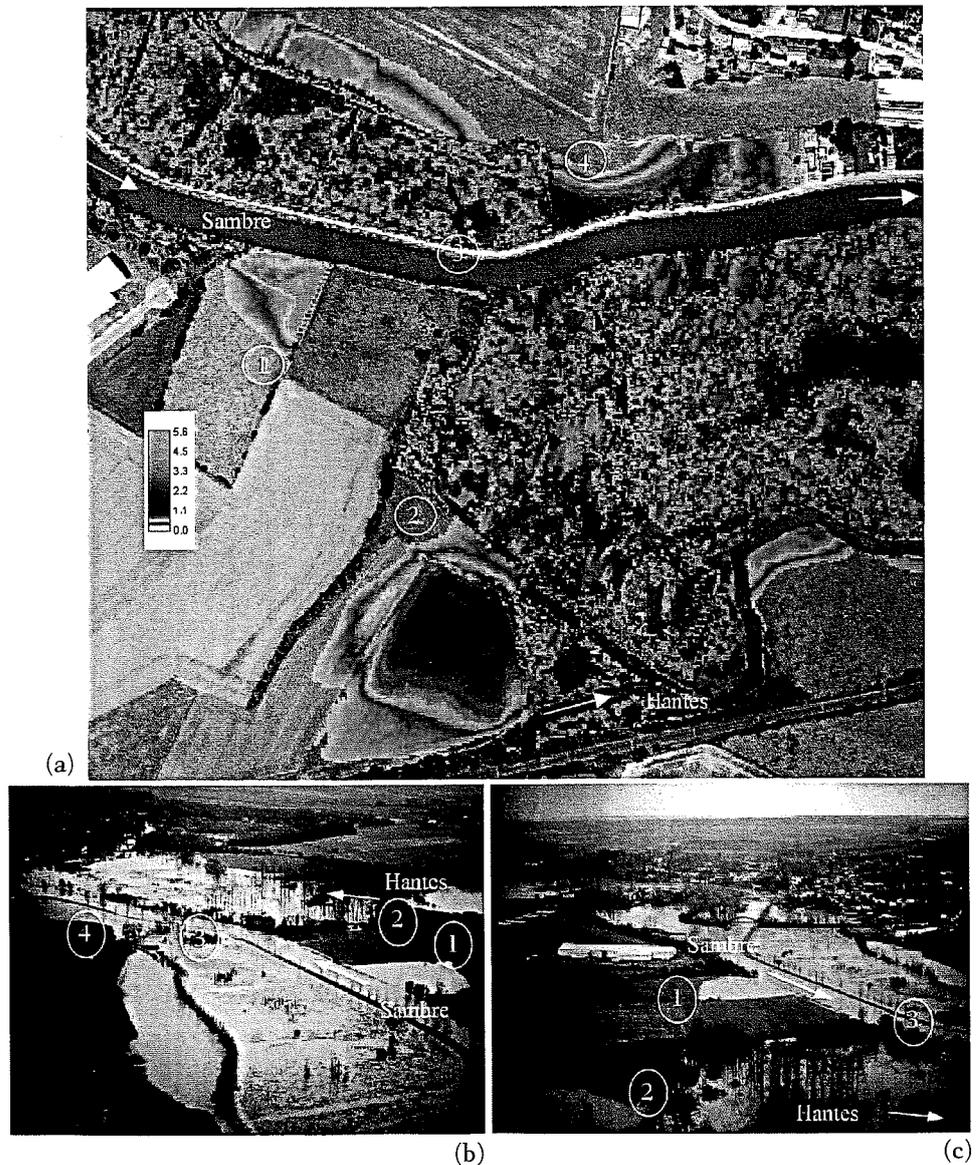


Figure 12 • Exemple de validation à la confluence Hantes - Sambre : crue de février 2002. Résultats de la modélisation numérique (a - hauteurs d'eau) et photographies aériennes des zones inondées (b et c)

En complément de l'information de hauteur de submersion, la distribution du champ des vitesses d'écoulement fournit un second élément capital d'analyse du risque lié à l'inondation. Les résultats issus de la modélisation sont à ce titre également éloquentes, comme sur l'Ourthe à Tatreux (figure 13), où une partie des écoulements court-circuitent un méandre de la rivière. Ce genre de résultat souligne l'absolue nécessité d'avoir recours pour ces simulations à un modèle bidimensionnel, une approche filaire étant par nature incapable d'appréhender des écoulements hors de l'axe principal du lit mineur du cours d'eau.

