



**HAL**  
open science

# Runoff hazard assessment in urban environment: strategies for high resolution topographic data use in 2D hydraulic modelling

M. Abily, C. Scarceriaux, Claire-Marie Duluc

## ► To cite this version:

M. Abily, C. Scarceriaux, Claire-Marie Duluc. Runoff hazard assessment in urban environment: strategies for high resolution topographic data use in 2D hydraulic modelling. TSM. Techniques Sciences Méthodes – Génie urbain, génie rural, 2015, 5, pp.31-46. 10.1051/tsm/201505031 . hal-04215647

**HAL Id: hal-04215647**

**<https://hal.science/hal-04215647>**

Submitted on 22 Sep 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Ruissellement de surface en milieu urbain : stratégies d'intégration de données topographiques haute résolution en modélisation hydraulique 2D

■ M. ABILY<sup>1</sup>, C. SCARCERIAUX<sup>2</sup>, C.-M. DULUC<sup>3</sup>

Mots-clés : modélisation hydraulique à surface libre, LiDAR, photogrammétrie, Mike 21, Mike Flood

Keywords: free surface hydraulic modelling, LiDAR, photogrammetry, Mike 21, Mike Flood

## Introduction

Dans le cadre de la réalisation des plans de préventions des risques naturels prévisibles d'inondations (PPRI), de la mise en place des plans d'actions de prévention contre les inondations (PAPI) ou encore dans un contexte d'évaluation de sûreté d'installations industrielles [ASN, 2013], les outils de modélisation numérique bidimensionnelle (2D) sont couramment utilisés. La démarche « modélisation 2D » est une réponse à l'intégration du risque inondation dans les projets d'aménagements des collectivités. Des villes telles que Paris, Marseille ou Nice ont déjà intégré cette approche dans leur politique de gestion des risques d'inondation.

L'importance de la qualité des données topographiques utilisées en entrée des outils de modélisation numérique 2D dans les études d'hydrauliques a été soulignée dans de nombreux travaux [Mark *et al.*, 2004 ; SCHUBERT *et al.*, 2008 ; GOURBESVILLE, 2009]. Les techniques et technologies aéroportées d'acquisition de données topographiques fines et denses, dites haute résolution (HR), telles que le LiDAR et la photogrammétrie, se sont démocratisées

lors de la dernière décennie [ABDALLAH, 2005 ; VALLET, 2010]. Ces techniques, pouvant être embarquées sur des avions ou sur des drones [REMONDINO *et al.*, 2011], autorisent l'accès à une gamme de données fournissant une information topographique HR adaptable à différentes échelles et pour différentes problématiques. De nombreuses sociétés de service en géomatiques ont intégré à leur offre technique des produits de type « modèles numériques d'élévation » (MNE) sous la forme de « modèle numérique de terrain » (MNT) ou de « modèle numérique de surface » (MNS) constitués à partir de l'information topographique HR.

Les données topographiques HR sont de plus en plus utilisées dans des études et projets hydrauliques simulant des inondations d'origine fluviale ou côtière en milieu urbain [AKTARUZZAMAN et SCHMIDT, 2009 ; TSUBAKI et FUJITA, 2010]. La plus-value de l'emploi de ces données HR pour la modélisation de scénarios de ruissellement de surface est prometteuse [GOMEZ *et al.*, 2011 ; ABILY *et al.*, 2013]. Néanmoins, il convient de rappeler qu'une utilisation convenable des données topographique HR nécessite une connaissance approfondie sur les avantages et limites de ces données et sur leur mise en œuvre dans des outils de modélisation numérique. En effet, les outils commerciaux de modélisation numérique, classiquement utilisés en ingénierie, n'avaient pas vocation au moment de leur création à intégrer une donnée de cette nature, ni à être utilisés pour la modélisation de

<sup>1</sup> Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire – PRP-DGE\SCAN\BEHRIG & Université de Nice Sophia Antipolis\URE 005 Innovative-CiTy – Polytech Nice Sophia – 930, route des Colles – 06903 Sophia Antipolis.  
Courriel : abily@polytech.unice.fr

<sup>2</sup> Safège, délégation Méditerranée Outre Mer, Space B – 208, route de Grenoble – 06200 Nice.

<sup>3</sup> Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire – PRP-DGE\SCAN\BEHRIG – 31, avenue de la Division-Leclerc – 92260 Fontenay-aux-Roses.

phénomènes de ruissellement en milieux complexes. Ainsi, des pratiques, voire des méthodologies spécifiques doivent être définies et mises en œuvre pour l'intégration des données topographiques HR dans des études d'ingénierie basées sur l'utilisation d'outils de modélisation numérique 2D standard.

L'objectif de cet article est de faire ressortir des bonnes pratiques et méthodes à mettre en œuvre lorsque des données HR sont utilisées dans des modèles hydrauliques 2D en milieu urbain et industriel ainsi que des limites associées à l'emploi de cette donnée. Pour cela, deux études effectuées à Nice utilisant :

- deux jeux de données topographiques HR ;
- deux schémas de modélisation numériques différents ;

à deux échelles différentes sont ici présentées. Le § 1 présente le jeu de données topographiques HR utilisé. Le § 2 détaille la méthodologie employée pour intégrer la donnée topographique HR dans deux cas d'étude. Enfin, le § 3 met en relief les avantages et limites de ces approches d'intégration de la donnée topographique HR.

## 1. La donnée topographique haute résolution

### 1.1. Lidar

La technologie LiDAR (pour *light detection and ranging*), permet l'acquisition de données topographiques via l'utilisation de scanner laser aéroportés. Les impulsions émises par le scanner seront réfléchies par les objets se trouvant sur son chemin et reçues par le capteur embarqué, fournissant directement l'information de distance entre le capteur et les cibles atteintes [MUSIALSKI *et al.*, 2013]. Cette information fournit un nuage de points géoréférencé où le premier écho décrira la surface des objets (MNS) tandis que le dernier décrira la surface du sol (MNT). Un traitement du nuage de points est nécessaire et réalisable via l'emploi de logiciels spécialisés afin de générer MNT et MNS. La densité du nuage de points sera fonction de la méthodologie d'acquisition, des applications et de la nature du terrain. Lorsque la technologie LiDAR est aéroportée, cette densité varie de 1 point pour 10 m<sup>2</sup> à près de 5 points par m<sup>2</sup> [GERVAIX, 2010]. La précision altimétrique peut descendre jusqu'à 5 cm.

### La donnée LiDAR de la métropole Nice Côte d'Azur (NCA)

Dans le cadre de la réalisation d'une orthophotographie numérique du territoire de NCA, une campagne d'acquisition de données LiDAR s'est déroulée en septembre 2005 sur 27 communes de la métropole de Nice Côte d'Azur. La précision annoncée par la société en charge des mesures est en moyenne de 15 cm en altimétrie et de 30 cm en planimétrie (calage du géoréférencement réalisé sur 30 points). Le LiDAR a été fourni à un pas de 2 m sur une emprise de 458 km<sup>2</sup>.

La donnée LiDAR brute a été nettoyée de la végétation avant d'être fournie, cependant les ponts, les voiries surélevées et les tunnels sont intégrés à la donnée finale. Pour une utilisation de cette donnée en vue de modéliser un phénomène de ruissellement, un second traitement de la donnée sera indispensable pour écarter d'éventuelles erreurs et incohérences liées à des blocages des écoulements induits par ces éléments.

