



Modélisation et paramétrisation hydrologique de la ville, résilience aux inondations

Agathe Giangola-Murzyn

► **To cite this version:**

Agathe Giangola-Murzyn. Modélisation et paramétrisation hydrologique de la ville, résilience aux inondations. Sciences de la Terre. Université Paris-Est, 2013. Français. <NNT : 2013PEST1189>. <pastel-01060497>

HAL Id: pastel-01060497

<https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-01060497>

Submitted on 3 Sep 2014

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.

UNIVERSITÉ — — PARIS-EST

Thèse présentée pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université Paris-Est

Spécialité : Sciences et Techniques de l'Environnement

par

Agathe Giangola-Murzyn

Ecole Doctorale : SCIENCES, INGÉNIERIE ET ENVIRONNEMENT

Modélisation et paramétrisation hydrologique de la ville, résilience aux inondations.

Thèse soutenue le 30 décembre 2013 devant le jury composé de :

Marie-Claire Ten Veldhuis *Rapporteur*

Cedo Maksimovic *Rapporteur*

Jean-Luc Salagnac *Examineur*

Jean-Claude Deutsch *Examineur*

Ioulia Tchiguirinskaia *Examineur*

Daniel Schertzer *Directeur de thèse*



Résumé

L'évolution constante des villes passe par l'urbanisation des zones encore disponibles induisant des effets sur les bilans hydriques des celles-ci. De plus, le changement climatique susceptible d'exacerber les extrêmes (dont les inondations) influence lui aussi ces bilans. La ville est donc un objet hydrologique spécifique qu'il faut replacer dans son contexte évolutif, ce qui élargit considérablement la gamme d'échelles spatio-temporelles à prendre en compte pour son analyse et sa simulation. L'Union Européenne considère que la gestion du risque d'inondation doit remplacer la défense classique contre celle-ci. Cette nouvelle approche est plus holistique : elle prend en compte toutes les composantes du risque et cherche à réduire la vulnérabilité des récepteurs (habitants, bâtiments et infrastructures). Elle débouche sur la question de la résilience des systèmes urbains où les technologies correspondantes doivent être intégrées en des systèmes résilients aux inondations. Il est donc indispensable de développer des outils permettant l'évaluation de la performance de ces derniers, et ce à différentes échelles. Ces préoccupations ont défini l'axe de développement de Multi-Hydro : faire interagir des modèles déjà éprouvés représentant une composante du cycle de l'eau, permettre d'effectuer ainsi des progrès substantiels dans la modélisation de l'eau en ville avec une facilité d'utilisation. Multi-Hydro est ainsi basé sur des équations physiques supportées par des modèles distribués couplés. Grâce à un outil SIG dédié, MH-AssimTool, les informations géographiques et physiques nécessaires à la modélisation sont facilement assimilés pour chaque zone et résolution. En effet, une attention particulière a été portée sur les observables ayant le moins de dépendance en échelle. L'emploi d'outils d'analyse multi-échelles permet de représenter leur variabilité et de définir des paramétrisations robustes du fonctionnement hydrologique à différentes échelles. L'ensemble de ces développements a été utilisé pour aborder la question de la résilience face aux inondations à différentes échelles d'un système urbain, dans le cadre de différents projets européens (SMARTeST, RainGain, BlueGreenDream) ou nationaux (Ville Numérique), à l'aide d'une approche systémique sur des scénarios pour plusieurs cas d'étude : - un petit bassin versant de Villecresnes (Val-de-Marne) qui a servi à l'évaluation des impacts de chaque modification apportée au modèle au cours de son développement. - la partie Est de la commune de Saint-Maur-des-Fossés (Val-de-Marne) qui a subi un audit de l'état du réseau d'assainissement (cartographie précise des canalisations et campagnes de mesures) et dont les résultats préliminaires ont permis de poser la problématique de la modélisation des rivières. - un quartier d'Heywood (grande banlieue de Manchester, Royaume Uni), qui a subi plusieurs inondations durant la dernière décennie et demande une modélisation assez fine pour permettre l'évaluation de l'impact de quatre scénarios de protection. - le bassin versant de la Loup, dont l'exutoire est occupé par un bassin de stockage des eaux de pluie, a été modélisé pour quatre événements d'intensités et de durées variables et a permis de débiter la validation du modèle. - la zone de Spaanse Polder (Rotterdam, Pays Bas), pose la problématique de la modélisation des zones très planes au système de drainage complexes (pompes, exutoires multiples). Cette zone permet de guider les développements futurs de Multi-Hydro. Dans le contexte de l'amélioration de la résilience des villes face aux inondations, Multi-Hydro se place comme étant un outil qui offre la possibilité de simuler des scénarios permettant l'évaluation des impacts à l'échelle globale de modifications à plus petites échelles. Grâce à sa facilité de mise en place que lui confère MH-AssimTool, ainsi que sa structure modulaire et sa liberté de licence, Multi-Hydro est en train de devenir un outil d'aide à la décision.

Abstract

The constant evolution of cities can be seen as the urbanisation of the still available areas. This introduces complex effects with respect to the balance of water. In addition, the highly variable nature of the climate and weather can easily exacerbate the extremes (including floods) thus influencing the water balance. The European Union considers that the management of flood risk is an appropriate strategy to replace conventional defence strategies against floods. This new strategy is a more holistic approach : it takes into account all the components at risk and seeks to reduce the vulnerability of receptors (people, buildings and infrastructures). Thus, resilience measures not only consist of individual technical solutions but they need to be integrated to a 'safety chain', which requires the development of resilience systems and tools. It is therefore essential to develop tools for assessing the performance of the latter, and at different scales. These concerns have help define the development of Multi-Hydro : interacting models already proven to represent different components of the water cycle to allow substantial progress in the modelling of urban water combined with ease use. Multi-Hydro is based on physical equations supported by distributed and coupled models. With a dedicated GIS MH-AssimTool, the geographical and physical information required for modelling are easily assimilated for each zone and at each resolution. Indeed, special attention was paid to the observables with the least scale dependence. Tools for multi-scale analysis are used to represent their variability at smaller scales than their own scales, thus allowing a more robust definition of hydrological parameterisations at different scales. All of these developments have been used to address the issues involved in flooding resilience at different urban system levels, within the framework of the European (Smartest, RainGain and BlueGreenDream) and national (Ville Numérique) projects, using a systemic approach on the scenarios of several case studies : - A small watershed Villecresnes (Val-de-Marne), used to assess the impacts of each change made in the model during its development. - The eastern part of the municipality of Saint-Maur-des-Fossés (Val-de-Marne), has undergone a state audit of the drainage network (precise mapping of pipes and measurement campaigns). The preliminary results helped raise the issue of modelling rivers. - A district at Heywood (suburbs of Manchester, UK), has suffered several floods over the last decade and requires more detailed modelling in order to allow for the assessment of impact of four protection scenarios. - The catchment area of the Loup, whose outlet is connected to a runoff water storage tank, was modelled over four events of varying durations and intensities and helped start the validation of the model. - The Spaanse Polder area (Rotterdam , Netherlands), poses the problem of modelling very flat terrain with a complex drainage system (pumps and multiple outlets). This area will help to guide the future development of Multi-Hydro. In the context of improving the resilience of cities to flooding, Multi-Hydro is therefore placed as a tool that provides the ability to simulate scenarios for impact assessment at the basin scale of changes to smaller scales. Due to its ease of implementation at various scales conferred by MH-AssimTool and its modular structure and its free access property, Multi-Hydro is becoming a support decision tool.

Table des matières

1	Introduction	15
1.1	Le plan de gestion des inondations	15
1.2	Où en est la résilience ?	18
1.3	Où en est la modélisation hydrologique ?	22
1.4	Le contexte de développement : le projet SMARTeST	27
2	Description de Multi-Hydro	31
2.1	Philosophie de développement	31
2.2	Les modèles choisis	32
2.2.1	La modélisation des processus de surface : le modèle TREX	34
2.2.2	La modélisation des écoulements dans la zone non saturée : le modèle VS2DT	38
2.2.3	La modélisation des réseaux d’assainissements : le modèle SWMM	40
2.2.4	La modélisation de la pluie : désagrégation stochastique et modélisation sous-maille	43
2.3	Couplages des modules - au cœur de Multi-Hydro	45
2.3.1	Couplage général	45
2.3.2	La prise en compte de la pluie	46
2.3.3	Connexion des bâtiments au réseau de drainage / assainissement	49
2.3.4	Modification de la topographie en fonction de l’utilisation du sol	49
2.3.5	Débordement des avaloirs	51
2.3.6	Les résultats et leurs visualisations	52
2.3.7	Utilisation du modèle par des personnes non-expertes	54
2.4	Données d’entrée et formatage	56
2.4.1	Les données d’entrées	56
2.4.2	Le formatage de ces données, la nécessité d’une automatisation	58
2.5	Pour résumer	60
3	Application du modèle	61
3.1	Villecresnes, Val de Marne, France	63
3.1.1	Description	63
3.1.2	Résultats	65
3.1.3	Conclusions	79

3.2	Saint-Maur-des-Fossés, Val de Marne, France	80
3.2.1	Description	80
3.2.2	Résultats préliminaires	85
3.2.3	Perspectives	86
3.3	Heywood, Royaume-Unis	88
3.3.1	Description	88
3.3.2	Résultats	91
3.3.3	Conclusions	97
3.4	D'autres applications de Multi-Hydro	98
3.4.1	Le bassin du Loup, Seine-Saint-Denis, France	98
3.4.2	Le cas d'étude de Spaanse Polder, Rotterdam, Pays-Bas	101
4	Conclusion	109
4.1	Un outil puissant...	110
4.2	... qui n'a pas fini d'évoluer	112
A	« Multi-Hydro modelling to assess flood resilience across scales, case study in the Paris region » (proceedings pour la 9^{ème} édition de la conférence « Urban Drainage Modeling »)	125
B	« Impacts of small scale rainfall variability in urban areas : a case study with 1D and 1D/2D hydrological models in a multifractal framework » (soumis Urban Water Journal)	137
C	« Guidance for Flood Resilience Systems » (Extrait du livrable 3.3 du projet SMARTeST)	151
D	« Guideline for implementation of flood resilience construction, technology and systems » (Extrait du livrable 4.3 du projet SMARTeST)	183
E	Structure du modèle Multi-Hydro	207
F	Notice de Multi-Hydro	209
G	Rapport scientifique et technique du projet Ville Numérique relatif à Multi-Hydro	241

Table des figures

1.1	Représentation schématique de la réponse d'un système à une inondation (adapté de Salagnac et al., 2012).	17
1.2	Illustration classique d'une balle dans un état d'équilibre respectivement stable (à gauche) et instable (à droite) correspondant respectivement à une dépression et une colline.	20
1.3	Illustration de la topologie complexe d'un attracteur, ici de l'enchevêtrement homocline pointé par Poincaré (Poincaré, 1892) : les jeux instables font demi-tour et deviennent partie intégrante des jeux stables. On obtient ainsi une topologie de plus en plus compliquée, à chaque itération, de la transformation tangente T.	20
1.4	Évolution dans le temps de la singularité maximale γ_s la plus probable (courbe bleue) et des précipitations maximales P_{max} (courbe rouge) dans le cadre du scénario climatique A2 sur les extrêmes de précipitation avec l'aide du modèle couplé CNRM-CM3 sur une période allant de 1860 à 2100 (adapté de Royer et al., 2008).	22
1.5	Les partenaires du projet SMARTeST (http://www.floodresilience.eu/).	27
1.6	La boîte à outil SMARTeST - aperçu (http://www.floodresilience.eu/).	29
2.1	Représentation d'un bassin versant dans le modèle TREX (d'après Velleux et al., 2008).	35
2.2	Exemple d'artéfact en damiers pouvant avoir lieu avec le modèle TREX. Notez la façon dont se répartit l'eau au niveau de la zone centrale (pixels rouges avec les plus fortes hauteurs d'eau).	38
2.3	Approche simplifiée pour modéliser la surcharge au dessus d'un nœud (Ochoa Rodriguez, 2013).	42
2.4	Dégradation multifractale de données de pluie (image radar fournie par Selex).	44
2.5	Couplage entre les différents modules de Multi-Hydro.	46
2.6	Conception des boucles de Multi-Hydro.	47
2.7	Exemple de donnée de pluie type pluviomètre.	47
2.8	Exemple de pluie générée stochastiquement à partir de cascades multifractales universelles discrètes.	48