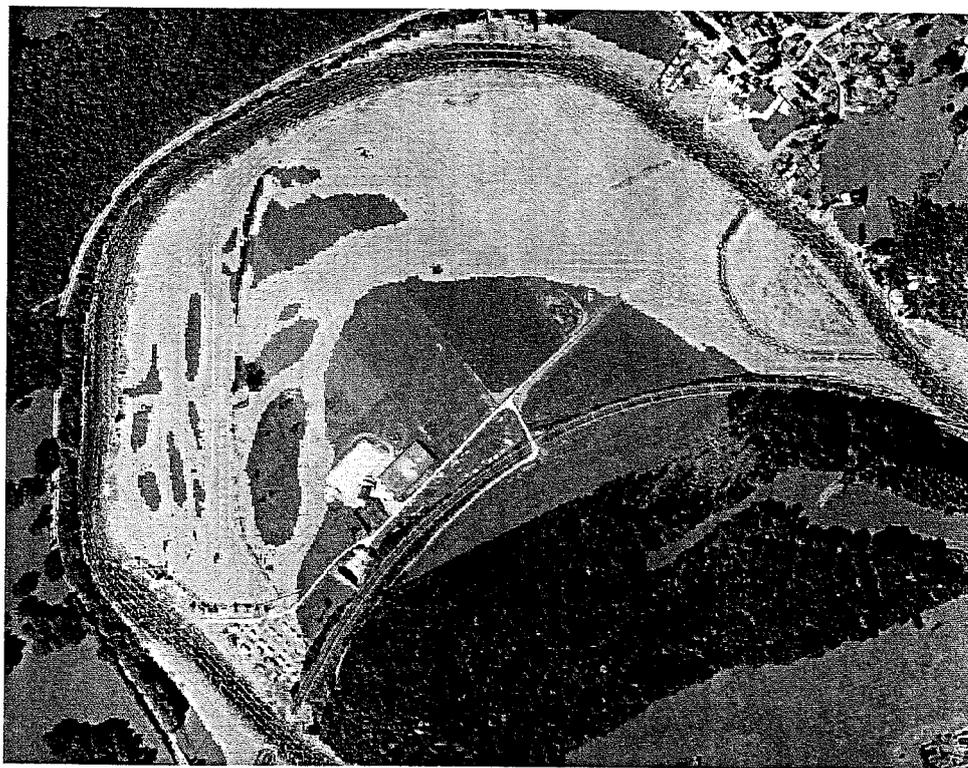


Figure 13 • Champs des vitesses d'écoulement en février 2002 à Tabreux sur l'Ourthe

Finalement, les résultats fournis par WOLF2D permettent de mettre en évidence des changements de régime hydraulique, notamment au droit de discontinuités topographiques. Dans le cas de la figure 14 qui représente la distribution du nombre de Froude de l'écoulement dans un tronçon de la Vesdre à Verviers, les couleurs bleue et rouge témoignent d'un régime infracritique tandis que le passage sur la discontinuité provoque un passage en régime supercritique, couleur jaune, et un ressaut pour permettre à l'écoulement de réintégrer le régime infracritique. Ce genre de résultat reste de nouveau parfaitement validé par l'observation (Fig. 14) et constitue une donnée importante pour orienter le gestionnaire du cours d'eau dans son choix de zones prioritaires à privilégier pour améliorer le régime hydraulique en situations d'inondation sensibles.