### 1.2. Photogrammétrie

La photogrammétrie est une technique de télédétection qui permet de mesurer les coordonnées en trois dimensions d'un espace et des objets qu'il comprend en utilisant des images 2D prises à partir de positions différentes. Le recouvrement entre photographies aériennes permet de restituer les propriétés tridimensionnelles de l'espace et des objets (principe de stéréoscopie). Une phase de calculs d'aérotriangulation, dans laquelle les informations sur les paramètres d'orientation des clichés et sur leurs points de liaison sont primordiales, est nécessaire pour une mesure correcte de l'altitude du terrain et de l'élévation des objets. La hauteur de vol, la multiplication du nombre de points de vues ainsi que des forts taux de recouvrement permettent de fiabiliser les restitutions automatiques [EGELS et KASSER, 2004 ; LINDER, 2006].

En photogrammétrie, la résolution spatiale correspond à la taille d'un pixel au sol. À une résolution spatiale donnée, un objet de taille égale à trois fois la taille du pixel peut être identifié, et un objet de taille égale à 20 fois la taille du pixel peut-être interprété [GERVAIX, 2010]. Sur la base de l'identification et de l'interprétation des objets, l'utilisation de logiciels spécialisés, et particulièrement d'outils de dessin

assisté par ordinateur (DAO) 3D, permet leur restitution sous forme vectorielle classifiée (points, polygones, polygones). La mise en œuvre de ces procédés de restitution de la donnée sous forme vectorielle requiert des phases manuelles, contrôlées par l'utilisateur. Ainsi, la technologie photogrammétrique permet d'obtenir une donnée topographique fine en 3D et classifiée sur un territoire qui offre des perspectives d'exploitation variées et modulables en fonction des objectifs liés à l'utilisation de cette donnée [ANDRES, 2012].

### La donnée photogrammétrique 3D classifiée de NCA

La campagne d'acquisition de données photogrammétriques s'est déroulée en 2010-2011 et couvre 400 km<sup>2</sup> de NCA (Figure 1). Les objets (éléments 3D) ont été interprétés en une cinquantaine de classes différentes sous forme de points, polygones et polygones. Ces classes incluent les éléments fins du sur-sol tels que les murets, murs, trottoirs, etc. Les données obtenues sont précises en moyenne à 30 cm en planimétrie et à 25 cm en altimétrie. Néanmoins,

sur la zone urbaine dense, l'ordre de grandeur de précision est plutôt de 15-20 cm en planimétrie et de 15 cm en altimétrie. En effet, lors du processus d'acquisition, ce secteur a fait l'objet d'un plan de vol de faible altitude, qui a fourni de nombreux clichés avec d'importants taux de recouvrement (supérieurs à 80 % en zone urbaine dense). Dans la mesure où le calage pour le géoréférencement des données de la campagne est très fiable (effectué sur environ 200 points balisés), l'incertitude sur la valeur absolue des données apparaît également de l'ordre de 15-20 cm en altimétrie et en planimétrie. La donnée est garantie à 95 % par le fournisseur. La direction de l'information géographique de NCA a effectué des contrôles via des levés topographiques terrestres sur 10% du territoire couvert par la campagne de photogrammétrie afin de confirmer ce taux de garantie.

## 2. Cas pratique d'utilisation des données haute résolution pour des problématiques de ruissellement en milieu urbain

L'intérêt est ici uniquement porté sur les méthodes d'intégration de données topographiques HR dans des modèles numériques de ruissellement. Ainsi, les aspects liés au paramétrage des modèles (conditions aux limites, pertes de charges, pas de temps de calcul, nombre de Courant, etc.) ne sont pas détaillés dans cet article.

### 2.1. Présentation des outils de modélisation numérique

Les codes de calculs hydrauliques employés pour tester les possibilités d'utilisation de la donnée topographique HR pour créer des modèles de ruissellement de surface sont développés par le Danish Hydraulic Institute (DHI). Ces codes de calculs sont basés sur la résolution du système d'équations de Saint-Venant en deux dimensions [DHI, 2007a ; DHI, 2007b]. En dehors de l'aspect validité de l'approche liée à l'éloignement du domaine d'application par rapport à celui pour lequel l'outil a été créé (présence de forts gradients topographiques et validité de la prise en compte des pertes de charges), l'emploi de tels codes de calculs pour la modélisation de hauteurs d'eau faibles telles que celles que l'on peut rencontrer lors de phénomènes de ruisselllements de surface est faisable. Néanmoins, les aspects liés à la présence

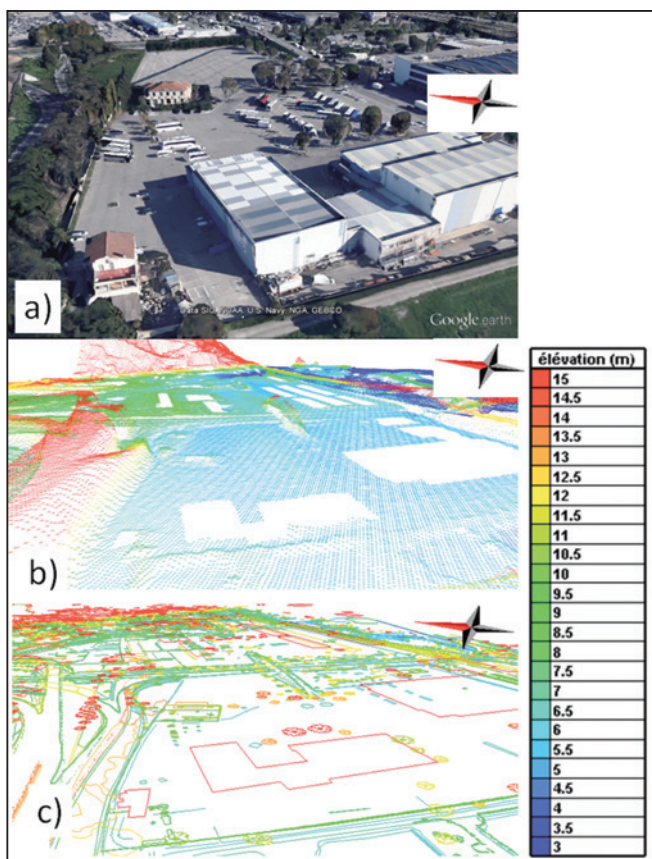


Figure 1. Vue d'une partie de la plateforme du marché d'intérêt national (MIN) de NCA : la zone du MIN avec Google Earth (a), et illustration de la donnée LiDAR (b) et de la donnée photogrammétriques 3D classifiée (c) sur cette zone



**Projection à la lance**



**Application à la main**



**Par centrifugation**



**KS2b-L**

**Mortier de protection  
des bétons contre l'H<sub>2</sub>S  
en assainissement**

- 25 ans de références à travers le monde
- Protection mono-matériau dans la masse
- Finition très propre
- Résultat durable
- Assistance technique



Réparation des bétons, voirie, scellement, assainissement, réhabilitation de canalisations, réservoirs et sols industriels

ZAC de Royallieu - 17 rue du Four St-Jacques  
F-60200 Compiègne  
Tél : +33 (0) 344 970 222 - Fax : +33 (0) 344 970 932  
Email : bureau@hermes-technologie.com  
www.hermes-technologie.com

**HERMES**  
TECHNOLOGIE



d'oscillations numériques et au traitement des découvements/recouvrements (ici, fonctionnant avec un processus de valeurs seuils) doivent être contrôlés par l'utilisateur, mais ne sont pas bloquants pour une utilisation visant à simuler des scénarios de ruissellement [Abily et al., 2013].