2.9	Exemple d'identification des bâtiments en fonction de leur connexion à un avaloir du système de drainage. À gauche avec une condition d'altitude, la plupart des bâtiments se retrouvent associés à l'avaloir n°1. À droite, sans cette condition, la répartition se fait plus équitablement dans ce cas particulier.	50
2.10	Modification de la topographie en fonction de l'utilisation du sol sur le cas de Villecresnes	51
2.11	Fenêtre interactive permettant une utilisation aisée de Multi-Hydro.	55
2.12	Fenêtre globale regroupant les pop-up existantes.	55
2.13	Comparaison de l'assimilation des données d'utilisation du sol avec une priorité sur la classe route (à gauche) et sur la classe maison (à droite) obtenues avec MH-AssimTool.	59
3.1	Approche des cas d'études au sein du projet SMARTeST	62
3.2	Localisation de la zone d'étude sur la ville de Villecresnes.	63
3.3	Répartition de l'utilisation du sol sur le bassin versant de Villecresnes pour une résolution de 10 mètres obtenue manuellement.	64
3.4	Événement pluvieux appliqué sur le cas de Villecresnes. A gauche, l'hydrogramme avec en bleu la pluie uniforme en espace et en temps et en vert la pluie provenant de la dégradation multifractale des données radar. A droite, le cumul d'eau tombé sur le bassin versant dans le cas de la pluie provenant des données radar.	65
3.5	Influence de la connexion des bâtiments sur le débit (en $m^3.s^{-1}$) de ruissellement de surface (à gauche), où la courbe bleue est le débit sans connexion et la courbe verte avec celle-ci. Le débit dans le réseau d'assainissement (à droite) est donné lui aussi avec la connexion (en rouge) et sans (en bleu).	67
3.6	Influence de la modification de la topographie en fonction de l'utilisation du sol sur le débit (en $m^3.s^{-1}$) de ruissellement de surface avec une pluie constante (à gauche) et une pluie variable spatialement et temporellement (à droite). En rouge sans modification de la topographie et en bleu avec.	67
3.7	Influence de la modification de la topographie en fonction de l'utilisation du sol sur le débit (en $m^3.s^{-1}$) dans le réseau d'assainissement avec une pluie constante (à gauche) et une pluie variable spatialement et temporellement (à droite). En rouge sans modification de la topographie et en bleu avec.	68
3.8	Zoom sur l'exutoire du bassin versant de Villecresnes avec une résolution de 10 mètres.	68
3.9	Impact de la modification de la topographie sur les cartes de hauteur d'eau (à gauche sans, à droite avec) à la fin de l'événement pluvieux. Les hauteurs sont données en mètre, mais un seuil a été mis en place pour accentuer la variation de répartition des eaux.	69

3.10	Variation au cours du temps des paramètres α (en jaune avec une topographie modifiée et en bleu pour une topographie « brute ») et C_1 (en vert avec une topographie modifiée et en rouge pour une topographie « brute ») des hauteurs d'eau en surface. En haut, il s'agit de l'analyse des résultats obtenus avec la pluie uniforme et en bas avec la pluie spatialisée.	70
3.11	Évolution temporelle de γ_s pour les paramètres UM estimés (figure 3.10 pour une topographie « brute » sous une pluie uniforme (en orange) et sous une pluie spatialisée (en bleu), aussi bien que pour une topographie modifiée (respectivement en rouge et en vert).	71
3.12	Hauteur d'eau (en mètres) remise à disposition pour le ruissellement par le module de sol au bout de 27 minutes de simulation (à gauche) et 15 minutes plus tard (à droite).	72
3.13	Évolution au cours du temps de la dimension fractale (D_f) des hauteurs d'eau infiltrées (en haut) et restant en surface (en bas) pour chacune des conductivités hydrauliques (en $m.s^{-1}$) et chacun des scénarios de pluie. Le temps est donné en minutes.	74
3.14	Évolution au cours du temps des paramètres α et C_1 des hauteurs d'eau en surface pour une conductivité hydraulique de l'ordre de $10^{-6} m.s^{-1}$ en haut et de l'ordre de $10^{-4} m.s^{-1}$ en bas. Le temps est donné en minutes.	76
3.15	Évolution au cours du temps (en minutes) des hauteurs maximales (en mètres) pour une pluie uniforme et des conductivités hydrauliques de $10^{-6} m.s^{-1}$ (en bleu) et de $10^{-4} m.s^{-1}$ (en vert).	77
3.16	Évolution au cours du temps (en minutes) des singularités maximales (en bleu et en vert) et normalisée (en orange et en rouge) pour une pluie uniforme et des conductivités hydrauliques de $10^{-6} m.s^{-1}$ (en bleu et en orange) et de $10^{-4} m.s^{-1}$ (en vert et en rouge).	77
3.17	Évolution au cours du temps (en minutes) des hauteurs maximales (en mètres) pour une pluie spatialisée et des conductivités hydrauliques de $10^{-6} m.s^{-1}$ (en bleu) et de $10^{-4} m.s^{-1}$ (en vert).	78
3.18	Évolution au cours du temps (en minutes) des singularités maximales (en bleu et en vert) et normalisée (en orange et en rouge) pour une pluie spatialisée et des conductivités hydrauliques de $10^{-6} m.s^{-1}$ (en bleu et en orange) et de $10^{-4} m.s^{-1}$ (en vert et en rouge).	79
3.19	Localisation de la barrière périmétrique virtuellement installée sur le bassin versant de Villecresnes.	80
3.20	Effet de la mise en place de la barrière périmétrique sur les hauteurs d'eau (en mètre) du quartier de Villecresnes, à gauche sans protection et à droite avec. Un seuil de visualisation à été mis en place à 9 cm bien que les hauteurs maximales soient de 50 cm dans le premier cas et de 20 cm dans le second.	81
3.21	Débit de ruissellement à l'exutoire du bassin versant de Villecresnes, avant (à gauche) et après (à droite) la mise en place d'une barrière périmétrique.	81
3.22	Influence de la transformation des courts de tennis en noue sur le débit de ruissellement à l'exutoire du bassin versant de Villecresnes.	82

3.23 Synthèse du cas d'étude de Villecresnes.	83
3.24 Localisation du cas d'étude de Saint-Maur-des-Fossés, Val de Marne, France.	84
3.25 Topographie du cas d'étude de Saint-Maur-des-Fossés. Les altitudes sont données en mètres.	84
3.26 Classification de l'utilisation du sol sur le cas d'étude de Saint-Maur-des-Fossés (avec la présence des ponts) obtenue avec MH-AssimTool pour une résolution de 20 mètres.	85
3.27 Hauteurs d'eau (en mètres) à la fin de l'évènement sur le cas d'étude de Saint-Maur-des-Fossés sans modification de la topographie.	86
3.28 Hauteurs d'eau (en mètres) à la fin de l'évènement sur le cas d'étude de Saint-Maur-des-Fossés avec modification de la topographie.	86
3.29 Nouvelles limites des trois nouveaux bassins versants sur le département du Val de Marne et ancienne limite pour les études préliminaires.	87
3.30 Situation d'Heywood par rapport à Manchester, Royaume-Unis.	89
3.31 Topographie de la zone d'Egerton Street et Wilton Grove. Il s'agit ici des données d'élévation telles qu'elles sont utilisées dans Multi-Hydro, c'est-à-dire avec une résolution horizontale de 15 mètres.	90
3.32 Localisation des limites du cas d'étude d'Heywood pour le premier scénario (à gauche) et pour les trois scénarios suivants (à droite).	91
3.33 Evolution au cours du temps (en minutes) de l'intensité de la pluie (en mm/h) modélisée sur la zone de Wilton Grove.	91
3.34 Carte des hauteurs d'eau sur la zone d'Egerton Street - Wilton Grove avec une résolution de calcul de 15 mètres	92
3.35 Débit (en $m^3.s^{-1}$) défini par la modélisation à 15 mètres pour les flux latéraux des modélisation à plus fine résolution.	93
3.36 Carte de hauteur d'eau dans Wilton Grove en fin d'évènement avec une résolution de calcul de 1 mètre.	93
3.37 Hauteur d'eau à la fin de l'évènement après installation de deux barrières sur Wilton Grove (calculs effectués avec une résolution de 1 mètre).	94
3.38 Hauteur d'eau à la fin de l'évènement après installation d'une barrière sur Wilton Grove et d'une autre sur Egerton Street (calculs effectués avec une résolution de 2 mètres).	95
3.39 Hauteur d'eau à la fin de l'évènement après installation d'une noue de 1,50 mètre de profond entre Wilton Grove et Egerton Street (calculs effectués avec une résolution de 2 mètres).	96
3.40 Hauteur d'eau à la fin de l'évènement après installation d'une noue de 50 centimètre de profond et de deux barrières sur Wilton Grove et Egerton Street (calculs effectués avec une résolution de 2 mètres).	97
3.41 Synthèse du cas d'étude d'Heywood.	103
3.42 Localisation du bassin du Loup à Villepinte, Seine-Saint-Denis (France).	104
3.43 Utilisation du sol pour le bassin versant du Loup avec une résolution de 10m (Abbes (2013)).	104

3.44	Évolution du volume entrant dans le bassin de rétention pour l'évènement du 9 février 2009	105
3.45	Résultats des simulations de l'évènement du 15 août 2010 (Abbes (2013)).	105
3.46	Résultats des simulations de l'évènement du 15 décembre 2011 (à gauche) et du 14 juillet 2010 (à droite) (Abbes (2013)).	106
3.47	Localisation de Spanse Polder, Rotterdam (Pays-Bas).	106
3.48	Influence du mobilier urbain sur la topographie avec un MNE d'une précision horizontale de 50 cm.	107
3.49	Carte du réseau de drainage des eaux de ruissellement sur le cas d'étude de Spaanse Polder à Rotterdam.	108

Remerciements

Ce travail n'aurait pas pu voir le jour sans l'aide et le soutien d'un grand nombre de personnes. Je sais que ces personnes savent ce que je leur dois et qu'elles ne se froisseront pas si elles ne sont pas mentionnées dans les lignes si dessous.

C'est évidemment un grand merci que je souhaite envoyer à Ioulia et Daniel pour leur accueil, leur patience, et leur générosité tant sur le plan scientifique que humain. Plonger le monde de la recherche avec vous à été une aventure mouvementée, riche et pleines d'anecdotes toutes plus intéressantes les unes que les autres. Vous m'avez laissé l'occasion d'avancer à mon rythme, en me soutenant lorsque j'en avais besoin. Et puis, à force de répétitions, les multifractales, c'est pas si terrible que ça en a l'air !

Je tiens à remercier les membres de mon jury pour avoir accepté une date de soutenance peu commode, mais grâce à vous je finirai l'année en beauté pour en attaquer une nouvelle avec un poids de moins sur les épaules. Alors merci à vous Marie-Claire, Cedo, Jean-Claude et Jean-Luc.

Il faut aussi que je remercie George, pour ces premiers mois plutôt silencieux qui sont vite devenus des cours linguistiques acharnés. Nous n'avons pas fait le tour de l'origine des expressions en français et en anglais et il me semble qu'il reste pas mal de mots d'argot ardennais qui devraient alimenter la discussion...

Pour continuer avec l'équipe HM&Co, je remercie Auguste pour ses commentaires, ses corrections, son utilisation de Multi-Hydro et pour avoir finalement envisagé linux comme une possibilité. Finalement, on arrivera à faire de toi un vrai geek !

Cette équipe est quand même la plus sympa, avec ses gâteaux et ses carambars. Merci à vous tous pour cette ambiance.

Je fais un gros bisous à Annick et Catherine. Sans vous nous sommes perdus !

Pour finir, le plus important de tous. Merci à toi, Jul, d'être à mes côtés, tout simplement.

Chapitre 1

Introduction

1.1 Le plan de gestion des inondations

D'après le rapport des Nations Unies (UN, 2013), en 2011, 52.1% de la population mondiale vivaient en ville ou en zone urbanisée. Ce taux passe à 77.7% si l'on ne considère que les zones les plus développées. En Europe de l'Ouest, ce taux est de 79.8% et devrait monter à 87.7% d'ici à 2050. Pour la France, il est estimé qu'actuellement 85.8% de la population vit en ville et c'est 93.3% des gens qui y habiteront en 2050. Cet afflux massif d'habitants implique donc une extension des zones urbaines, ce qui passe par une intensification de l'urbanisation des zones péri-urbaines via la reconversion d'anciennes zones industrielles ou l'occupation des espaces libres (champs et friches). Cette évolution se traduit donc par une augmentation importante de la portion des surfaces imperméabilisées de ces zones, ce qui crée de nouvelles problématiques de ruissellement en cas de fortes pluies. Qui plus est, le dernier rapport du GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat, IPCC, 2013) indique que le changement climatique tend à augmenter la fréquence des événements extrêmes, dont les fortes pluies orageuses, pour les zones de latitudes moyennes.

Une conséquence attendue de ces deux phénomènes est l'augmentation des volumes d'eau impliqués dans le ruissellement de surface et qui vont potentiellement grossir les flux transitant par les réseaux de drainage. La gestion de ces eaux est donc progressivement devenue une préoccupation majeure pour les gestionnaires des villes.

Les inondations aux abords des rivières et des côtes maritimes aussi bien que provoquées par les ruissellements urbains provoquent des dommages qui peuvent s'avérer désastreux tant sur le plan humain que sur le plan économique. Cependant, l'urbanisation constante dans les zones inondables est une indication claire des choix des populations concernées. Les inondations et leurs dommages restent donc un problème majeur à l'échelle mondiale. Il est de plus estimé que les effets du changement climatique pourraient aggraver la situation dans les années à venir. L'amélioration de la prévention et de la protection contre les inondations devient ainsi un enjeu de plus en plus important, tendance qui devrait se confirmer dans le futur proche.

Durant la dernière décennie, une stratégie commune de gestion des inondations s'est mise en place à travers l'Europe ([Water Initiative, 2003](#)). Cette stratégie suit une approche à l'échelle des bassins versants des rivières et considère que les points suivants doivent être impérativement pris en compte lors du développement des programmes de gestion des risques d'inondation :

- **Prévention** Elle passe par la prévention des dommages causés par les inondations en évitant la construction d'habitations et d'industries dans les zones inondables que ce soit dans le présent ou dans le futur, par l'adaptation des développements à venir dans ces zones, et par la mise en avant de pratiques appropriées en terme d'utilisation du sol, d'agriculture et de foresterie.
- **Protection** Il s'agit de mettre en place des mesures à la fois structurelles et non structurelles (ou mesures de résilience) pour réduire la probabilité et/ou l'impact des inondations pour une zone spécifique.
- **Préparation** Elle passe par l'information des populations vis-à-vis des risques d'inondation et de la conduite à tenir en cas de survenue de celles-ci.
- **Réponse en situation d'urgence** Cet aspect concerne le développement de plans d'actions en cas d'urgence lors des inondations.
- **Restauration et Apprentissage** Il s'agit de revenir à des conditions de fonctionnement du système le plus rapidement possible et d'atténuer les impacts socio-économiques sur les populations affectées.
- **Recherche** Le développement de la recherche est indispensable à une meilleure compréhension des contextes climatique, hydrologique et paysager des inondations.