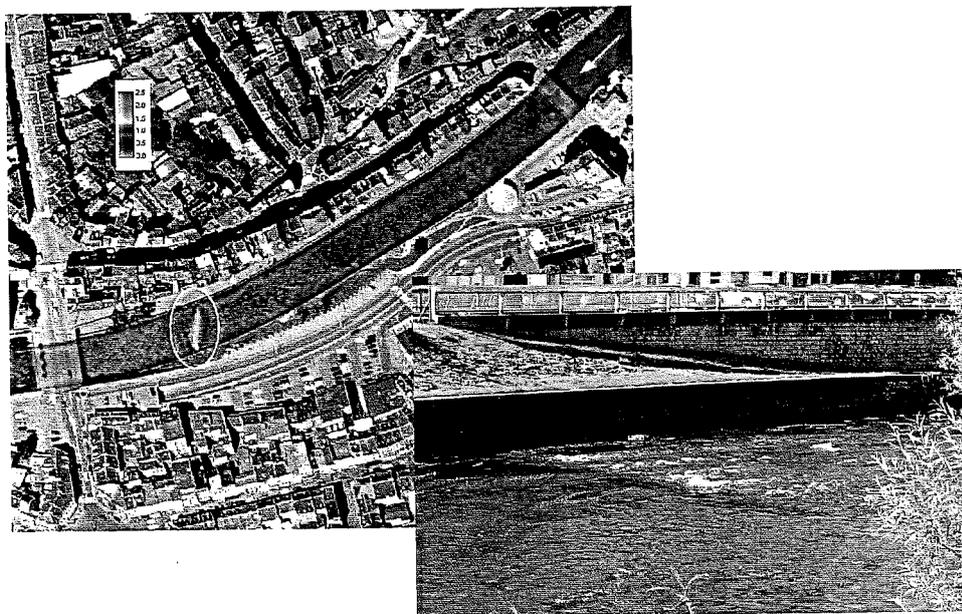


Figure 14 • Représentation du nombre de Froude sur la Vesdre lors de sa traversée de Verviers - Mise en évidence d'un changement de régime d'écoulement et validation sur site

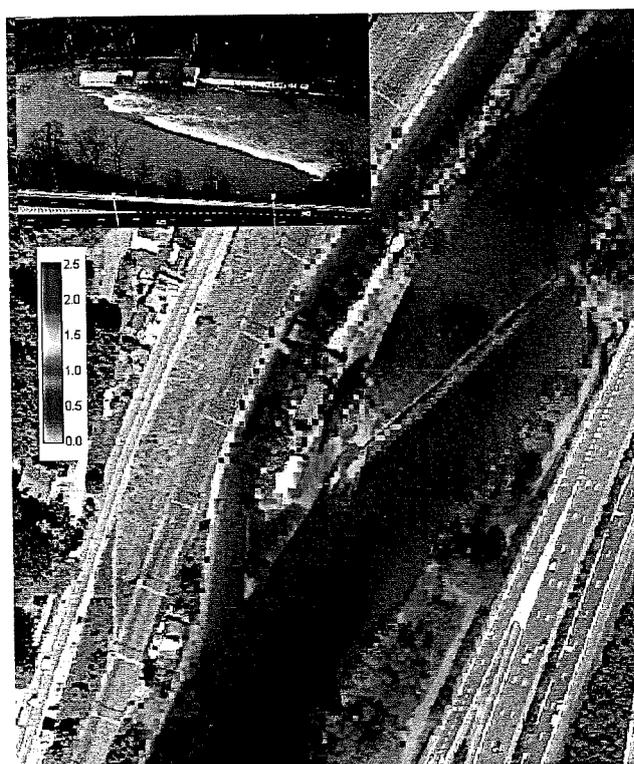


Figure 15 • Représentation du nombre de Froude sur L'Ourthe au niveau de Campana - Mise en évidence d'un changement de régime d'écoulement suite au passage sur le seuil déversant et validation sur site

## Carte d'aléa brut

La phase finale de la modélisation consiste évidemment à générer les données à la base de l'établissement des cartes de l'aléa inondation. Pour des valeurs de débit statistique correspondant à des récurrences déterminées, des modélisations prospectives sont donc réalisées. Les caractéristiques des inondations subséquentes permettent d'établir des cartes d'aléa brut du risque d'inondation. Défini en chaque maille comme faible, moyen ou élevé, l'aléa brut est directement issu du croisement de l'information de hauteur de submersion avec la période de retour du débit envisagé (Fig. 16).