- **MIKE 21** est basé sur la résolution du système d'équations de Barré-Saint-Venant en deux dimensions [DHI, 2007a]. Le code de calcul de MIKE 21 résout ce système d'équations en différences finies sur un maillage de calcul structuré cartésien. La méthode numérique utilisée est de type *alternate direction implicite* (ADI). Les méthodes ADI ne sont normalement pas capables de gérer les changements de régimes d'écoulements qui seront présents lors de phénomènes de ruissellements intenses. Cependant, la méthode implémentée dans MIKE 21 a subi des modifications (décentrement amont du terme convectif des équations de quantité de mouvement ajoutant localement une diffusion numérique) qui lui permettent de gérer ces changements de régimes d'écoulement en améliorant la stabilité du schéma au détriment, localement, de sa précision [McCOWAN et al., 2001].
- **MIKE FLOOD** est un outil de simulation des processus hydrodynamiques basé sur le couplage dynamique de MIKE 21 FM pour la construction de la bathymétrie et de MIKE URBAN pour la modélisation 1D des réseaux souterrains.

- **M21FM** est également basé sur la résolution du système d'équations de Barré-Saint-Venant en deux dimensions [DHI, 2007b]. Le code de calcul résout ces équations en se basant sur un schéma numérique en volumes finis. Le maillage utilisé dans ce code est de type non structuré (flexible). Théoriquement, les méthodes de résolution numérique implantées dans MIKE 21 FM (Roe et TVD) permettent un traitement stable des changements de régimes d'écoulement.

- **MIKE URBAN** permet la modélisation des écoulements de réseaux enterrés ou à ciel ouvert à partir d'une résolution complète des équations de Barré-Saint-Venant en une dimension (modèle hydraulique) et de la modélisation des apports (modèle hydrologique) par de nombreuses méthodes de calcul (Caquot, réservoir linéaire, double réservoir linéaire, Horton...).

## 2.2. Utilisation des données LiDAR à l'échelle d'une ville

La métropole Nice Côte d'Azur a mandaté la société Safege pour réaliser une étude du risque pluvial urbain à travers une modélisation 2D permettant d'actualiser les cartes des aléas du risque de débordements sur la commune de Nice. En effet, la métropole souhaite disposer d'éléments caractéristiques du risque d'inondation sur la commune de Nice, pour pouvoir fournir les préconisations nécessaires en matière d'urbanisme afin de réduire la vulnérabilité des futurs aménagements.

		Processus de génération de MNS haute résolution			Intégration des MNS dans le code de calcul hydraulique
Approches	Donnée haute résolution utilisée	Étape 1	Étape 2	Étape 3	Étape 4
Approche 1 (A1)	Donnée LiDAR	Réduire la densité de points de la donnée LiDAR	Extrusion des volumes bâtis de la surface	Évictions des macrostructures bloquant les écoulements de surface	Utilisation de la grille en tant que maillage non structuré
Approche 2 (A1+)	Donnée LiDAR	Analyse de la photographie aérienne, plans topographiques Identification des éléments fins de sur-sol pouvant influencer les écoulements		Corrections manuelles du MNS aux endroits stratégiques	

Tableau I. Processus utilisés pour la génération de modèles numériques de surface (MNS) spécifiques pour la modélisation de scénarios de ruissellement de surface à l'échelle d'une ville

### 2.2.1. Construction du modèle : mise en place d'une méthodologie spécifique

Le modèle a été créé avec Mike Flood. La méthodologie générale de construction d'une bathymétrie à des fins de modélisation hydraulique est largement répandue, mais l'originalité de cette méthode réside dans le fait qu'elle s'applique à l'échelle de la ville de Nice, soit 23,4 km<sup>2</sup>.

Les approches testées pour générer des MNS (A1, A1+) adaptés pour la modélisation numérique du ruissellement à l'échelle d'une ville sont synthétisées dans le *tableau 1* et expliquées ci-avant.

La première étape de la méthodologie de construction est le nettoyage du fichier de points LiDAR. Compte tenu du nombre de points X, Y, Z fournis par la donnée LiDAR sur la zone d'étude (5,5 millions de points) et des capacités de traitement de la donnée des logiciels, des tests de sensibilité ont été réalisés en réduisant plus ou moins le nombre de points topographiques sur la zone modélisée. Les résultats de l'analyse de sensibilité étant concluants, la densité de la donnée LiDAR a été réduite par 4 (*figure 2*).

La seconde étape du processus d'élaboration du MNS nécessite l'extrusion des volumes bâtis de la surface et le regroupement des immeubles en pâtés de maisons. Cette étape apportera une stabilité au modèle, notamment lors de l'étape de génération du maillage (étape 3). En effet, les éléments structurant localement le maillage (les cours intérieures ou les entrées exigües) surcontraignent l'algorithme de maillage

(triangulation de type Delaunay) lorsque ceux-ci sont très rapprochés. Un maillage non structuré de mauvaise qualité rendrait le modèle instable. De fait, l'exclusion du domaine de calcul des cours intérieures, des entrées ou des ruelles exigües crée un écart par rapport à la topographie réelle qui pourra influencer localement les résultats. Néanmoins, les faibles volumes et flux d'eau considérés dans ces zones apparaissent négligeables par rapport au volume total considéré dans l'étude. Compte tenu des objectifs de l'étude (définition des zones inondables de la ville de Nice), la précision potentiellement réduite en supprimant certains recoins ne dégrade que faiblement la qualité des résultats.

L'étape suivante (étape 3) consiste en un traitement manuel des données topographiques présentant des incohérences (A1). Certaines cotes altimétriques présentent des valeurs anormalement hautes et/ou basses. Il s'agit de ponts, auto-ponts ou tunnels pris en compte dans les levés LiDAR. Les points comportant des anomalies sont donc supprimés du fichier et les blancs sont remplacés par des données interpolées (interpolation linéaire).

En vue de modéliser un phénomène de ruissellement, un second traitement de la donnée a été indispensable pour écarter d'éventuelles erreurs et incohérences liées à des blocages des écoulements induits par des éléments fins du sur-sol non visibles dans la donnée LiDAR (A1+). Pour ce faire, un travail manuel de correction de cotes, d'ajout d'éléments fins de

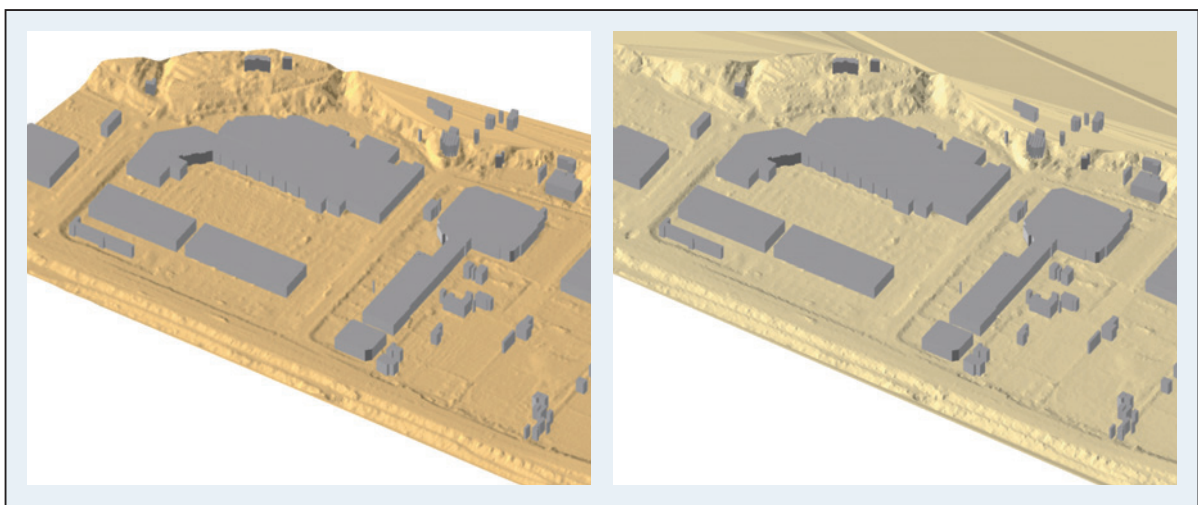


Figure 2. Extrait de la donnée LiDAR initiale (gauche) et allégée d'un facteur 4 (droite) sur une emprise de 0,5 km<sup>2</sup> (zone de Carrefour Lingostière, rive gauche du Var)

sur-sol a été réalisé à des endroits stratégiques en s'appuyant sur les informations fournies par la photographie aérienne ainsi que par des visites de terrains ou des levés topographiques.