Les plans de gestions des inondations ont été développés au sein de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE, [Parliament, 2000](#)). Cette directive a été introduite en Décembre 2000 et implémentée dans de nombreux pays de l'Union Européenne. Elle vise à rétablir l'état des milieux aquatiques (tels que les rivières, les lacs, les eaux côtières et les eaux souterraines) à travers toute l'Europe et à prévenir toute détérioration future. Si la DCE n'adresse pas directement de recommandations en terme de protection contre les inondations, elle le fait en posant la nécessité d'une non détérioration future du milieu fluvial et d'un maintien d'une bonne qualité écologique et chimique de celui-ci. Ainsi, un but additionnel de la Directive porte sur la réduction des impacts des inondations bien que la mise en place de mesures de protection contre celles-ci ne soit pas spécifiquement décrite.

L'Union Européenne progresse continuellement dans son action en terme de gestion des inondations, et une Directive Inondations a été publiée en 2008 ([Commission et al., 2007](#)). L'objectif de celle-ci est de réduire et de gérer les risques d'inondation pour les populations, les propriétés et l'environnement concernés par le biais d'actions au niveau des bassins fluviaux et des zones côtières. Le terme « inondation » dans cette directive traduit d'un recouvrement temporaire par l'eau d'une surface normalement non recouverte par celle-ci, et le terme « risque d'inondation » signifie une combinaison entre la probabilité de survenue d'une inondation et les conséquences potentielles de cet évènement sur la santé publique, l'environnement, le patrimoine culturel et les activités économiques de la zone.

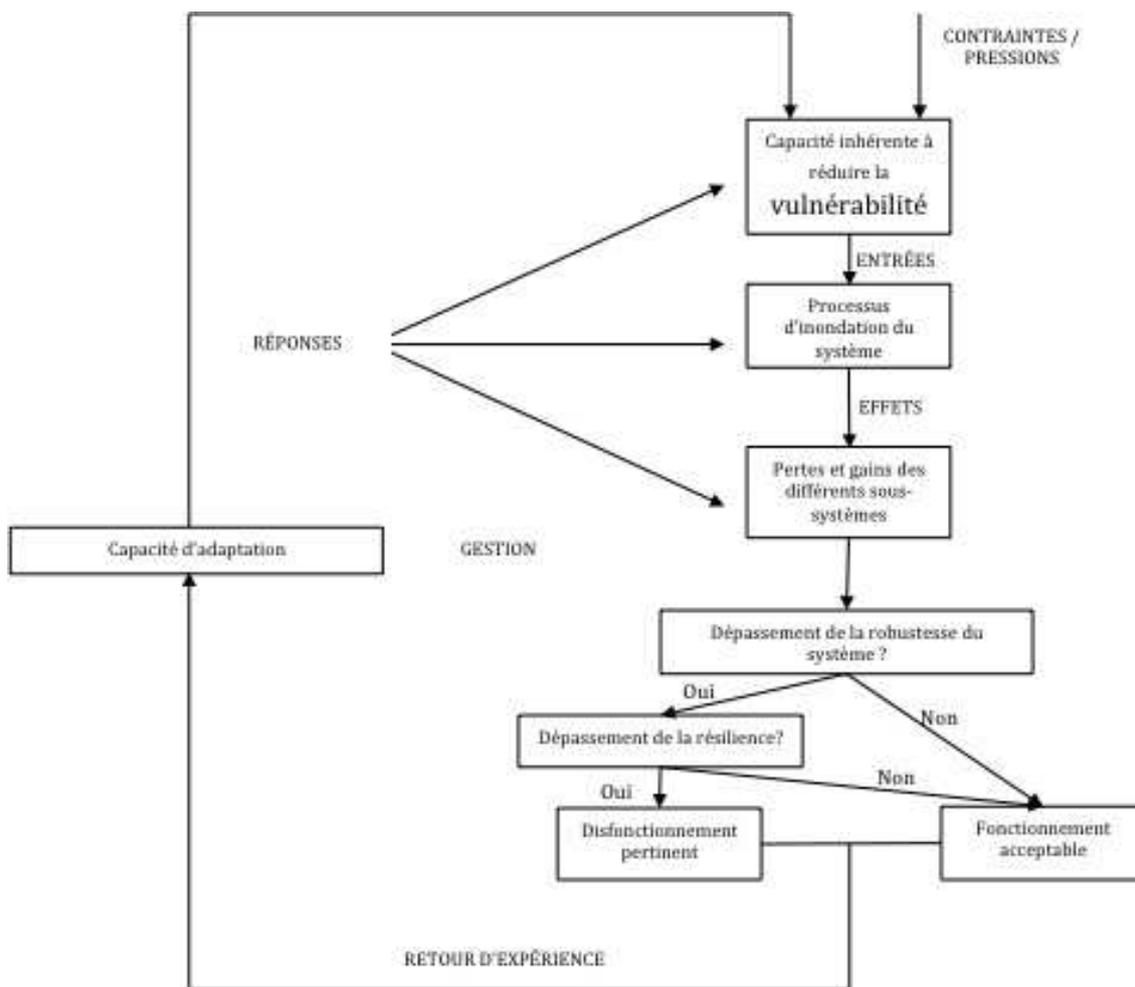


FIGURE 1.1 – Représentation schématique de la réponse d’un système à une inondation (adapté de Salagnac et al., 2012).

Le problème de la gestion du risque d'inondation en ville a été dans sa globalité le sujet d'une recherche récente et d'autres initiatives au sein de l'Europe. De nos jours, il est largement accepté que les inondations restent un risque sérieux pour l'Europe et qu'il ne peut être que réduit et non supprimé (Le Quentrec et al., 2009 ; Zevenbergen et al., 2010). Les auteurs définissent dans ce livre la « gestion du risque d'inondation » comme un système complexe et dynamique qui s'adapte aux changements dans les contraintes liées à ce risque. Cela intègre un Sous-système Physico-Environnemental (SPE) et un Sous-système Socio-Economique (SSE) avec des interactions mutuelles. La figure 1.1 représente ainsi une conceptualisation dynamique de la façon dont la gestion vise la flexibilité et la réversibilité dans le SPE. L'état de stabilité dynamique, plus connue sous le nom de résilience socio-économique (Folke et al., 2010), est nécessaire pour maintenir la résilience adaptative face au changement. La complexité d'un système (péri-)urbain augmente les incertitudes et diversifie les actions sociétales. Cela impose de mettre l'accent en majeure partie sur le développement de systèmes urbains résilients aux inondations. Ainsi, tout en conservant comme but ultime d'un SPE et d'un SSE résilients, les simulations de scénarios et leurs analyses doivent donc être développées non seulement comme des outils pédagogiques, ce qu'ils sont, mais également en tant qu'outils d'aide à la décision.

1.2 Où en est la résilience ?

Les débuts de la résilience aux inondations en France peuvent être datés au XVIII^e siècle. La capitale du Dauphiné, Grenoble, a été inondée deux fois par l'Isère, tout d'abord en 1733 puis en 1740. La résilience aux inondations était alors principalement basée sur la dynamique des territoires à l'échelle de la ville et de ses alentours. Entre la survie et la solidarité, l'arbitrage des acteurs sociaux était le point clef pour la résilience socio-économique du système grenoblois (Blanchard, 2008). Les mêmes dynamiques peuvent être observées dans le nord de la France sur la même période. C'est notamment le cas de la ville d'Amiens qui a été inondée de nombreuses fois au cours des XVII^e et XVIII^e siècles, principalement du fait de la fonte de l'important manteau neigeux. Les deux dernières inondations, en 1658 et en 1784, n'ont impliquées que peu d'impact sur le court des denrées alimentaires et textiles. En effet, de nombreuses mesures de préventions et d'entre-aide ont été mises en place par les communes et ont fait l'objet d'ordonnances du Magistrat de Lille (PITEL, 2011). Ces exemples montrent que la cohésion sociale et ses tensions ont supporté une adaptation rapide de la société. Cela nous donne un exemple fascinant du passage de la résilience d'un simple statut de conscience vers une construction et une intégration du risque dans les opérations sociales.

Approche du système dynamique

De nos jours, la résilience aux inondations est devenue d'utilité internationale avec l'accroissement continu du nombre de cas recensés sur internet. La pratique de la résilience aux inondations, incluant la mise en place de mesures structurelles, est multidisciplinaire, impliquant ainsi l'intégration de multiples aspects dans les processus de décisions. L'évaluation de l'efficacité des scénarios de résilience aux inondations simulés avec des modèles hydrologiques distribués

ne peut pas être achevée, tout comme avec les autres modèles (par exemple en écologie : [Carpenter et al., 2001](#)), sans définitions opérationnelles de la résilience. Malheureusement, bien que le terme « résilience » soit devenu très à la mode, une définition correspondante en mathématiques reste plutôt difficile à atteindre. Plus précisément, les analyses de scénarios nécessitent la définition mathématique des unités de la résilience, basées quant à elles sur des définitions conceptuelles.

Cette définition conceptuelle de « l'habilité à faire face aux inondations et l'habilité de se remettre d'une inondation » de [Lawson \(2011\)](#) est proche de celle de la « résilience écologique » proposée par [Holling \(1973\)](#) : « la capacité d'un système à absorber les perturbations et à se réorganiser pendant le changement tout en gardant essentiellement la même fonction, structure, identité et rétroactions ». La conceptualisation dynamique du système de gestion des inondations s'appuie donc sur une définition générale du système dynamique. Rappelons qu'un système dynamique ([Arrowsmith, 1990](#)) est défini à l'aide de variables d'état x , qui, selon un espace d'état donné (généralement un espace vectoriel réel à d dimensions) et un système différentiel qui définit son évolution depuis une condition initiale x_0 . De manière générale, ce système est supposé être autonome (pas de dépendance explicite en temps), de premier ordre et dépendre d'un jeu de paramètres μ donné :

$$\frac{dx(t)}{dt} = f_{\mu}(x(t)), \text{ avec } x(t_0) = x_0 \quad (1.1)$$

Dans une approche d'un système dynamique comme celui-ci, à la place d'essayer de calculer la trajectoire détaillée $x(t)$, on tente de renseigner ses aspects qualitatifs depuis les vraies caractéristiques du système différentiel. C'est par exemple le cas les valeurs caractéristiques des paramètres μ qui correspondent au changement qualitatif des trajectoires, c'est-à-dire qui traduisent des bifurcations ou des tournants. En particulier, une valeur intéressante est celle des états d'équilibre x_e qui sont invariants pour les dynamiques :

$$f_{\mu}(x_e) = 0 \quad (1.2)$$

Un état d'équilibre x_e est stable s'il attire tous les états aux alentours, et instable si certains de ces derniers sont rejetés. (voir figure 1.2 pour la représentation classique d'une balle dans un paysage, où dans le second cas, on offre la stabilité de la balle par la mise en place d'un mur). Plus généralement, un attracteur est un ensemble d'états invariants selon les dynamiques, avec un bassin d'attraction unique formé par les états voisins qui sont attirés vers cet ensemble. Les dynamiques du système peuvent cependant être délimitées qualitativement avec l'aide de ses attracteurs, puisque les variables d'état $x(t)$ vont parcourir un bassin d'attraction (stable) donné jusqu'à ce qu'une perturbation assez forte puisse les conduire vers un autre bassin (et ainsi de suite).

Cette phénoménologie d'attracteur appelle fortement à définir une unité de la résilience : certains bassins d'attraction correspondent à un fonctionnement adapté du système, tandis que les autres doivent être exclus autant que possible. Du fait que le temps passé par le système dans la zone adaptée doit être maximisé, le temps de retour depuis ces zones et/ou la taille de celles-ci peut/peuvent être utilisé(s) comme unité(s) pour la résilience.

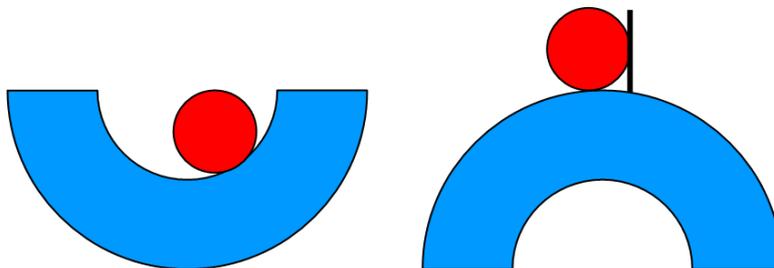


FIGURE 1.2 – Illustration classique d'une balle dans un état d'équilibre respectivement stable (à gauche) et instable (à droite) correspondant respectivement à une dépression et une colline.

Grâce au fait que le Théorème Ergodique Multiplicatif (Lyapunov, 1907) s'applique à des conditions modérées des systèmes différentiels, ce temps de retour inverse correspond tout simplement à l'exposant de Lyapunov, c'est-à-dire à la plus grande partie réelle du spectre de la transformation tangente de la carte qui définit le système différentiel (voir f_μ dans l'équation 1.1). Cette unité a d'ores et déjà été utilisée pour l'analyse de problèmes écologiques (PIMM and LAWTON, 1977 ; DeAngelis, 1980). Bien que l'estimation de la taille de la zone de convergence soit moins simple, cette méthode a été utilisée pour des dynamiques de population de faibles dimensions (Collings and Wollkind, 1990 ; Van Coller, 1997).