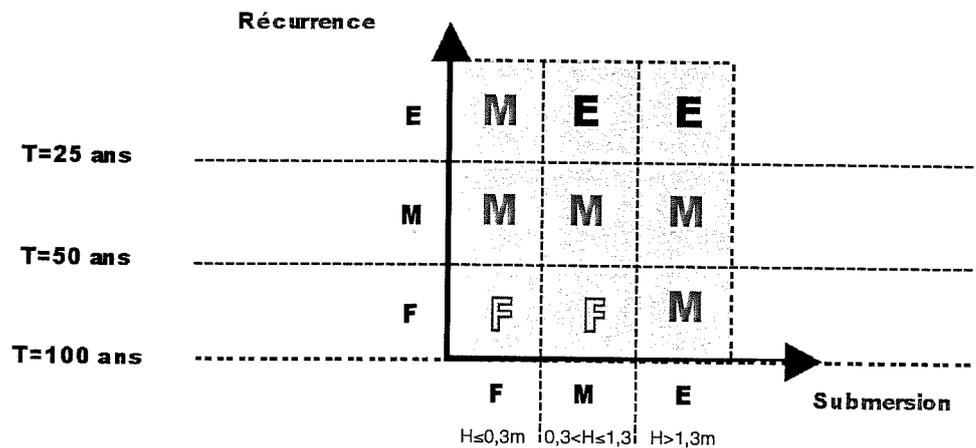


Figure 16 • Tableau permettant la création d'un aléa brut

La figure 17 illustre un exemple de carte d'aléa brut réalisé sur la Dyle. Ce résultat représente la dernière étape de la modélisation réalisée par le HACH et précède de ce fait directement le travail de mise en forme cartographique proprement dit, intégrant d'autres soucis de données, et qui conduit à la publication de la carte du risque d'inondation.