La quatrième étape consiste en la définition du maillage. Le choix du maillage s'est porté sur la base d'un maillage non structuré (éléments triangulaires). Ce type de maillage est plus sensible aux instabilités mais permet de construire un maillage différencié dans un même domaine de calcul (figure 3). Un maillage fin est appliqué dans les zones à enjeux et les rues étroites (5 m<sup>2</sup> maximum). Les zones de moindre intérêt, les boulevards et les zones planes de grandes ampleurs sont constitués d'un maillage plus large (50 m<sup>2</sup> maximum). Afin de définir le maillage adapté à chaque espace, des tests de sensibilité ont été réalisés sous forme de trois sous-modèles. À chaque sous-modèle ont été appliquées plusieurs tailles de mailles : de 5 à 100 m<sup>2</sup> maximum. Ces modèles représentent les scénarios principaux de morphologies urbaines identifiés à Nice.

### 2.2.2. Résultats obtenus

La mise en application de la méthodologie détaillée ci-avant sur l'ensemble de la ville de Nice a permis d'obtenir des cartographies des hauteurs d'eau maximales calculées ( $h_{max}$ ) telles que celles présentées en figure 4 pour le secteur du centre-ville de Nice.

La fiabilité des résultats du modèle 2D a été validée par la comparaison des  $h_{max}$  calculées avec le témoignage des habitants de Nice pour la pluie du 24 septembre 2012 où d'importantes inondations ont pu



Figure 4. Hauteurs d'eau maximales calculées ( $h_{max}$ ) sur le centre-ville de Nice – Pluie période de retour centennale (30 min – 4 h)

être observées. Les conclusions de l'étude, par comparaison à des faits avérés, montrent ainsi deux cas de figure bien distincts :

- les secteurs fréquemment inondés à cause de défaillances des réseaux (sous-dimensionnement) pour lesquels les simulations corroborent les observations effectuées. Sur ces secteurs, les inondations observées et les résultats du modèle sont similaires sur les mêmes emprises ;
- les secteurs inondés pour cause de défaut de drainage de surface (insuffisance du nombre de grilles avaloirs, défaut d'entretien de ces dernières...), secteurs pour lesquels les simulations ne corroborent pas les observations effectuées. Sur ces secteurs, des

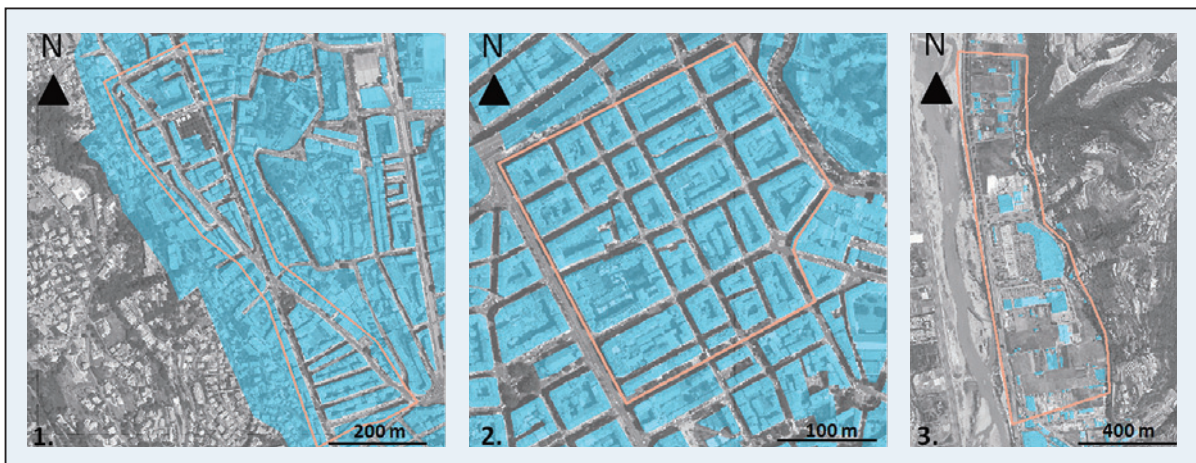


Figure 3. Extrait des sous-modèles : (1) grands boulevards, pente moyenne de 3 %, zone urbaine dense ; (2) rues du centre-ville, pente moyenne de 1 %, zone urbaine dense ; (3) grande étendue, topographie plane, zone urbaine peu dense



Types de voiries	Topographie	Densité urbaine	Taille maximum de la maille
Centre historique, ruelles, zones à forts enjeux (projets d'aménagement urbain)	Pente $\leq 3\%$	Urbain dense	5 m <sup>2</sup> maximum
Centre-ville, géométrie des rues et des croisements régulière	Pente $\leq 1\%$	Urbain dense	25 m <sup>2</sup> maximum
Centre-ville, grandes avenues parallèles	Pente $\geq 3\%$	Urbain dense	40 m <sup>2</sup> maximum
Vaste plaine inondable	Pente $\leq 1\%$	Urbain peu dense	50 m <sup>2</sup> maximum

Tableau II. Synthèse des conclusions de l'étude sur la génération d'un maillage non structuré efficace utilisant en entrée un modèle numérique de surface (MNS) HR acquis par technologie LiDAR

inondations sont observées sur le terrain alors que le modèle montre un réseau avec un reliquat débit pouvant être accepté (réseau non naturel), et donc pas de débordement sur la voirie.

À noter que seuls les ruissellements de surface générés par des débordements de réseaux sont simulés, et en aucun cas les écoulements en nappe liés au ruissellement urbain des zones minéralisées de surface. La dégradation appliquée à la donnée topographique brute est fonction de la spécificité morphologique de la voirie (tableau I). Chaque cas est assez différent et demande une analyse spécifique pour obtenir un rendu pertinent. Les résultats présentés ci-après sont issus de nos cas tests de sensibilité. Il s'agit d'une tendance observée dans les modèles et non pas de valeurs prédéfinies. Ces valeurs permettent d'aboutir à une modélisation fine du phénomène de ruissellement en respectant un temps de calcul raisonnable, compte tenu de l'emprise modélisée dans le cas de Nice.

### 2.3. Utilisation de la donnée photogrammétrique 3D classifiée à l'échelle d'un site industriel

Afin de vérifier la faisabilité et l'intérêt d'intégrer l'information des éléments fins du sur-sol lors de la réalisation de simulations de scénarios de ruissellement de surface à l'échelle d'un site industriel, différents MNS ont été créés à partir des données topographiques HR. Les scénarios utilisés pour les tests ont été élaborés en se basant sur la situation de référence pour le risque inondation (SRI) « pluie

locale » du guide inondation de l'ASN [ASN, 2013]. Cette SRI considère notamment les réseaux enterrés d'évacuation des eaux pluviales comme hors-service. L'approche pénalisante de non-prise en compte du réseau enterré dans la SRI est justifiée par la possibilité d'occurrence d'événements plus intenses que ceux définis et par la prise en compte du risque d'obstruction du réseau en cas d'événements extrêmes. Le code de calcul utilisé ici est MIKE 21.