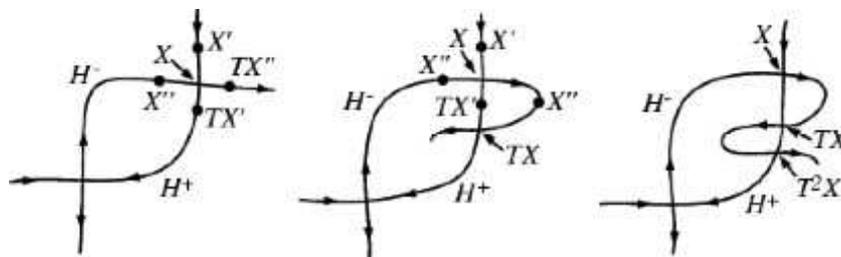


FIGURE 1.3 – Illustration de la topologie complexe d'un attracteur, ici de l'enchevêtrement homocline pointé par Poincaré (Poincaré, 1892) : les jeux instables font demi-tour et deviennent partie intégrante des jeux stables. On obtient ainsi une topologie de plus en plus compliquée, à chaque itération, de la transformation tangente T .

Limites de l'approche du système dynamique

En dépit que son élégance mathématique et de sa rigueur apparente, il y a plusieurs limites dans l'approche du système dynamique (Folke et al., 2010 ; Martin et al., 2011). Cela inclut :

1. Les bassins d'attraction entraînent des comportements assez complexes, allant de cycles limites à des attracteurs chaotiques avec une topologie assez complexe. Un exemple classique est l'enchevêtrement homocline, déjà souligné par Poincaré (Poincaré, 1892) et illus-

tré dans la figure 1.3 : les jeux instables font demi-tour et deviennent partie intégrante des jeux stables (Waalkens and Wiggins, 2010).

2. Bien que l'approche du système dynamique semble être assez général, il existe beaucoup de difficultés techniques pour aller au delà des systèmes différentiels ordinaires : il y a en effet des différences fondamentales entre les systèmes complexes en temps (systèmes différentiels ordinaires) et ceux qui sont complexes à la fois en temps et en espace (systèmes différentiels partiels). Le point clef avec ce dernier est l'émergence de l'échelle spatiale et la dépendance des variables d'état associée, ainsi que l'interaction entre les échelles spatiales et temporelles (May, 1973 ; Pimm, 1984). Ceci est particulièrement important pour l'estimation des temps de retour inverses, car ils dépendent de l'échelle spatiale d'observation et de l'impossibilité d'appliquer le Théorème Ergodique Multiplicatif (Schertzer and Lovejoy, 2004).
3. Aucun retour n'est pris en compte. C'est particulièrement impactant pour les mesures des structures résilientes, alors qu'il est important en tant que but d'évaluer deux stratégies différentes de gestion face aux inondations qui, à un temps donné, implémentent des mesures de résilience (structurelle ou non) distinctes.
4. Alors qu'il peut déjà y avoir des difficultés importantes avec l'idée que le fonctionnement désiré d'un bassin hydrologique naturel correspond à un bassin de convergence dynamique, cela peut être remis en question pour un bassin hydrologique hautement anthropisé.

Surmonter la complexité espace-temps : la résilience multi-échelle

Comme l'a argumenté Martin et al. (2011), la théorie de la viabilité¹ permet de surmonter les limitations 3 et 4 de l'approche du système dynamique, mais pas la limitation 2, c'est-à-dire la complexité espace-temps. En effet, tous les cas d'études environnementaux qui ont été examinés avec une approche viable ont été largement réalisés avec l'aide de modèles simplifiés qui ne sont complexes qu'en temps et impliquent uniquement des variables globales, comme par exemples des populations d'espèces ou alors des moyennes de concentration de phosphate dans les lacs. Il y a ainsi un écart par rapport aux simulations effectuées à l'aide d'un modèle distribué. Plus généralement, « *la résilience multi-échelle est fondamentale pour la compréhension de l'interaction entre la persistance et le changement, l'adaptabilité et la transformabilité. Sans la dimension d'échelle, la résilience et la transformation peuvent sembler être à l'opposé voire même en conflit* » (Folke et al., 2010).

Une définition opérationnelle de la résilience multi-échelle devrait à présent être atteinte. Ceci est possible dès que les symétries d'échelles peuvent être considérées, car elles réduisent considérablement la complexité espace-temps en définissant les échelles observables indépendantes depuis les champs initiaux qui sont sensiblement dépendant de l'échelle (voir par exemple Schertzer et al., 2010). Pour être indépendante de l'échelle et a fortiori définie à travers les échelles plutôt que pour une échelle donnée, la résilience multi-échelle devrait être déterminée à l'aide de

1. qui cherche à représenter les systèmes évolutionnaires mathématiquement et numériquement en prenant en compte les contraintes d'optimalité

ces nouvelles variables que sont les singularités du champ, comme par exemple l'exposant de la divergence (algébrique) du champ observé dans des échelles de plus en plus petites. Accessoirement, ces quantificateurs d'échelles indépendantes commencent à être utilisés pour analyser les inondations en milieu urbain. Ceci est actuellement obtenu par exemple avec l'aide de la singularité maximale la plus probable γ_s (Tchiguirinskaia et al., 2011), qui a été utilisée pour quantifier l'évolution multi-échelle des extrêmes hydrologiques dans les scénarios climatiques (Royer et al., 2008), voir figure 1.4). Cette figure illustre que γ_s est bien plus stable que la pluie maximale P_{max} (courbe rouge) et par conséquent montre une augmentation assez nette des extrêmes de la précipitation, qui sont masqués dans les fluctuations de la pluie maximale.

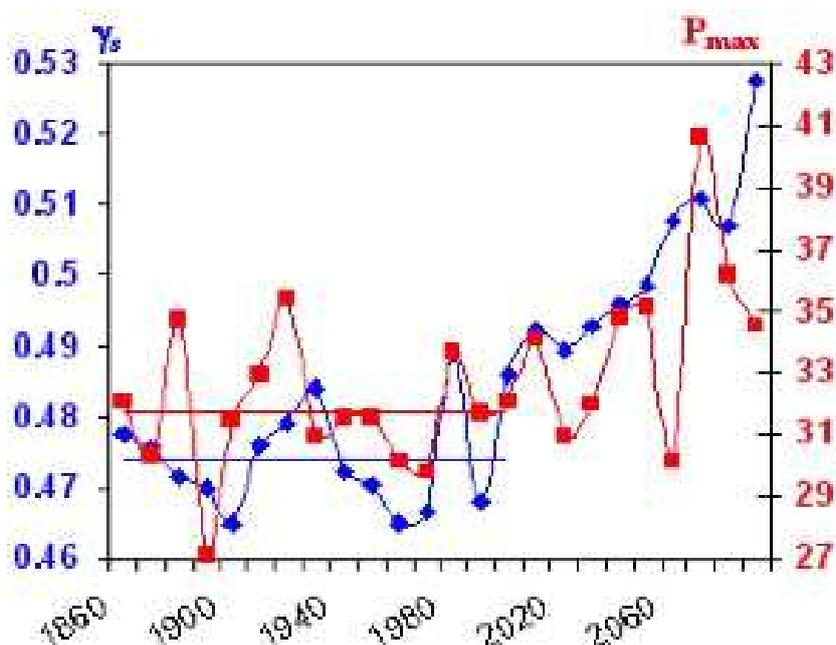


FIGURE 1.4 – Évolution dans le temps de la singularité maximale γ_s la plus probable (courbe bleue) et des précipitations maximales P_{max} (courbe rouge) dans le cadre du scénario climatique A2 sur les extrêmes de précipitation avec l'aide du modèle couplé CNRM-CM3 sur une période allant de 1860 à 2100 (adapté de Royer et al., 2008).

Dans le chapitre 2 du manuscrit, nous reviendrons plus en détails sur la question de la singularité maximale la plus probable γ_s . Puis dans le chapitre 3 nous discuterons des résultats de cette analyse appliquée aux scénarios SMARTeST simulés avec l'aide de Multi-Hydro pour évaluer la résilience multi-échelle des systèmes résilients aux inondations d'une manière indépendante en échelle.

1.3 Où en est la modélisation hydrologique ?

La modélisation hydrologique des milieux urbains et péri-urbains permet, parmi de nombreux buts, d'améliorer la compréhension et la prévision des comportements hydrologiques. Cette tâche

est très importante pour la gestion des réseaux d'assainissement en ville, notamment lors des épisodes de fortes pluies. Pour se faire, il existe un nombre croissant de modèles hydrologiques et hydrauliques, chacun ayant leurs domaines d'applications spatio-temporels et leurs schémas de représentation. Il est ainsi possible de classer les approches (Singh et al., 1995 ; Ambroise, 1999 ; Hingray et al., 2009) en fonction de la représentation spatiale (modèles distribués, semi-distribués ou globaux), de la représentation temporelle (modèles événementiels ou continus) et de la représentation des processus physiques (modèles conceptuels, à base physique, empiriques ou stochastiques). De plus, l'association de ces modèles pour former des couplage ou des chaînes de modélisation permettent de mixer ces propriétés pour créer des outils qui correspondent aux besoins des utilisateurs et des systèmes modélisés. La section précédente (voir 1.2, page 21) porte en avant une modélisation qui implique l'importance de pouvoir étudier les phénomènes à travers les échelles et impose donc l'utilisation de modèles à bases physiques permettant le changement d'échelle sans passer a priori par la case de calibration.

Quelques outils présents sur le marché

Dans leur analyse, Fletcher et al. (2013) ont montré l'étendue de la grande variété de modèles et d'outils qui existent dorénavant pour aider les gestionnaires des villes à prendre les bonnes décisions. Cependant, ces outils restent très fragmentés et nécessitent toujours une profonde compréhension des dynamiques et de interactions qui entrent en jeu dans le cycle de l'eau urbain. De plus, les auteurs de cette revue démontrent qu'il reste une importante part du travail à faire pour représenter les interactions entre les zones perméables et imperméables. Ces interactions entrent d'ailleurs fortement en jeu dans les milieux péri-urbains où les zones imperméabilisées (routes, bâtiments, parkings, ...) côtoient les surface perméables (parcs et jardins, zones de cultures, ...). Même si cette conclusion semble indiquer un besoin d'une modélisation totalement distribuée, certaines approches uni-dimensionnelle et semi-distribuée restent intéressantes.

Le modèle AOFD (pour Automatic Overland Flow Delineation, Maksimovic et al., 2010) est basé sur la détermination de la localisation des flaques d'eau et du réseau de connexions entre ces flaques par le biais d'une analyse automatique du modèle numérique de terrain pour calculer les zones inondées et du débit dans le réseau d'assainissement. Une telle approche est intéressante puisqu'elle permet des calculs très rapides et peut ainsi être utilisée pour l'analyse à court terme de l'impact de la pluie et pour la prévision des inondations. Cependant, vu que cette méthode est basée sur l'analyse d'un modèle numérique de terrain, elle nécessite une donnée de très haute qualité et de nombreuses manipulations de celle-ci dans le but de supprimer certains artefacts (flaques minuscules et/ou apparaissant dans les bâtiments). De plus, cette méthode admet l'hypothèse que le cheminement de l'eau en surface n'est pas modifié au cours de l'événement selon les conditions hydrologiques du sol. Simoes et al. (2011) ont utilisé cette approche couplée avec une modélisation bi-dimensionnelle des mouvements de l'eau, mais sans résoudre totalement le problème du cheminement fixe de l'eau ni les manipulations du modèle numérique de terrain.

Les modèles semi-distribués tels que les modèles URBS (Rodriguez et al., 2005), BEMUS (Khu et al., 2006), MUSIC (Obropta and Kardos, 2008), CANOE (Alison, 2005), SOBEK (Deltares, 2013 ; van Heeringen et al., 2002) ou SWMM (Rossman, 2010) se basent sur le découpage du domaine de modélisation en sous-éléments homogènes d'un point de vue hydrologique. Chaque sous-partie est décrite par un pourcentage de zone imperméabilisée qui implique la détermination d'un coefficient de ruissellement utile pour la mise en place de fonctions de transfert. Ce type d'approche permet des calculs rapides sur des zones très étendues. En effet, comme les sous parties prennent en compte la même proportion de surfaces imperméabilisées, ces éléments deviennent de plus en plus grands dans les zones péri-urbaines et le nombre de calculs unitaires diminue. Ces modèles comportent également une partie de calculs distribués pour la représentation du réseau d'assainissement et/ou de drainage en une dimension. Cependant, ces méthodes impliquent la calibration du coefficient de ruissellement ce qui peut créer de nombreuses incertitudes. Le modèle URBS est quant à lui un peu différent puisqu'il se base sur les parcelles cadastrales, prenant en compte un bâti, une parcelle perméable (jardin) et une portion imperméable correspondant à la chaussée. Jankowfsky (2011) a mis en place, durant sa thèse, un outil permettant de découper une zone d'étude (généralement un bassin fluvial) en sous-bassins puis d'y appliquer une modélisation « à la carte » (choix des modules utilisés selon les besoins/désirs de la modélisation) incluant URBS. Cependant, ce type de modélisation peut fortement compliquer la prise en compte de la grande variabilité spatiale connue des champs de pluie. Or, la calibration du coefficient de ruissellement dépend fortement de ce champ de pluie ce qui multiplie les sources d'incertitudes (Arnaud et al., 2002).