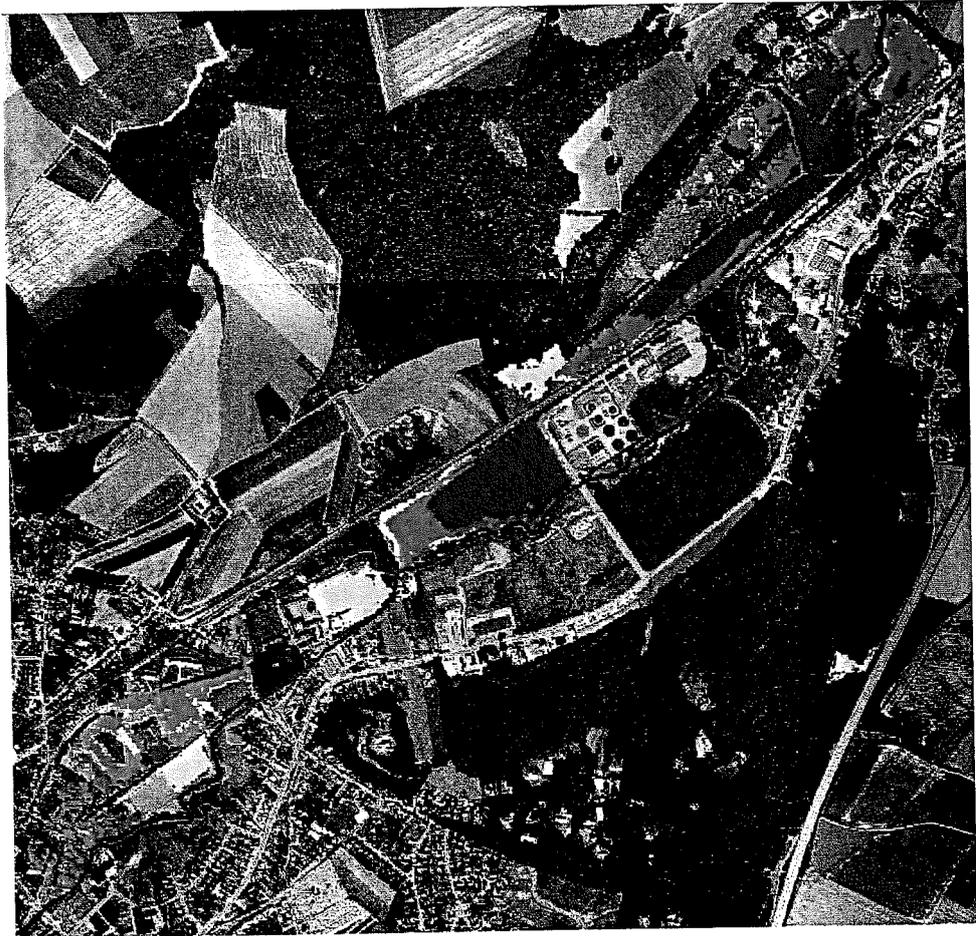


Figure 17 • Carte de l'aléa brut (faible (jaune), moyen (orange), élevé (rouge)) sur la Dyle

## Conclusions

L'utilisation de WOLF2D entièrement développé en région wallonne, au Laboratoire d'Hydrodynamique Appliquée et des Constructions Hydrauliques (HACH) de l'Université de Liège, permet d'obtenir des reproductions fiables des crues historiques sur l'ensemble des rivières actuellement modélisées. Quelle que soit l'application envisagée, cette adéquation remarquable est sans cesse éprouvée et validée par le biais de comparaisons avec des modèles physiques construits au laboratoire mais également avec de nombreux cas tests émanant tant de projets belges qu'europeens.

La multiplicité des types de résultats disponibles et la prise en compte des différentes singularités présentes dans les cours d'eau offrent la possibilité d'appréhender au mieux le fonctionnement des rivières et des débordements qui en découlent.

Au-delà des modélisations de crues historiques utiles à la validation, WOLF2D offre non seulement la possibilité de prédire des emprises inondables pour des périodes de retour plus exceptionnelles, mais également de tester la pertinence de solutions de remédiation imaginées par le gestionnaire, intervenant alors comme véritable outil d'aide à la décision.

Fruit de nombreuses années de recherche et de développement scientifique, WOLF apparaît ainsi comme totalement opérationnel et efficace pour des simulations grandeur nature à large échelle grâce à l'évolution rapide des technologies tant au niveau du calcul que de l'acquisition de données.

## Remerciements

Les auteurs remercient les différents services compétents de l'Administration pour la mise à disposition des données dans le cadre de cette publication.

## Bibliographie

- ARCHAMBEAU P. et AL., *A set of efficient numerical tools for floodplain modeling*, in *Shallow Flows*, G.H. Jirka and W.S.J. Uijtewaal, Editors 2004, Balkema: Leiden, etc. p. 549-557.
- ARCHAMBEAU P. et AL., *New trends in flood risk analysis: working with 2D flow models, laser DEM and a GIS environment*, in *Proc. 2nd Int. Conf. on Fluvial Hydraulics: River Flow 2004*, M. Greco, A. Carravetta, and R. Della Morte, Editors, 2004, Balkema: Leiden, etc. p. 1395-1401.
- ARCHAMBEAU P. et AL., *Modern techniques for flood risk analysis: quasi-3D simulations in a GIS environment in European Geosciences Union - General Assembly 2005*, Vienne, Autriche.
- ERPICUM S. et AL., *Computation of the Malpasset dam break with a 2D conservative flow solver on a multiblock structured grid in Proc. 6th Int. Conf. of Hydroinformatics*, 2004, Singapore.
- PIROTTON M. et AL., *Le modèle WOLF : outil de modélisation d'écoulement de crue, de dimensionnement et de gestion des ouvrages hydrauliques*, La Tribune de l'Eau, 2004, 56(624-4): p. 13-24.