#### 2.3.1. Méthodologie de construction et d'intégration de MNS dédiés

Le secteur du marché d'intérêt national (MIN) de Nice (figure 5) a été choisi pour simuler des scénarios de ruissellements liés à une pluie d'intensité 100 mm/h pendant 1 heure. L'intensité de l'événement pluvieux considéré pour ce cas test correspond à une pluie horaire dont l'intensité correspond à la borne supé-

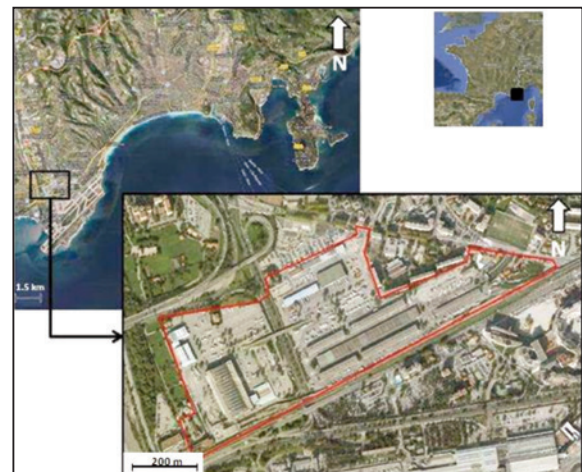


Figure 5. Localisation de la plateforme du marché d'intérêt national (MIN) de Nice

rieure de l'intervalle de confiance à 70 % de la pluie centennale (calcul Météo France sur le pluviographe de l'aéroport de Nice). L'intérêt de ce site de taille modeste (600 000 m<sup>2</sup>), configuré en plateformes, repose sur la présence d'éléments du sur-sol nombreux et de natures diverses (murs, murets, caniveaux, ronds-points, etc.). Le site a été couvert par les deux campagnes d'acquisition de données topographiques (LiDAR et photogrammétriques). Entre les deux campagnes (2005 et 2011), le secteur du MIN a peu évolué. Par rapport à la donnée LiDAR, la donnée 3D classifiée issue de la photogrammétrie permet la représentation des éléments fins du sur-sol (murs, murets, éléments de voirie, etc.).

Plusieurs types d'approches basées sur l'emploi de données photogrammétrie 3D classifiées sont possibles pour générer un MNS. Les approches testées pour générer des MNS (A1, A2 et A3) adaptées pour la modélisation numérique du ruissellement sont synthétisées dans le *tableau III* et expliquées ci-après.

Les MNS ont été intégrés en tant que grilles de calculs (maillage structuré) dans MIKE 21.

Pour A1, un MNS basé sur l'emploi de la donnée LiDAR a été généré. Ce MNS intègre les éléments du sur-sol dont l'emprise a une largeur compatible avec la résolution de la technique d'acquisition LiDAR ( $\Delta x$  et  $\Delta y$  de 2 m) tels que les bâtiments, la chaussée, etc. Les macrostructures (telles que les routes élevées, ponts, etc.) pouvant bloquer les écoulements ont été enlevées manuellement du MNS.

A2, utilise la donnée photogrammétrique 3D classifiée. Au sein de cette donnée, le nombre de classe est élevé (50). Seule l'inclusion dans le MNS des classes représentant les éléments du sur-sol qui influencent les chemins d'écoulement en surface (tels que les trottoirs, caniveaux, murs, murets...) présente ici un intérêt. Certaines classes représentent des structures dont l'intégration n'est pas nécessaire pour générer un MNS pertinent pour le type d'application visé (ponts et routes élevées, végétation, éléments de

Approches	Donnée haute résolution utilisée	Processus de génération de MNS haute résolution			Intégration des MNS dans le code de calcul hydraulique
		Étape 1	Étape 2	Étape 3	Étape 4
<b>Approche 1 (A1)</b>	Donnée LiDAR	Évictions des macrostructures bloquant les écoulements de surface			Utilisation de la grille en tant que maillage structuré (résolution 2 m)
<b>Approche 2 (A2)</b>	Donnée photogrammétrique 3D classifiée	Sélection des classes d'entités pertinentes	Interpolation basée sur les classes d'entités sélectionnées	Conversion en grille	Ré-échantillonnage des grilles générées en grilles de résolution équivalente au pas de discrétisation souhaitant être utilisé dans le maillage structuré (0,3 m ou 1 m)
<b>Approche 3 (A3)</b>	Donnée LiDAR et donnée photogrammétrique 3D classifiée combinées	(a) Conversion des systèmes de coordonnées si nécessaire (b) Sélection des classes d'entités pertinentes	(a) Conversion des classes d'entités sélectionnées en grille à la résolution désirée (b) Conversion des données LiDAR en grille de résolution identique	Extrusion des grilles de données classées sur la grille de données LiDAR	

Tableau III. Processus utilisés pour la génération de modèles numériques de surface (MNS) spécifiques pour la modélisation de scénarios de ruissellement de surface

toiture, etc.). Ainsi, l'un des aspects déterminants dans le processus de génération d'un MNS approprié pour une utilisation en modélisation hydraulique est la sélection de classes d'éléments du sur-sol ayant un impact potentiel sur les écoulements. Au total, 12 classes d'éléments ont été utilisées pour générer le MNS.

L'approche A3 consiste à combiner les deux jeux de données topographiques HR (donnée LiDAR et donnée photogrammétrique classifiée) afin de densifier les données du sol. En effet, la donnée photogrammétrique intègre avec haute précision les éléments fins du sur-sol, mais la densité de points représentant le terrain (un point tous les 5 m) est inférieure à celle de la donnée LiDAR (un point tous les 2 m).

### 2.3.2. Résultats obtenus

La comparaison des résultats sur les hauteurs d'eau maximales ( $h_{max}$ ) et sur les directions d'écoulements calculées par les modèles reposant sur les différents MNS permet de quantifier et de qualifier l'impact de la prise en compte des éléments fins du sur-sol.

Les  $h_{max}$  calculées avec les MNS où les éléments fins du sur-sol sont représentés (A2 et A3) présentent des différences importantes par rapport aux  $h_{max}$  calculées à partir du modèle utilisant le MNS tiré de la donnée LiDAR seule (A1). Ces écarts dans les  $h_{max}$  estimées peuvent atteindre 0,5 m comme l'illustre la figure 6 (droite) où la grille de résultats sur les  $h_{max}$  calculée avec A2 est soustraite à la grille de résultats calculée avec A1. Par ailleurs, les directions d'écou-

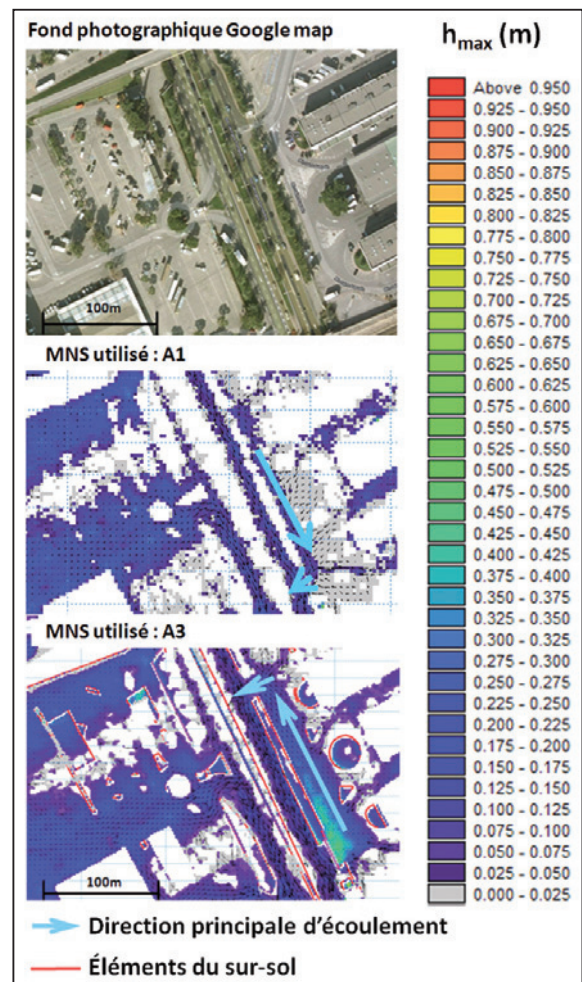


Figure 7. Focus sur un secteur du marché d'intérêt national (MIN) où l'inclusion des éléments fins du sur-sol entraîne des différences sur les hauteurs d'eau et dans les directions d'écoulements calculées

lement sont significativement modifiées (figure 7). Les  $h_{max}$  calculées avec les modèles utilisant le MNS A2 (basé sur la donnée photogrammétrique) et le MNS A3 (basé sur les données photogrammétriques