Concernant les modèles distribués, qui eux permettent de prendre en compte la distribution spatiale de la pluie, les plus connus sont les modèles de la série MIKE. Il s'agit d'une suite commerciale, qui est donc très bien fournie en terme de développement et de services après-vente. Le couplage entre MIKE SHE (basé sur le modèle libre SHE, Soni et al., 1997, qui ne tenait pas compte des réseaux car développé pour une utilisation rurale) et le package MOUSE fournit une représentation complète du cycle de l'eau en milieu urbain et péri-urbain (Graham and Butts, 2005). Les mêmes résultats peuvent être obtenus en associant MIKE SHE à MIKE 11 (Thompson et al., 2004). Cependant, malgré un important support à l'utilisation des modules, leur couplage nécessite la mise en place de procédures qui demandent un temps de développement important dès qu'elles ne sont pas celles déjà en place. Si les résultats donnés par ces approches sont encourageants (Sto Domingo et al., 2010), ils posent la question de la sélection des différents modules parmi une collection vastes d'outils aux propriétés tout aussi variées ainsi que du coût des licences requises pour fournir un tel travail. Concernant ces licences, elles ont souvent un coût réduit pour la recherche, mais limitent aussi la diffusion des outils de la recherche pour une application par les collectivités ou les gestionnaires des villes.

D'autre part, il existe des outils totalement distribués qui ne représentent qu'une part du cycle de l'eau. C'est notamment le cas de TREX (pour Two dimensional Runoff EXport, Velleux et al., 2011) ou de TOPMODEL (Beven et al., 1995) qui permettent une très bonne représentation des ruissellements en fonction des propriétés de surface de la zone étudiée, de VS2DT (pour Variably Saturated 2-Dimensional flow and Solute Transport, Lappala et al., 1987) pour les écoulement

en deux dimensions dans la zone non saturée du sol ou de MODFLOW (Harbaugh, 2005) pour une représentation en trois dimensions des écoulements dans la nappe. Ces modèles ne sont que des exemples de modèles qui sont très performant pour leur partie du cycle de l'eau et qui considèrent le reste de ce cycle comme une condition aux limites.

Vers le modèle Multi-Hydro

Au vu de cet état des lieux en matière de modélisation hydrologique en milieu urbain et péri-urbain (et dont une synthèse est disponible dans le tableau 1.1), il est évident que le manque en modèles capable de prendre en compte la haute variabilité de ces zones se situe au niveau de l'open source. En effet, le besoin d'un panel d'outils open source se fait ressentir un peu partout. Si l'on regarde le programme d'une conférence comme EGU (European Geophysical Union²), la création d'une section ces deux dernières années regroupant l'open source et dont les contributions augmentent montre bien que des choses se font et ont besoin d'être diffusées. En parallèle le nombre de contribution en hydrologie s'appuyant sur l'utilisation d'outils propriétaires reste assez important. Cela pose la question de savoir si cela tient plus du fait de l'habitude ou du manque d'outils de qualité.

De plus, il y a une réelle volonté de la part des développeurs des modèles hydrologiques de permettre l'implémentation virtuelle de mesures de résilience à l'échelle locale (et donc à petite échelle) pour ensuite évaluer leur efficacité pour le système de résilience aux inondations tout entier, c'est-à-dire à de grandes échelles et pouvant s'avérer très complexes.

C'est donc dans le but de combler ce manque, associé aux besoins d'une modélisation fine permettant de représenter la variabilité spatio-temporelle des milieux urbains et péri-urbains à différentes échelles que Multi-Hydro a été développé durant cette thèse et continue actuellement à évoluer à L'École des Ponts ParisTech (voir Giangola-Murzyn et al. (2012) ou El-Tabbakh et al. (2009) pour une description de la première version). Compte tenu de la grande disponibilité de modèles existants pour la représentation de chaque partie du cycle de l'eau dans le domaine public, l'idée était d'utiliser ceux-ci en un couplage interactif entre plusieurs composants à base physique qui représenteraient les processus hydrologiques et hydrauliques entrant en jeu dans les milieux péri-urbains. Les choix se sont portés sur les modèles TREX (Velleux et al., 2011) pour les processus de surface, sur SWMM (Rossman, 2010) pour représenter le réseau d'assainissement et sur VS2DT (Lappala et al., 1987) pour calculer les processus d'écoulements dans la zone non saturée du sol. Vu que tous ces composants sont indépendants les uns des autres, Multi-Hydro est une structure modulaire permettant d'adapter les calculs aux besoins de chaque cas d'étude. De plus, comme un tel modèle nécessite une importante base de données dont le format dépend de chaque module, un logiciel SIG a été développé pour faciliter l'utilisation, la transportabilité et le changement d'échelle du modèle.

2. <http://www.egu.eu/>

Modèle & Fonctionnement	Distribution	Inconvénient	Références
SHE (Système Hydrologique Européen) : Prise en compte de tous les processus pour gérer les écoulements, les rivières, les zones saturées par des équations déterministes à base physique. Conceptuel pour l'évapotranspiration, l'interception et la fonte de la neige.	Complète	Beaucoup de données sont nécessaires pour la mise en place d'un nouveau bassin versant. Calibration.	Soni et al. (1997)
MIKE SHE : Modélisation à l'échelle du bassin, basé physiquement et totalement distribué (pluie, interception, évapotranspiration, fonte de la neige, écoulement en surface et en canaux, sol saturé ou non). Basé sur SHE.	Complète ou semi	Problèmes d'échange entre la rivière et l'eau en profondeur. Problèmes avec des chemins complexes du réseau de drainage (couplage obligatoire avec MOUSE), les rivières sont gérées seulement avec des grilles. Licence payante.	Thompson et al. (2004)
MIKE 11 : Représentation des équations de Saint Venant (formulation complètes des ondes dynamiques). Basé physiquement.	1D	Calibration	Thompson et al. (2004)
SWMM et SOBEK : Simulation du réseau d'assainissement. Infiltration, saturation du sol, gestion du sol avec des réservoirs non linéaires. Lien entre surface et réseau de drainage et entre sous-bassins par hydrographes. Grande flexibilité dans les ouvrages de gestion. Applications variables. Pas de temps de l'ordre de la minute.	Semi	Entrée des données de façon manuelle (chronophage). Pas de lien avec SIG open source. Licence payante pour SOBEK.	SWMM : Rossmann (2010), SOBEK : Deltares (2013)
CANOE : Utilise des fonctions pluie-débit en fonction du type moyen d'utilisation du sol du bassin versant. Possibilité de pluie spatialisée ou uniforme.	Semi	Nécessite une calibration, création des bassins versants manuelle.	Alison (2005)
MOUSE : Equivalent à SWMM. Sol géré de manière conceptuelle (= réservoir).	Semi	Pas plus de 100 sous bassin. Entrée des données de façon manuelle (chronophage).	Obropta and Kardos (2008)
MUSIC : Prédiction des débits pour les petits bassins versants. Pas de temps min : 6min. Taille maximale : 0.01km ² . Ruissellement déterminé par volume journalier, sol géré de manière conceptuelle (= réservoir). À base physique pour le drainage.	Semi	Limites sur le pas de temps et la taille du bassin.	Obropta and Kardos (2008)
INFOWORKS CS : Couplage entre un moteur de simulation de débits (hydrologique et hydraulique), un outil SIG et une base de données. Équations du moment et Saint Venant, résolution en différence finies.	1D/2D	Utilisation obligatoire de ArcView (logiciel SIG payant).	Mah et al. (2007)
URBS : Découpage des zones en éléments hydrologiques unitaires (bâti+jardin+portion de chaussée). Trois réservoirs en vertical (surface, saturé, non saturé).	Semi	Coefficient de ruissellement à connaître.	Rodriguez et al. (2005)
BEMUS : Similaire à SWMM. Division des sous-bassins versants avec une portion imperméable et une autre perméable (prise en compte physique de l'infiltration).	Semi	Calibration	Khu et al. (2006)
AOFD : Définition des stockages par analyse du DEM puis écoulement 1D. Calculs rapides.	1D	Les DEM doivent être retrouvés à chaque changement de bassin versant.	Maksimovic et al. (2010), Simoes et al. (2011)

suite

TABLE 1.1 – suite de la page précédente

Modèle & Fonctionnement	Distribution	Inconvénient	Références
Simoes : Basé en partie sur le modèle AOFD et INFOWORKS (2D) pour les zones inondées. Calculs rapides et précision.	1D/2D	Les DEM doivent être retouchés à chaque changement de bassin versant.	Simoes et al. (2011)
Domingo : MIKE SHE pour la partie surface, MOUSE pour le drainage, échange dans les 2 sens : ruissellement ↔ tuyaux/canaux, eau en profondeur ↔ tuyau, réseau ↔ avaloir.	Complète	Basé sur des modèles commerciaux.	Domingo et al. (2010)

TABLE 1.1: Synthèse globale sur le fonctionnement des principaux modèles hydrologiques permettant une représentation des milieux urbains

1.4 Le contexte de développement : le projet SMARTeST

Le projet européen FP7 SMARTeST (pour Smart Resilience Technologies and Tools) a démarré en 2010 et vient de s'achever avec le but de faire un état des lieux des différentes façons d'améliorer la résilience des villes face aux inondations en Europe. Cette tâche est passée par la réduction des déficiences et des obstacles dans l'implémentation de mesures de résilience aux inondations en facilitant la création de systèmes de défense contre celles-ci plus globaux, ainsi que par l'implémentation de la nouvelle politique de gestion des risques de l'Union Européenne « Vivre avec les Inondations ». La figure 1.5 traduit de l'extension géographique des partenaires du projet et des institutions participantes.



FIGURE 1.5 – Les partenaires du projet SMARTeST (<http://www.floodresilience.eu/>).

Le projet à été organisé autour de six axes de travail, le premier étant dédié à l'organisation de tout le projet tant sur le plan scientifique que financier. Le second axe de travail était orienté vers l'expérimentation sur des produits existants. Ce second axe de travail s'est basé sur les produits et techniques existantes pour déterminer quels étaient les standards à prendre en compte et de les harmoniser d'un pays à l'autre. Sachant qu'une implémentation de technologies de résilience peut avoir à la fois des impacts positifs et négatifs, la résilience aux inondations ne peut donc pas être entièrement appréhendée simplement par une revue des produits de résilience. De plus, les stratégies peuvent être coûteuses et ne pas toujours servir les intérêts socio-économiques.

C'est pourquoi le troisième axe s'est intéressé au concept de systèmes résilients en milieu urbain. Cela s'est traduit par l'étude d'associations entre les technologies et le milieu urbain à différentes échelles (depuis le bâtiment isolé jusqu'à la ville toute entière). Des cas d'études ont ainsi été sélectionnés pour couvrir une grande variété de types d'inondation (pluviale, fluviale, estuarienne, côtières ou torrentielle). La description de ces cas d'études a été utilisée pour appréhender l'organisation des systèmes existants, pour apporter des informations supplémentaires et pour créer un contexte pour une activité plus innovante. Le concept de résilience aux inondations a été adapté pour tenir compte de toutes ces dimensions.

Le quatrième axe de travail s'est porté sur l'implémentation des technologies et des systèmes dans la vraie vie. Cela n'est pas une nouveauté absolue dans les zones urbaines où des mesures ont été prises à différentes échelles spatiales depuis longtemps, implémentées puis améliorées au fil des expériences. Cependant, alors que les mesures traditionnelles structurelles et non-structurelles visent à limiter les conséquences des inondations, la contribution de SMARTeST vise à améliorer la situation actuelle en s'attelant aux problèmes de résilience. C'est en particulier le cas avec le développement d'une boîte à outils constituée de modèles, incluant Multi-Hydro, qui tiennent compte des différentes phases de gestion en formant ainsi une amélioration du risque et le développement d'un plan de résilience pour l'environnement bâti (voir figure 1.6 pour un récapitulatif des constituants de la boîte à outils SMARTeST).

L'essentiel de mon travail de thèse s'est focalisé sur ces deux axes de recherche. Les efforts principaux ont été dédiés au développement d'une nouvelle version de Multi-Hydro (Giangola-Murzyn et al., 2012) pour créer un outil puissant permettant l'évaluation des conséquences des améliorations des systèmes de résilience actuels. Les développements associés à cette tâche sont discutés dans le chapitre 2 de ce manuscrit. Ensuite, le chapitre 3 est dédié aux enseignements tirés des applications de Multi-Hydro sur cinq cas d'études très différents les uns des autres et présentant une complexité croissante. Deux d'entre eux ont été mis en place dans le cadre du projet SMARTeST (Salagnac et al., 2012) :

- un petit bassin versant du Val-de-Marne correspondant à la zone drainée par la canalisation départementale de Villecresnes. Ce bassin d'étude, bien que ne comportant aucune mesure permettant de comparer le résultat des simulations avec la réalité, est celui qui a servi à l'évaluation des impacts de chaque modification apportée au modèle au cours de son développement.
- le quartier de Wilton Grove et Egerton Street situé à Heywood, dans la grande banlieue de Manchester au Royaume Uni, est lui aussi un cas d'étude important. Cette zone ayant subi



FIGURE 1.6 – La boîte à outil SMARTeST - aperçu (<http://www.floodresilience.eu/>).

plusieurs inondations durant cette dernière décennie demande une résolution assez fine des rues en question pour permettre l'évaluation de l'impact de la mise en place de mesures de protection contre les inondations. Ainsi, quatre scénarios de protection ont été testés et ont permis de proposer des solutions intéressantes pour les gestionnaires de cette zone.

Ces études ont été effectuées à l'aide d'une approche systémique sur des scénarios à la fois d'inondations mais aussi de mise en place de différentes techniques de protection.

Le cinquième axe du projet SMARTeST s'est intéressé à l'intégration des résultats. Cela conduit au développement d'une série de principes et d'initiatives pratiques visant à supporter la résilience aux inondations dans des politiques et des procédures basées sur l'identification des bonnes pratiques (Garvin and Salagnac, 2013). Un glossaire des termes relatifs au domaine de la gestion des inondations a été mis en place (Lawson, 2011) et certains de ces termes seront utilisés dans ce manuscrit :

- **Flood Resilience (FRe)** Résilience aux inondations en français. Il s'agit de la capacité à surmonter l'inondation et la capacité à s'en remettre.
- **Flood Resilience system (FRe system)** Les systèmes de résilience aux inondations est un jeu d'éléments travaillant en association comme des parties d'un mécanisme. En d'autres termes, il s'agit d'un réseau d'interconnexions qui facilite la résilience. Dans le contexte de SMARTeST, un « système » est un tout-en-un qui couvre les inondations urbaines sous des scénarios de types d'inondation variés (fluvial, pluvial, inondation éclair, côtier, remontée de nappe, ect.) et tenant compte de toutes les briques de la gestion de l'inondation

(dispositifs d'alertes, services d'urgence, questions de sociétés et de gestion, la gestion et la gouvernance du risque d'inondation, etc.) et sous des échelles variées allant du bâtiment au pays en passant par la rue, le quartier, la ville, l'agglomération et la région.

- **Flood Resilient Technology (FRe technology)** Ces technologies sont celles qui fournissent une résilience aux inondations, comme par exemple les techniques ayant la capacité à résister à l'inondation et capable de protéger contre celles-ci.

Au travers de ce projet, les différents pays participants ont évalué les procédures mises en place en cas de risque d'inondation, ont listé les différents outils à la disposition des autorités et des particuliers pour se protéger contre cet aléa et ont tenté d'évaluer comment il pourrait être possible d'améliorer les choses.

Le dernier axe du projet a porté sur la dissémination des résultats de la recherche vers un large panel d'utilisateurs dans le but de fournir un impact significatif sur la protection de l'environnement bâti.

Comme il l'est discuté dans le chapitre 4, ce travail donne également lieu à de nombreux développements dans le cadre d'autres projets tels que Raingain, Ville Numérique, BlueGreen-Dream ou Trafipollu.

Chapitre 2

Description de Multi-Hydro

2.1 Philosophie de développement

Comme il l'a été présenté dans le chapitre précédent, de nombreux modèles existent déjà, qu'ils soient dédiés à l'hydrologie de surface, souterraine ou à l'hydraulique.

Tous ces modèles ont des points forts et des points faibles. Dans cette grande bibliothèque d'outils, certains sont très bien soutenus par des équipes suivant les différents développements et fournissant un support technique de qualité. Ces outils sont donc validés et acceptés comme étant fiables, autant sur le plan de la représentation des phénomènes physiques qu'ils représentent que sur le plan de la stabilité informatique¹. L'idée de ce travail a donc été de ne pas dépenser de temps à refaire ce qui a déjà été fait, mais plutôt d'associer des codes existants, les uns comblant les lacunes des autres.

Une telle tâche demande de respecter un certain cahier des charges, défini par les objectifs de la modélisation et de l'utilisation. Il va de soit qu'un modèle, quel que soient son domaine, sa qualité, ou sa mise œuvre, n'a réellement d'intérêt que s'il est utilisé par un nombre de personnes suffisant. C'est d'ailleurs cette utilisation qui fait que le modèle fini par être correctement évalué, les utilisateurs pouvant faire remonter les éventuels problèmes vers le ou les développeurs. Permettre la mise à disposition du modèle n'est pas le seul paramètre pris en compte dans son exploitation, il faut également faire avec les ressources que demande sa mise en place, tant sur le plan financier que technique, temporel et de base de données. Même s'il n'est guère possible de jouer sur l'ampleur de ce dernier point, la composante financière peut facilement être totalement éliminée par l'utilisation de ressources gratuites. Un grand nombre de modèles, généralement développés au sein d'universités ou d'institutions publiques, proposent ainsi des outils performants et libres de droits. Il est évident qu'en contre partie, les utilisateurs s'engagent à citer les travaux des équipes de développement. Le couplage de tous les éléments constitutifs de Multi-Hydro doit lui aussi répondre à cette requête de gratuité². Le choix s'est tout naturellement porté sur Scilab³ qui offre l'avantage d'être en partie supporté par des équipes de l'Ecole des Ponts

1. Certains y arrivant mieux que d'autre sur ce dernier point...

2. Quel intérêt en effet de choisir des modèles gratuits si c'est pour s'encombrer d'une licence pour les coupler ?

3. plus d'informations et téléchargement sur le site : <http://www.scilab.org>

et de permettre d'obtenir une assistance plus facilement sur des points sensibles de couplages comme la communication entre différents programmes de langages différents.

La composante technique est un peu plus complexe à maîtriser puisqu'elle dépend à la fois des méthodes de développements et des contraintes que l'utilisateur impose à l'outil. Il est évident que modéliser une même surface avec une résolution de l'ordre du mètre ne requiert pas les mêmes ressources informatiques qu'avec une résolution de l'ordre de la dizaine ou de la centaine de mètres. Le contexte de développement visant, comme il l'a été détaillé en introduction, une vaste gamme d'échelles en temps et en espace, ainsi qu'un public assez large et pas uniquement constitué d'experts en programmation, il faut aussi que Multi-Hydro soit facile à utiliser, en ce sens qu'il ne demande pas à l'utilisateur cinquante manipulations en ligne de commandes (absolument rédhibitoire pour un utilisateur lambda) mais offrant cette possibilité à l'expert qui le souhaite (et qui ne voudrait pas passer des heures à cliquer sur des boîtes de dialogues à chaque lancement du modèle sur les 250 scénarios qu'il a choisi de tester...). Cette contrainte est à mon sens l'une des plus complexes à satisfaire, et les compromis les plus difficiles à choisir. Cependant, grâce à la mise en place de Multi-hydro par d'autres utilisateurs que moi au sein du laboratoire et dans le cadre du projet m'a permis de mieux cerner les attentes de chacun. C'est notamment lors d'un atelier où les partenaires de SMARTeST sont venus essayer le modèle que la problématique de l'interface homme-machine ergonomique devait être l'un des points à améliorer. En effet, lors de cet événement, qui a eu lieu à peu près au milieu de cette thèse, une trentaine de personnes de tous horizons scientifiques et informatiques étaient présentes, avec leurs visions et leurs attentes très différentes en fonction de leur domaine de compétences. Il est aussi apparu que tout le monde ne travaille pas sous les mêmes systèmes d'exploitation. Ainsi, pour ne pas limiter l'usage en imposant un changement de plateforme⁴, il a été choisi de produire un outil qui ne souffrirait pas du transfert d'un système d'exploitation à l'autre.

Finalement, c'est un outil open source, gratuit, transportable, multi-plateforme et facile d'utilisation qui a dû être développé. A cela s'ajoute la contrainte qu'il doit également être basé sur des équations physiques entièrement distribuées pour permettre les changements d'échelles qu'impose le contexte d'étude de la résilience des villes face aux inondations. La section à venir décrira le choix des modèles choisis pour répondre à ces impératifs et la façon dont il a été possible de les coupler.

2.2 Les modèles choisis

D'une manière générale, chaque domaine modélisé doit être vu comme un bloc en trois dimensions dont les propriétés varient selon chaque direction et même souvent en fonction du temps. C'est pour cela qu'il est impératif d'avoir des modèles totalement distribués pour ne pas perdre l'information sur la variabilité spatiale et temporelle de tous les processus intervenant dans la répartition de l'eau en milieu urbain/péri-urbain.

4. Chose qu'il n'est pas toujours évident à mettre en place dans les institutions où la gestion des réseaux informatiques impose souvent le système d'exploitation. Il en va de même pour la mise en place de simulations sur serveur tournant généralement sous Unix

Dans ces milieux particuliers, le cycle de l'eau naturel est influencé par la présence de surfaces imperméables importantes et d'un réseau de drainage des eaux de surface parfois très complexe. Ce dernier est susceptible de modifier considérablement la délimitation des bassins versants. En effet, il n'est pas toujours possible pour les services de gestion de ces réseaux de suivre le cheminement naturel de l'eau. La vie propre des quartiers implique la co-existence de réseaux routiers, de propriétés publiques et privées et d'autres réseaux indispensables au fonctionnement général (alimentation en eau potable, électricité, gaz, évacuation des eaux usées de plus en plus indépendant du réseau d'évacuation des eaux de pluies, ...) qui tendent à complexifier grandement la tâche de la définition du bassin versant. Il convient donc, pour une modélisation adéquate de ces milieux, de prendre en compte chaque élément pouvant influencer les volumes mis en circulation en surface et dans les réseaux lors des évènements pluvieux, et à plus forte raison lorsque ces évènements sont intenses.

La modélisation des processus de surface, c'est-à-dire l'interception, le ruissellement, l'infiltration et l'évapotranspiration, nécessite une description précise de la surface de la zone d'étude. Cette description requiert donc des données concernant la topographie et l'utilisation du sol, ainsi que la composition de couches superficielles du sol constituant les surfaces perméables. Il est également nécessaire que l'outil servant à la modélisation de cette surface puisse prendre en compte toutes ces informations et doit être assez malléable pour tenir compte des particularités de chaque zone si l'on veut pouvoir l'utiliser en de nombreux points. Dans le domaine de la modélisation distribuée libre, plusieurs modèles existent. Parmi eux se trouve le modèle TREX qui offre l'avantage d'un code très bien commenté ce qui facilite la compréhension du fonctionnement du modèle et donc son inclusion au sein d'un couplage.

La modélisation de la charge dans le réseau de drainage des eaux de ruissellement, qu'il soit commun à celui des eaux usées ou séparé, doit permettre de tenir compte des canalisations, de leur localisation les unes par rapport aux autres, de leurs propriétés (forme, matériau et pente pour les plus importantes), la façon dont elles sont connectées et bien sûr des ouvrages particuliers que sont les déversoirs d'orages, pompes et autres seuils. Étant donné que la principale entrée du réseau provient des eaux de ruissellement, la plupart des modèles qui permettent la prise ne compte de tous ces éléments considère la surface comme un constituant conceptuel où les eaux de pluies arrivent au réseau après un délai qui doit être calibré en fonction de l'évènement et de la zone d'étude. Le modèle qui a retenu notre attention pour son inclusion dans Multi-Hydro est le modèle SWMM dont seule la partie réseau sera utilisée. Ce modèle offre, en plus de son code performant, une interface graphique permettant d'évaluer la structure du réseau.

Les processus d'infiltration et le devenir de l'eau dans la zone non saturée du sol sont des composantes importantes de l'hydrologie en milieu péri-urbain. En effet, dans ces zones, les surfaces perméables sont assez courantes de part la proportion qu'occupent les jardins, les parcs et les friches. La particularité de la modélisation de la zone non saturée tient dans la complexité des processus puisque l'écoulement de l'eau se fait dans un milieu poreux, en trois dimensions et dont la saturation varie au cours du temps et de l'espace. Un modèle permettant de prendre en

compte ces trois aspects de cette modélisation particulière en plus de la contrainte d'être open source et intégrable dans un couplage n'existe pas. Il a donc fallu faire des concessions et c'est VS2DT qui a été choisi. Ce modèle permet de prendre en compte deux dimensions sur les trois désirées, mais permet une bonne considération sur les processus physique d'un milieu poreux à saturation variable.

Les trois prochaines sections de ce chapitre décrit le fonctionnement de ces trois modèles pour leur utilisation au sein de Multi-Hydro. Étant donné que certains d'entre eux ne sont utilisés que partiellement, seules les parties utiles à Multi-Hydro seront traitées dans cette thèse. Il est évident qu'une description plus complète de ces modèles est accessible via la documentation qui les accompagne.

Ensuite, après une description de la modélisation de la pluie spatialisée, viendra le détail du couplage de ces modèles, donc la description à proprement parler de Multi-Hydro lui-même. Cette partie s'attardera sur les diverses interactions qui ont été nécessaire à la représentation du cycle de l'eau en milieu urbain et péri-urbain.

2.2.1 La modélisation des processus de surface : le modèle TREX

Généralités

La partie concernant les écoulements de surface est gérée par le modèle TREX (pour Two dimensional Runoff EXport, [Velleux et al., 2011](#)) développé par l'université du Colorado. Comme son nom l'indique, TREX est un modèle distribué en deux dimensions qui gère à la fois les transports d'eau, de sédiments et de polluants en tenant compte de la topographie, de l'utilisation du sol et des propriétés de surface de ce sol. Il a été utilisé principalement sur de grands bassins versants aux États-Unis dont la taille va de 2.5 à 1111 km² ([England et al., 2007](#)) pour la simulation d'évènements extrêmes et le transport de polluants. D'une façon générale, TREX fonctionne sur la base de grilles contenant toutes les informations spatialisées nécessaires à la description du domaine de modélisation. Chaque valeur d'une grille donnée représente un pixel qui peut être soit carré soit rectangulaire (bien que je n'ai pas vu d'exemple de maille rectangulaire utilisée..). Ainsi, chaque pixel ne peut avoir qu'une seule et unique valeur pour une propriété donnée (une utilisation du sol, une seule altitude, un seul type de sol). En ce qui concerne le type de sol et l'utilisation de celui-ci, le domaine est divisé en classes homogènes. Dans le cadre de Multi-Hydro, ces classes sont typiques du milieu péri-urbain (route, bâti, parcs et jardins, avaloirs).