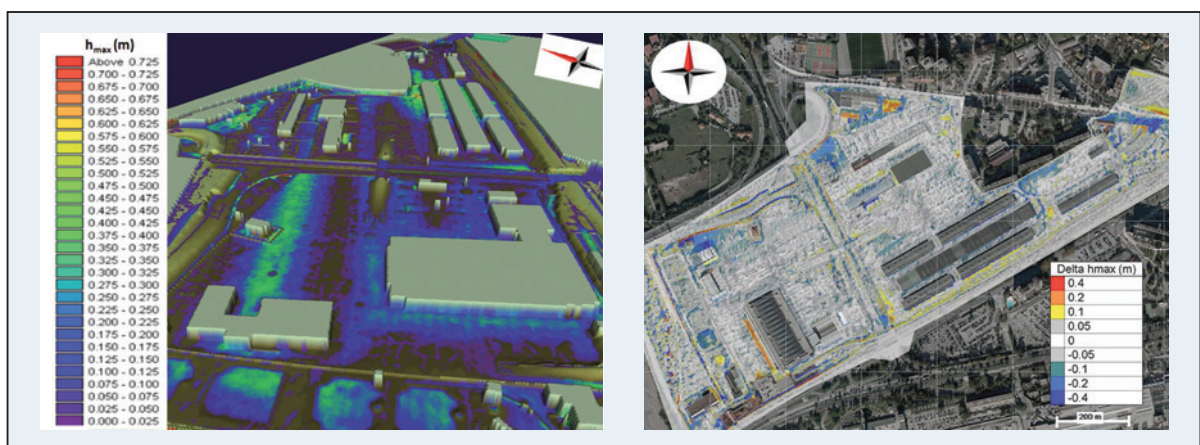


Figure 6. Illustration des  $h_{max}$  calculées sur le modèle numérique de surface (MNS) A2 (gauche) et différences entre les  $h_{max}$  estimées avec le MNS basé sur la donnée LiDAR seule (A1) et avec le MNS basé sur le couplage des deux jeux de données topographiques (A2) (droite)

# Instrumentation pour l'analyse de l'eau en ligne



Bodensee Wasserversorgung©



Chlore, ozone,  
dioxyde de chlore



Turbidimètre  
sans contact



Chlore libre, mono & dichloramine,  
Chlore total en ligne par colorimétrie.

Made in Switzerland 



Photo-colorimètre  
portable



Photo-colorimètre pH/  
redox-mètre portable



www.swan.ch

[www.swan.ch](http://www.swan.ch)

**swan**  
ANALYTICAL INSTRUMENTS



LAVER L'EAU

LE SIAAP REDONNE À L'EAU SON FUTUR



L'eau que nous utilisons chaque jour est lavée par le SIAAP. En région parisienne, le SIAAP est le service public qui transporte et dépollue 2,5 millions de m<sup>3</sup> d'eaux sales, domestiques, pluviales et industrielles. Un défi quotidien pour nous et pour l'environnement. En savoir plus [www.siaap.fr](http://www.siaap.fr)

**SIAAP**

Service public de l'assainissement francilien

et LiDAR combinées) sont similaires. La densification des points au sol n'apporte pas de plus-value dans notre cas.

Par ailleurs, à l'issue des tests avec les MNS de résolutions différentes, il apparaît que l'intégration de singularités telles que les éléments fins du sur-sol, même à résolution dégradée (1 m au lieu de 0,3 m), offrent des résultats très proches.

La plus value de l'intégration des éléments fins du sur-sol dans les MNS utilisés avec les modèles hydrauliques hautes définitions pour estimer les risques liés au ruissellement apparaît très clairement.

### 3. Retour d'expérience et conclusions sur l'utilisation des données haute résolution

La mise en œuvre d'approches consistant à intégrer des données topographiques HR dans des codes de calculs d'hydraulique 2D a été présentée sur des applications modélisant des scénarios de ruissellement. La faisabilité de ce type d'approche a été soulignée dans la section précédente ainsi que dans des travaux menés à échelle plus restreinte [ABILY *et al.*, 2013]. Les travaux menés montrent en premier lieu que, sur des milieux urbains denses, l'emploi de données haute résolution est un prérequis indispensable afin d'obtenir des résultats exploitables pour une meilleure appréhension du risque lié au ruissellement. En effet, l'emploi de données topographiques de résolution trop grossières ne peut permettre de décrire convenablement la topographie complexe de ce type d'environnement et, par conséquent, les d'écoulements qui s'y produisent.

Bien que les modèles hydraulique 2D créés produisent des résultats précis et à haute résolution, il convient de rappeler que, d'une manière générale, un modèle numérique reste une représentation de la réalité basée sur un modèle mathématique assorti d'un jeu d'hypothèses simplificatrices dans la description du phénomène d'écoulement. Le comportement des écoulements est calculé en négligeant certains aspects complexes ou en les appréhendant de façons simplifiées. Par ailleurs, les données d'entrées des modèles (hydrauliques et topographiques) comportent des incertitudes (liées aux erreurs de mesures et aux choix de modélisateurs), qui sont de fait introduites dans le modèle.

Cet article s'intéressant à l'emploi de données topographiques HR, les limites liées i) aux spécificités des jeux de données topographiques HR et ii) aux méthodes d'intégration de cette donnée dans les codes de calculs sont soulignées dans cette section. Les retours d'expériences sur ces deux points sont présentés ci-après.

#### 3.1. Donnée et prétraitement

Dans le cas de la donnée LiDAR, les sources d'erreurs principales viennent du fait de la non-prise en compte d'éléments fins du sur-sol et de l'inclusion dans le MNS des éléments tels que les ponts et voies surélevées. Comme susmentionné, ces obstacles aux écoulements doivent être repérés et traités par le modélisateur. Le repérage et le traitement de ces éléments sont fastidieux à l'échelle d'une ville et nécessitent un temps ingénieur important.

Dans le cas de la donnée photogrammétrique, le fait que les éléments du sur-sol soient classifiés permet de sélectionner aisément les éléments jugés pertinents à inclure dans le MNS. Ainsi, il est possible de ne pas intégrer les éléments tels que les tabliers de ponts ou les voies surélevées dans le MNS. Dans le cas présenté (MIN de Nice) le pourcentage d'erreur dans la classification est évalué à 5%. Compte tenu du nombre important d'éléments classifiés utilisés pour générer les MNS (plus de 2 000 sur le site du MIN), cette erreur (ajout, omission ou mauvaise classification) peut avoir un impact fort sur les écoulements modélisés et donc sur l'évaluation de  $h_{max}$ . Une vérification de la donnée est obligatoire afin de s'affranchir de ce type d'erreur lors de l'utilisation de données photogrammétriques 3D classifiées. Ce type de vérification est réalisable à l'échelle d'un site industriel ou à l'échelle de quelques kilomètres carrés [ABILY *et al.*, 2014a], mais sera en pratique difficile à mettre en œuvre à plus grande échelle.

#### 3.2. Maillage et intégration de la donnée haute résolution

À l'échelle d'une ville, la quantité d'information topographique obtenue par des campagnes, LiDAR et photogrammétrique, est à l'heure actuelle prohibitive pour être utilisée directement avec les ressources informatiques et outils de modélisation standard en

ingénierie. Néanmoins, des tests de sensibilité conduits sur des secteurs à des échelles plus restreintes peuvent permettre de diminuer la densité d'information sans influencer de manière significative la qualité du MNS. Pour la donnée LiDAR cela s'est traduit par la dégradation de la densité de l'information. Pour la donnée photogrammétrique, les éléments fins du sur-sol (d'emprise inframétrique) sont inclus avec une taille légèrement amplifiée (à la taille unitaire du MNS) dans le maillage structuré, permettant de conserver les impacts de ces structures sur les chemins d'écoulement.

Afin d'intégrer le MNS haute résolution dans les codes de calculs d'hydraulique, il est nécessaire de s'assurer de la bonne adéquation du pas de discrétisation spatiale du calcul (maillage) avec le MNS HR utilisé. Un maillage non structuré performant est particulièrement délicat à créer lorsque le milieu est complexe et que la densité d'information est importante. À l'échelle d'une ville, la construction d'un maillage non structuré (discrétisation du maillage suivant les enjeux) permettant de trouver ainsi un compromis entre fiabilité de mesures, représentativité du phénomène et capacité de calcul, a été choisie volontairement. Néanmoins, générer un maillage non structuré en se basant sur la donnée topographique HR a nécessité un travail manuel de l'opérateur afin de vérifier la faisabilité d'utilisation de l'algorithme de maillage, ce qui nécessite un temps ingénieur considérable.

Enfin, l'emploi d'un maillage structuré en zone urbaine possède l'avantage de pouvoir permettre de créer directement un maillage à la résolution du MNS. Cette approche très directe permet un gain de temps ingénieur important. En revanche, il est évident que dans le cas d'un maillage structuré, l'optimisation du temps de calcul ne sera là encore pas maximale, car la taille de la grille de calcul (nombre de points de calculs) est ici maximale.

### 3.3. Perspectives d'amélioration

Si la donnée photogrammétrique 3D classifiée offre un fort potentiel pour créer des MNS HR optimisés pour des applications en modélisation hydraulique, la classification des éléments ne suit pas forcément

des critères dédiés pour ce type d'application. En particulier, une classification discriminant la perméabilité des éléments classifiés du sur-sol (par exemple en distinguant entre structures type murs béton ou clôture grillagée) n'est pas usuellement prise en compte. De plus, le processus de traitement dans la classification de la donnée fait appel à des choix d'utilisateur qui peuvent avoir un impact important. À titre d'exemple, certaines lignes 3D sont fermées automatiquement lorsque l'écartement est inférieur à une valeur seuil. Cela peut conduire à une fermeture artificielle de voies de ruissellement. Dans l'optique d'une amélioration des MNS HR utilisés en modélisation hydraulique urbaine, ces aspects de classification et de processus de traitement lors de la classification de la donnée seraient, dans la mesure du possible, à prendre en compte dès la phase de photo-interprétation de la donnée photogrammétrique.

Lorsqu'une modélisation 2D d'hydraulique à surface libre est réalisée, les choix du modélisateur liés à l'intégration de la donnée topographique dans le code de calcul ont un impact significatif sur la qualité du modèle. Des travaux préliminaires d'analyse globale de sensibilités ont été effectués sur ces choix des modélisateurs [ABILY *et al.*, 2014b]. Il ressort de ce type d'étude que les choix du modélisateur pour la génération du MNS et pour la création du maillage sont responsables de l'introduction d'une incertitude dans la grandeur d'intérêt en sortie du modèle (ex.  $h_{max}$ ) plus importante que l'incertitude introduite par l'erreur moyenne de la donnée topographique HR.

### Remerciements

Le laboratoire I-City, la société Safège et l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire remercient la métropole Nice Côte d'Azur pour les données qui ont été transmises à des fins de recherche. Les calculs I-CiTy Ces ont bénéficié d'un accès aux moyens de calcul et de visualisation du Centre de calcul interactif hébergé à l'université Nice Sophia Antipolis. Par ailleurs, les auteurs remercient particulièrement messieurs L. Andres, G. Tacet et F. LARGERON de la direction d'information géographique de la métropole Nice Côte d'Azur pour leur soutien d'expertise sur le volet géomatique.

## Bibliographie

- ABDALLAH M. (2005) : *Sur les méthodes de discrétisation numérique de problèmes hyperboliques non linéaires appliquées aux équations de Barré de Saint-Venant pour la modélisation de l'hydraulique en réseau d'assainissement*. Thèse de doctorat, Strasbourg, 196 p.
- ABILY M., DELESTRE O., AMOSSE L., BERTRAND N., LAGUERRE C., DULUC C.-M., GOURBESVILLE P. (2014a) : « Use of 3D classified topographic data with FullSWOF for High Resolution simulations of river flood event over a dense urban area », in : *Book of Proceedings, 3rd IAHR Europe Congress, 2014, Porto, Portugal*.
- ABILY M., BERTRAND N., DELESTRE O., RICHET Y., DULUC C.-M., GOURBESVILLE P. (2014b) : « Global sensitivity analysis with 2D hydraulic codes: application on uncertainties related to high resolution topographic data use », in : *SimHydro 2014: Modelling of rapid transitory flows, 11-13 June 2014, Sophia Antipolis, France*.
- ABILY M., DULUC C.M., FAES J.B., GOURBESVILLE P. (2013) : « Performance assessment of modeling tools for high resolution runoff simulation over an industrial site ». *Journal of Hydroinformatics* ; IWA publishing doi : 10.2166/hydro.2013.063 : p. 16.
- AKTARUZZAMAN M., SCHMIDT T. (2009) : *Detailed digital surface model (DSM) Generation and automatic object detection to facilitate modelling of urban flooding*. ISPRS Workshop, Hannover: p. 7.
- ANDRES L. (2012) : « L'apport de la donnée topographique pour la modélisation 3D fine et classifiée d'un territoire ». *XYZ* ; 133 : 7.
- ASN (2013) : *Protection des installations nucléaires de base contre les inondations externes*. Guide de l'ASN n° 13 : p. 44.
- DHI (2007a) : *Mike 21 Flow Model, Hydrodynamic module: Scientific documentation*. Danish Hydraulics Institute: p. 58.
- DHI (2007b) : *Mike 21 & Mike 3 Flow Model FM, Hydrodynamic and transport module: Scientific documentation*. Danish Hydraulics Institute: p. 50.
- EGELS Y., KASSER M. (2004) : *Digital Photogrammetry*. Londres, Taylor & Francis.
- GERVAIX F. (2010) : *Éléments de photogrammétrie - Cours de photo-interprétation H.-V.E.c., Géoinformation*, Ed. 2010, École polytechnique fédérale de Lausanne. Lausanne : p. 141.
- GOMEZ M., MACCHIONE F., RUSSO B. (2011) : « Methodologies to study the surface hydraulic behaviour of urban catchments during storm events ». *Water Sciences and Technologies* ; 63(11) : 9.
- GOURBESVILLE P. (2009) : « Data and hydroinformatics: new possibilities and challenges ». *Journal of Hydroinformatics* ; 11(3-4) : 12.
- LINDER W. (2006) : *Digital photogrammetry: A practical course*. Springer Verlag.
- MARK O., WEESAKUL S., APIRUMANEKUL C., BOONYARONNET S., DJORDJEVIC S. (2004) : « Potential and limitations of 1D modelling of urban flooding ». *Journal of Hydrology* ; 299 : 16.
- MCCOWAN A.D., RASMUSSEN E.B., BERG P. (2001) : « Improving performance of a two dimensional hydraulic model for floodplain application ». In: *Conference on Hydraulics in Civil Engineering, Hobart, Tasmania*, p. 11.
- MUSIALSKI P., WONKA P., ALIAGA D.G., WIMMER M., VAN GOOL L., PURGATHOFER W. (2013) : « A survey of urban reconstruction ». *Computer Graphics Forum* ; 32(6) : 146-177.
- REMONDINO F., BARAZZETTI L., NEX F., SCAIONI M., SARAZZI D. (2011) : « UVA photogrammetry for mapping and 3D modelling – Current status and future perspectives ». In : *Conference on unmanned aerial vehicle in geomatics. International Archives of the Photogrammetry, Remote sensing and spatial information sciences: Zurich, Switzerland*: p. 7.
- SCHUBERT J.E., SANDERS B.F., SMIDTH M.J., WRIGHT N.G. (2008) : « Unstructured mesh generation and land cover-based resistance for hydrodynamic modelling of urban flooding ». *Advances in Water Resources* ; 31 : 1603-1621.
- TSUBAKI R., FUJITA I. (2010) : « Unstructured grid generation using LiDAR data for urban flood inundation modelling ». *Hydrological Processes* ; 24: 17.
- VALLET J. (2010) : « Relevé routier à très haute résolution par système LiDAR-Photogrammétrie hélicoptère ». *Géomatique Suisse* ; 9 : 4.