Utilisation de TREX dans Multi-Hydro

Développé initialement pour la simulation des flux de surface, de l'érosion des sols et des transport de polluants pour des évènements isolés, seule la partie hydrologique pure (représentée sur la figure 2.1) a été pour le moment utilisée dans le cadre de Multi-Hydro. A l'avenir, une partie des routines concernant le transport de polluants devrait être intégrée dans Multi-Hydro, ce qui rend un modèle comme TREX extrêmement intéressant puisque les routines pour les calculs existent déjà dans le code. L'utilisation faite de TREX dans Multi-Hydro implique un

certain nombre de choix, notamment dans les options utilisables et utilisées pour les calculs. De ce fait, seules celles qui sont utiles pour Multi-Hydro seront décrites ici.

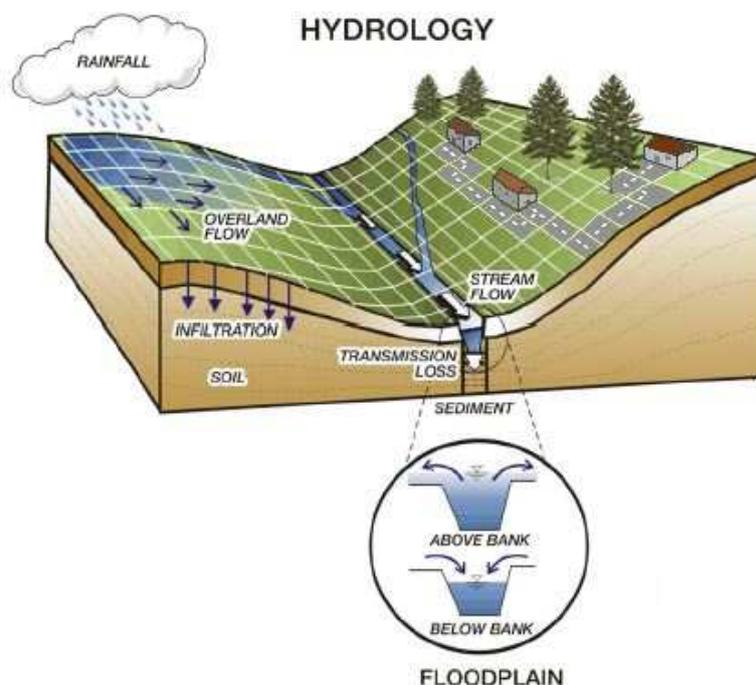


FIGURE 2.1 – Représentation d’un bassin versant dans le modèle TREX (d’après Velleux et al., 2008).

La prise en compte des données de pluie

Concernant l’hydrologie de surface, ce modèle gère différents processus. Ceux-ci seront détaillés d’un point de vue chronologique.

Dans ce modèle, la pluie est prise en compte de différentes façons, soit comme des données pluviométriques, soit comme des données provenant de radar. Dans le premier cas, il s’agit d’indiquer pour chaque pluviomètre leur localisation et les couples intensité-temps caractérisant la pluie. S’il y a plusieurs pluviomètres, l’intensité de la pluie sera interpolée en fonction de la distance entre les pluviomètres et en fonction de la répartition de la pluie sur ceux-ci. Dans le cas des données radar, il s’agit de grilles correspondant au domaine de modélisation, avec la même résolution que les calculs. Dans le cadre de Multi-Hydro, les pluies sont donc distinguées sous deux types :

- les pluies homogènes : ces pluies seront généralement constantes en espace et en temps. Elles sont entrées comme des données pluviométriques, en ne considérant qu’un seul plu-

viomètre. Du fait de l'entrée à la main des couples intensité-temps qui caractérisent ce type de données, il semble assez évident que la variabilité temporelle de la pluie dans ce cas restera plutôt simpliste.

- Les pluies variables : elles sont variables en temps et en espaces. Ce sont généralement les données radar qui sont dégradées par cascades multifractales pour coller à la résolution du domaine de modélisation. Les données sont entrées sous forme de grilles dont la validité en temps est paramétrable.

Interception et stockage en surface

Toute la pluie tombant sur le bassin ne participe pas directement au ruissellement. Ainsi, dans TREX, une partie de l'eau est perdue pour le ruissellement par le biais de l'interception. Il s'agit d'une hauteur d'eau minimum que chaque pixel doit recevoir avant de voir la formation d'un ruissellement. Cette hauteur n'est évaluée qu'en début de simulation, TREX ayant été développé pour la simulation événementielle. Cependant, dans le cadre de Multi-Hydro, TREX sera lancé pour des durées inférieures à la durée nécessaire pour remplir cette interception. Si le modèle tourne pour chaque boucle avec sa configuration initiale, toute l'eau sera donc mobilisée par l'interception et aucun ruissellement ni infiltration ne se produira.

La modélisation de l'interception pose un certain nombre de problèmes et les modèles sont complexes à mettre en place avec des paramètres difficiles à obtenir (Muzylo et al., 2009). Dans le cadre de la modélisation à l'échelle de l'évènement, l'interception n'a que peu d'influence mis à part d'induire le retard dans le ruissellement qui a été développé plus haut. Seule la partie de remise éventuelle en ruissellement, se produisant plus tard dans l'évènement n'est actuellement pas prise en compte et pourrait avoir un impact sur les bilans en fin d'évènements lorsque celui-ci est assez long ou lors de la simulation d'évènements successifs.

Il est également possible, dans le modèle TREX, de déterminer des hauteurs pour un éventuel stockage en surface. Il s'agit alors du même type de représentation que les hauteurs d'interception, avec le même impact d'un point de vue de la modélisation. Cependant, il est possible d'initier ces hauteurs comme étant plus ou moins satisfaites dès le démarrage de la simulation. Ces paramètres permettront, dans le contexte de l'utilisation du modèle au sein de Multi-Hydro, la mise en place de techniques alternatives de gestion des eaux de ruissellement (toiture végétalisée par exemple).

Infiltration

De même, dans TREX, l'infiltration est considérée comme un volume d'eau perdue pour le ruissellement. Ce volume est calculé via une simplification de la relation de Green et Hampt qui néglige la profondeur des flaques d'eau en surface, ce qui donne l'équation 2.1 ci-dessous :

$$f = K_h \left(1 + \frac{H_c(1 - S_e)\theta_e}{F} \right) \quad (2.1)$$

Où :

$$\begin{aligned} f &= \text{taux d'infiltration [L/T]} \\ K_h &= \text{conductivité hydraulique effective [L/T]} \\ H_c &= \text{pression capillaire [L]} \\ \theta_e &= \text{porosité effective [sans dimension]} \\ S_e &= \text{saturation effective du sol [sans dimension]} \\ F &= \text{hauteur cumulée d'eau infiltrée [L]} \end{aligned}$$

Avec cette définition de l'infiltration, le sol n'est qu'une couche sans fin où l'eau ne rencontre pas de limite, et surtout, il n'est pas pris compte des modifications des conditions d'infiltration au cours de l'évènement, telle que la mise en saturation du sol.

Ruissellement

Enfin, l'eau qui n'est pas perdue soit par l'interception soit par l'infiltration est ruisselée en fonction de la topographie et des propriétés de surface (utilisation du sol et coefficient de Manning). L'écoulement de l'eau est calculé par les équations de Saint Venant simplifiée en approximation des ondes diffusives en deux dimensions.

Dans la pratique, cela se traduit par la comparaison entre la pente du sol et la pente de la surface de la couche d'eau au-dessus de ce sol selon une direction donnée. Cette direction est définie en fonction de l'itération. Dans la pratique, pour un pixel donné, on va regarder selon les directions Nord-Sud ou Est-Ouest et comparer la différence entre les pentes du sol et de la surface de la couche d'eau. A chaque itération, la direction est une fois Est-Ouest et la fois suivante Nord-Sud. Dans ce modèle, les écoulements dans les diagonales ne sont pas pris en compte. Cela pose parfois des problèmes dans la visualisation des résultats. En effet, en fonction de l'itération à laquelle le modèle se trouve au moment de l'écriture d'un fichier de résultat, il peut apparaître des artefacts : les grilles représentant la hauteur d'eau en surface présentent des hauteurs d'eau en damier comme le montre l'exemple présenté dans la figure 2.2. Ce type de résultat est particulièrement visible dans le cas de topographie très plane où les flux d'eau sont faibles et ne permettent pas l'homogénéisation des hauteurs d'eau d'un pas de temps à l'autre.

Cas des rivières

Le modèle TREX est conçu pour prendre en compte les rivières dans les processus d'écoulements de l'eau en surface. Cependant, comme il a initialement été développé pour la modélisation de grands bassins versants avec des résolutions assez faibles (le cas d'étude générique fourni avec le code dans le but de permettre à l'utilisateur de prendre le modèle en main est d'avoir à disposition des exemples de fichiers corrects traite un bassin de près de 21 km² avec une résolution de 90 m), les rivières se trouvent généralement avec une largeur inférieure à la maille du modèle. Dans ce cas, la modélisation des écoulements dans ces rivières peut être considéré comme uni-dimensionnelle et les rivières sont représentées par un chevelu d'éléments linéaires.

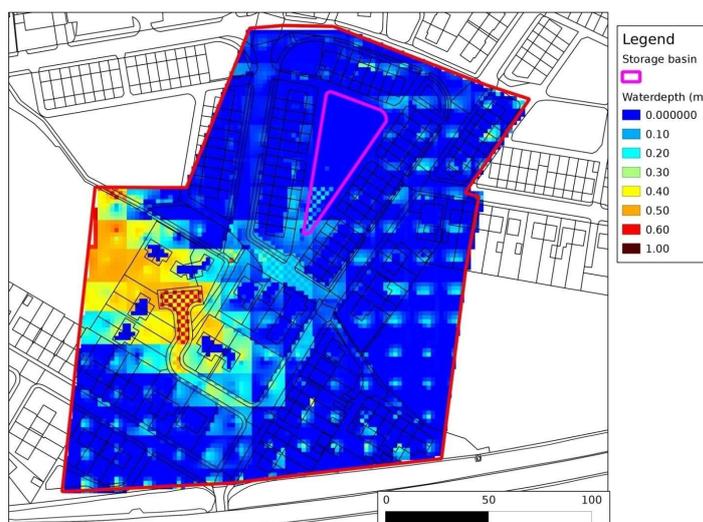


FIGURE 2.2 – Exemple d’artéfact en damiers pouvant avoir lieu avec le modèle TREX. Notez la façon dont se répartit l’eau au niveau de la zone centrale (pixels rouges avec les plus fortes hauteurs d’eau).

Cependant, dans l’usage fait de TREX par Multi-Hydro, les résolutions généralement utilisées sont (et seront) plutôt de l’ordre de la dizaine de mètres au maximum. Dans ce cas, les rivières, ou plutôt les fleuves, présentent assez fréquemment des largeurs supérieures à la taille de la maille TREX. Dans ce cas, les écoulements de la rivière doivent être pris en compte bi-dimensionnellement. C’est ce qu’à montré [Boyington \(2010\)](#) dans sa thèse. Dans ce cas de figure, les rivières ne sont plus définies comme des rivières par le modèle, mais comme des dépressions dans le sol pré-remplies d’eau, avec une source d’alimentation en amont et un exutoire (le même que celui du bassin versant bien sûr) en aval. Communément, tout le ruissellement du bassin versant se trouvera drainé par cette dépression.

2.2.2 La modélisation des écoulements dans la zone non saturée : le modèle VS2DT

Le sol est constitué d’éléments de tailles et de compositions variables. L’eau qui est présente en surface au cours d’un évènement pluvieux va progressivement trouver un chemin au travers de ces éléments et, par gravité, rejoindre la nappe phréatique. Les conditions d’écoulements de l’eau dans le milieu poreux qu’est le sol sont assez bien connues et peuvent être mathématiquement caractérisées par de nombreuses équations dont la plus connue et répandue et celle de Darcy (équation 2.2). Ces comportements d’écoulements de l’eau dans le milieu poreux sont, comme le montrent ces équations, fortement dépendantes de quelques paramètres dont la porosité (elle même directement liée à la granulométrie du sol) et la saturation en eau du sol. Or, si l’on prend le cas extrême d’un sol sec en début d’évènement, les conditions de saturation vont changer au cours du temps. Donc, les conditions d’écoulements de l’eau dans le sol vont elles aussi changer

au cours du temps. De plus, la progression de l'eau dans le sol va elle aussi créer un gradient de saturation au sein de la colonne verticale. Ainsi, les conditions d'écoulements ne vont pas seulement varier temporellement mais aussi spatialement (et ce même avec le cas parfait d'un sol totalement homogène, ce qui est loin de la réalité). En effet, selon la quantité d'eau provenant de la surface, le sol va être plus ou moins saturé dans chaque colonne d'eau. La dispersion se fera ensuite selon les caractéristiques des sols (conductivité, saturation initiale en eau) et la progression spatiale ne sera donc pas homogène au cours du temps. Cette complexité dans les variations des paramètres gouvernant les flux d'eau dans le sol implique la nécessité d'une prise en compte d'au moins deux directions, dont la direction verticale, lors de la modélisation.

$$\vec{u}_n = -\frac{\bar{K} K_r(h) \rho g}{\mu} \frac{\delta H}{\delta n} \quad (2.2)$$

Où :

- \bar{K} = perméabilité intrinsèque du milieu [L²]
- $K_r(h)$ = conductivité hydraulique relative en fonction de la pression [sans dimension]
- h = charge de pression [L]
- g = accélération de la gravité [L/T²]
- μ = viscosité dynamique du liquide [M/LT]
- H = hauteur de la colonne de liquide correspondante à la pression L

Comme le but de Multi-Hydro est de mettre en relation des outils libres d'accès, le modèle VS2DT (pour Variably Saturated 2-Dimensional flow and Solute Transport) semble être le candidat qui répond le mieux aux requêtes du développement. C'est un modèle bi-dimensionnel qui gère les écoulements en milieu poreux dont la saturation est variable (Lappala et al., 1987). Ce modèle est habituellement utilisé pour la simulation des écoulements d'eau et du transport des polluants, ce qui permet d'avoir déjà une base solide pour la mise en place de module de qualité des eaux.