## La collection est maintenant complète!

La nature et les causes des risques sanitaires liés à la consommation d'eau contaminée sont multiples et le rôle joué par le réseau de distribution est loin d'être négligeable. Retrouvez dans les tomes 2 et 3 de cet ouvrage, **le manuel du parfait opérateur** qui aborde l'exploitation et la maintenance du réseau et les aspects liés à la surveillance permanente de la qualité de l'eau mise en distribution. Ils complètent le tome 1 qui traite de la nature et des origines des problèmes de qualité.

Ces ouvrages s'adressent à l'ensemble des acteurs opérationnels : autorités organisatrices, opérateurs et gestionnaires des services d'eau, responsables institutionnels, maîtres d'œuvre, chercheurs, enseignants et étudiants.

Bon de commande sur le site [www.asteo.org](http://www.asteo.org)





## Résumé

**M. ABILY, C. SCARCERIAUX, C.-M. DULUC**

### **Ruissellement de surface en milieu urbain : stratégies d'intégration de données topographiques haute résolution en modélisation hydraulique 2D**

Cet article présente deux études simulant numériquement des scénarios de ruissellement intense sur des zones urbanisées ou industrielles, en utilisant des jeux de données topographiques haute résolution (HR). Ces travaux de modélisation reposent sur des codes de calculs d'hydraulique à surface libre standard, basés sur la résolution bidimensionnelle du système d'équations de Saint-Venant. Les modèles ont été créés avec deux jeux de données topographiques HR différents : LiDAR et photo-interprétée ; à des échelles différentes et avec des stratégies de discrétisation spatiales différentes. L'article soulève les problématiques liées à l'intégration de ces « big data » dans les outils de calculs traditionnellement utilisés en ingénierie d'étude et présente des stratégies d'intégration optimisées de ces données dans les modèles hydrauliques. La faisabilité de la mise en œuvre de telles approches est confirmée. Par ailleurs, la plus-value de l'intégration de ces données topographiques HR est rappelée et les limites de sa faisabilité sont mises

en avant. Un retour d'expérience issu de ces deux études permet de faire ressortir une série de remarques généralisables. Ainsi, les phases de prétraitement de la donnée topographique HR ne présentent pas les mêmes avantages et inconvénients selon que l'on travaille avec une donnée LiDAR ou photo-interprétée. Après analyse de sensibilité, la donnée LiDAR peut être dégradée pour une utilisation facilitée. La donnée photo-interprétée, quant à elle, permet d'intégrer les éléments fins du sur-sol (trottoirs, caniveaux, etc.). La problématique de prétraitement manuel non automatisable de la donnée LiDAR pour enlever les éléments bloquants les écoulements (ponts et voies surélevés, etc.) est rappelée. Sur une emprise d'étude restreinte à quelques km<sup>2</sup>, l'emploi d'un maillage de type structuré, même s'il nécessite un temps de calcul plus important, apparaît pertinent pour modéliser les écoulements en tenant compte de données HR et permet un gain de temps ingénieur significatif lors de la génération du maillage.

## Abstract

**M. ABILY, C. SCARCERIAUX, C.-M. DULUC**

### **Runoff hazard assessment in urban environment : strategies for high resolution topographic data use in 2D hydraulic modelling**

This paper presents two studies modelling extreme runoff flood events over densely urbanized areas using High Resolution (HR) topographic data set with commercial codes. These standard codes solve 2D Shallow Water Equations (2D SWEs). Models of the presented studies are created using two different HR topographic dataset : LiDAR and Photo-interpreted data, at two different scales, with different spatial discretization strategies. This paper enhances the advantages and problems which arise from these "big data" integration within standard modelling tools. Strategies elaborated for HR topographic data optimal use with such type of codes are explained and put to the test. Feasibility of HR data use for flood hazard assessment is confirmed and feedback regarding added

value and limits of this practice are given. It is put to the light here, that pretreatment step shows dissimilar advantages and limitations depending on the use of LiDAR or photo-interpreted dataset. After sensitivity analysis, LiDAR data can be resampled for a better ease of use. A reminder is given regarding non-automation problem of elevated flow blocking structures (bridges, elevated motorways...) with LiDAR data. Photo-interpreted data set allows to integrate tin above ground elements (road gutter, sidewalks, walls...) in the hydraulic model. Over few square kilometers areas, structured grid use seems to be more relevant, allowing to save engineer time for mesh generation even though computational time might not be optimal with this type of meshing approach.

# AQUANEUTRA

petites bulles

à grand rendement...

abaissement du CO<sub>2</sub> libre jusqu'à 2 mg/l  
ajustement automatique aux variations du débit et qualité d'eau



Installation des eaux potables de Bale – débit 1 400 m<sup>3</sup>/h

Neutralisation à haut rendement des eaux agressives  
Modification de l'équilibre calco-carbonique des eaux de forage  
Technologie AQUADOSIL : plus de 250 références de 4 à 12 000 m<sup>3</sup>/h

12 bis rue du Cdt Pilot  
92200 Neuilly sur Seine, France  
Tél : 01 4640 4949 - Fax : 01 4640 0087  
Email : [info@cifec.fr](mailto:info@cifec.fr) - Web : [www.cifec.fr](http://www.cifec.fr)



certifiée ISO9001





## Le fournisseur d'un système global pour des solutions innovantes de réhabilitation de canalisations sans tranchée

### Que des avantages pour la pérennité de vos réseaux !

- :: Technologie UV 6 x 2.000W
- :: Couche d'usure intégrée et définie
- :: Nouvelle gammes de résines
- :: Durée de vie optimale grâce à des caractéristiques mécaniques élevées
- :: Excellente résistance aux agressions chimiques
- :: Solution adaptée à chaque situation (industrie, zone de captage, etc.)
- :: Dimensionnement mécanique à l'aide du logiciel ASTEE 3R2014

### Un réseau d'applicateurs formés et certifiés !

Propriétés mécaniques	Alphaliner 500	Alphaliner 1500
Module de flexion à court terme (E $\sigma$ ) DIN EN 1228	9270 MPa	13600 MPa
Module de flexion en milieu humide à long terme*	4635 MPa	6800 MPa
Contrainte de flexion à rupture à court terme $\sigma_{fb}$ DIN EN ISO 178	180 MPa	190 MPa
Longueur maximale unique par tuyau	300 m	300 m
Épaisseurs de parois	3 - 25,2 mm	3 - 25,2 mm
Allongement à rupture à long terme	0,68%	0,68%

\*NF EN ISO 11296-4