Il semble assez naturel de penser que pour représenter au mieux les processus de la zone non saturée sur l'ensemble du domaine modélisé qu'un modèle tri-dimensionnel aurait été plus intéressant, mais dans le domaine du libre et open source, un tel outil n'était pas disponible au moment de la mise en place de Multi-Hydro. Il existe toutefois de nombreux programmes tels que MODFLOW ou FEEFLOW qui proposent des licences gratuites pour la recherche, mais dans le cadre du projet SMARTeST, Multi-Hydro est destiné à un plus large public tel que les gestionnaires des villes. De ce fait, les licences gratuites pour la recherche ne sont plus applicables et il serait dommageable pour la diffusion de l'outil de devoir payer une ou plusieurs licences.

Une façon de gérer l'écoulement avec VS2DT se fait par « tranche ». C'est à dire que selon ces tranches 2D (dont les dimensions sont respectivement la profondeur et l'épaisseur de la bande) l'écoulement souterrain se fait soit verticalement soit horizontalement dans la lame elle même. La limite de ce système est l'absence de communication entre les bandes de sols. C'est cette caractéristique qui ne nous permet pas d'avoir un écoulement 3D dans les couches du sous sol. Ceci n'est en rien une contrainte dans le cadre de notre modélisation car l'écoulement

est principalement gravitaire et les résultats pour un même bassin versant avec des bandes de sols orientés Nord-Sud ou Est-Ouest sont identiques. La seule mesure à prendre en compte pour avoir un écoulement le plus réaliste et d'orienter les tranches de sols en fonction de la pente à la surface.

Les écoulements dans la zone non saturée du sol sont représentés comme une combinaison entre les lois de conservation de masse et les lois de Darcy définissant les écoulements dans les milieu poreux. L'équation résultant de cette association est fortement non linéaire et est donnée par l'équation 2.3.

$$v \frac{\delta s \Phi}{\delta t} - \sum_{k=1}^{\hat{m}} \rho K K_r(h) A_k \frac{\delta H}{\delta n_k} - \rho q v = 0 \quad (2.3)$$

Où :

- v = volume de sol assez petit pour que ρ , s et $\Phi \simeq$ constants [L^3]
- s = saturation du sol en eau [sans dimension]
- Φ = porosité du sol [sans dimension]
- t, k = respectivement le temps [T] et la face de l'élément de volume [L]
- K = conductivité hydraulique à saturation [L/T]
- A_k = aire de la $k^{\text{ième}}$ face à laquelle n_k est orthogonal [L^2]
- n_k = direction du flux [sans dimension]

La résolution de cette équation par la méthode des différences finies permet ainsi de calculer la saturation en eau en fonction de la profondeur et des entrées en eaux dans sol en tenant compte des variations dans les propriétés du sol (porosité et conductivité hydraulique).

2.2.3 La modélisation des réseaux d'assainissements : le modèle SWMM

Le réseau d'assainissement ou de drainage des eaux de pluies est un élément indispensable de la gestion des eaux de ruissellement en ville et en zone péri-urbaine. Il est donc impératif de représenter correctement cette partie du cycle de l'eau dans les zones plus ou moins urbanisées si l'on veut représenter correctement les transferts d'eau dans ces zones. Un certain nombre (par exemple, CANOE, Alison, 2005 ou la suite SOBEK van Heeringen et al., 2002 de modèles existent et sont reconnus comme étant efficaces dans cette représentation. C'est habituellement les hauteurs d'eau et les débits en certains points du système qui permettent de caractériser le comportement hydraulique d'un réseau de drainage des eaux de pluies.

C'est vers le modèle SWMM, pour Storm Water Management Model (Rossman, 2010) que le choix s'est porté pour Multi-Hydro. C'est un modèle semi-distribué qui a principalement pour but le calcul de la charge et des processus de transfert dans les réseaux d'assainissement ou de drainage. La partie superficielle des bassins étudiés avec ce modèle seul sont définis comme des éléments homogènes où les processus de surface sont déterminés par des coefficients (de ruissellement, d'infiltration, d'imperméabilisation, ...). La partie réseau, quant à elle, est calculée selon des équations physiques dont les entrées sont déterminées par l'infiltration via la partie conceptuelle du modèle.

Dans Multi-Hydro, seule la partie hydraulique est utilisée. La représentation faite des réseaux de canalisations par le modèle SWMM consiste en un nuage de points géoréférencés (que l'on nommera par la suite nœuds) auxquels sont connectés deux ou plusieurs conduits. Ces conduits sont considérés quant à eux comme des éléments droits et homogènes sur toute leur longueur (qui est déterminée par la distance séparant les nœuds aux extrémités de la conduite).

La charge dans les réseaux est dépendante de nombreux paramètres tels que la pente des conduites, leur forme, leur matériaux et leur obstruction plus ou moins importante. Cette charge est déterminée grâce à l'utilisation des équations de Saint-Venant en une dimension qui permettent d'évaluer les débits et les hauteurs d'eau pour toutes les canalisations modélisées. La résolution de ces équations passe par leur formulation sous forme de différences finies qui permettent d'avoir, pour chaque pas de temps, le débit de l'eau dans toutes les conduites (équation 2.4) et la hauteur d'eau en chacun des nœuds du réseau (équation 2.5). Ces équations, adaptées de [Rossman and Supply \(2006\)](#), différencient les composantes adimensionnalisées du débit (composantes de friction et de pertes, notées en tant que $\Delta Q'$) des composantes comportant une dimension physique (composantes de gravité et d'inertie, notées en tant que ΔQ).

$$Q_{t+\Delta t} = \frac{Q_t + \Delta Q_{gravité} + \Delta Q_{inertie}}{1 + \Delta Q'_{friction} + \Delta Q'_{pertes}} \quad (2.4)$$

$$H_{t+\Delta t} = H_t + \frac{0.5[(\sum Q)_t + (\sum Q)_{t+\Delta t}]\Delta t}{(A_{stockage} + \sum A_s)_{t+\Delta t}} \quad (2.5)$$

Avec :

- Q_t et $Q_{t+\Delta t}$ = débit au temps t et $t + \Delta t$ [L^3/T]
- $\Delta Q_{gravité}$ = Composante gravitaire du débit [L^3/T]
- $\Delta Q_{inertie}$ = Composante du débit liée à l'inertie [L^3/T]
- $\Delta Q'_{friction}$ = Composante adimensionnalisée du débit liée aux forces de frottements [sans dimension]
- $\Delta Q'_{pertes}$ = Composante adimensionnalisée du débit liée aux pertes [sans dimension]
- H = hauteur d'eau [L]
- $A_{stockage}$ = surface du nœud [L^2]
- A_s = surface de l'interface eau-air dans les conduites connectées au nœud [L^2]

L'utilisation de telles équations, qui sont issues de la résolution des équations complètes de Saint Venant, permet d'obtenir des résultats plus précis avec, entre autre, la prise en compte des inversions éventuelles d'écoulement dans les conduites ou les influences avals. Cela permet aussi la modélisation de la mise en charge éventuelle du système.

Surcharge du système d'assainissement

Dans le contexte de la simulation d'évènements extrêmes, le système est susceptible de se retrouver en surcharge. Dans le modèle, cela se traduit par le débordement de certains nœuds. Numériquement, cela se traduit par le fait que la hauteur d'eau dans le nœud dépasse le haut

d'une ou plusieurs conduites qui y aboutissent. Dans ce cas, l'aire contributive provenant des conduites obstruées par l'eau devient nulle et l'équation du momentum devient inutilisable. Une nouvelle condition est donc ajoutée lors du débordement d'un nœud : la somme des flux sortant par débordement est définie comme équivalente à la somme des flux entrants. Cependant, du fait de la méthode de résolution employée dans SWMM, cette condition n'est pas suffisante pour assurer la continuité hydraulique. Ainsi, les équations 2.4 et 2.5 deviennent :

$$\frac{\delta Q}{\delta H} = \frac{-g\bar{A}\frac{\Delta t}{L}}{1 + \Delta Q'_{frictions} + \Delta Q'_{pertes}} \quad (2.6)$$

Le volume d'eau débordant du nœud est alors soit perdu, soit stocké au dessus de celui-ci en attendant de pouvoir être réinjecté dès que la charge le permettra, voir illustration dans la figure 2.3. Pour que l'eau soit stockée, il faut avoir défini un réservoir au-dessus du nœud.

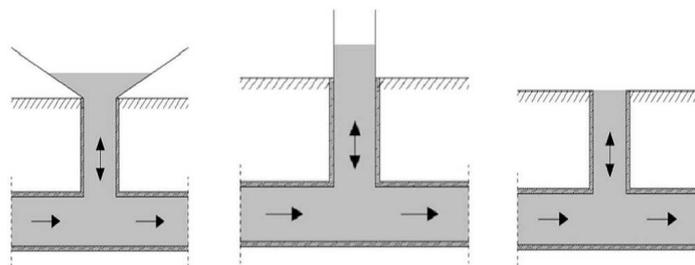


FIGURE 2.3 – Approche simplifiée pour modéliser la surcharge au dessus d'un nœud (Ochoa Rodriguez, 2013).

Prise en compte des ouvrages

Les ouvrages que l'on peut trouver sur le réseau ont une forte influence sur les écoulements. Les plus courants de ces ouvrages sont les pompes, les déversoirs d'orage ou les seuils. L'effet hydraulique de ces éléments peut être modélisé par SWMM.

Les pompes sont représentées à l'aide des courbes de fonctionnement qui permettent de forcer le débit d'un nœud à un autre.

Les déversoirs d'orage sont, quant à eux, représentés de façons différentes selon s'ils sont submergés ou non. En temps sec, les écoulements sont définis en fonction d'un coefficient de débit, de la longueur de l'ouverture et de la hauteur d'eau dans le déversoir (qui dépend elle-même de la forme de celui-ci). Lorsque l'ouvrage est submergé, il est ensuite considéré comme un orifice dont l'équation classique est fonction du coefficient de débit, de l'aire de l'ouverture totale et de la portion de l'ouverture submergée.

2.2.4 La modélisation de la pluie : désagrégation stochastique et modélisation sous-maille

Les données empiriques ne sont généralement pas disponibles aux échelles requises en entrée des modèles entièrement distribués. Dans le cas des modèles déterministes, de nombreux phénomènes sont fortement paramétrés par des modélisations sous-maille plutôt inadéquates. Dans le but de prendre en compte la hiérarchie des structures et leurs interactions non linéaires au travers une large gamme d'échelles spatio-temporelles, l'approche multifractale stochastique a été développée (Schertzer and Lovejoy, 1987 ; Schertzer and Lovejoy, 1991). Les processus de cascades agissant sur l'humidité, les nuages et les champs de pluie conduisent à des gradients d'eau de plus en plus grands sur des fractions d'espace physique de plus en plus petites. Les incertitudes à petite échelle du champ de pluie est la principale source d'incertitudes pour les inondations locales. C'est particulièrement le cas pour les inondations éclairs dans les bassins versants de taille réduite ou dans les zones urbaines. La connaissance du champ de précipitation aux petites échelles est donc cruciale pour fournir une information valable et détaillée aux systèmes d'alertes précoces.

La base physique de la multifractalité dans la pluie correspond aux processus de cascades turbulentes dynamiques qui conservent les flux variés primaires dans des fractions d'espace et/ou de temps, devenant ainsi de plus en plus intermittents. Des développements particulièrement importants incluent une anisotropie scalante en espace et en temps (Gires et al., 2011). En effet, les équations de Navier-Stokes, équations basiques de l'atmosphère, restent invariantes sous la contraction $\bar{x} \rightarrow \bar{x}/\lambda$ pour n'importe quelle résolution $\lambda = L/l$, où L est à l'extérieur (en espace et en temps) de l'échantillon, l est l'échelle d'observation. De même, $t \rightarrow t/\lambda^{1-H_t}$ reste également avec $H_t = 1/3$, ce qui caractérise la non-conservation du champ de vitesse (Kolmogorov, 1941).

Durant les dernières années, de nombreux auteurs ont testé des types de cascades très variés sur la pluie. Avant de donner plus de détails concernant le choix d'un tel processus, il faut d'abord rappeler qu'un champ multifractal peut être compris à l'aide d'une hiérarchie infinie de jeux fractals. En effet, la probabilité qu'un flux multifractal ε_λ excède un seuil donné λ^γ peut être obtenu par :

$$Pr(\varepsilon_\lambda \geq \lambda^\gamma) = \lambda^{-c(\gamma)} \quad (2.7)$$

Où $c(\gamma) \neq \text{constante}$ est la fonction (statistique) codimension de la singularité d'ordre γ . Cela signifie simplement qu'en prenant le logarithme de λ , le tracé de la probabilité en fonction du seuil est indépendant de la résolution alors que ces deux grandeurs le sont. Cette dernière propriété a été beaucoup utilisée en hydrologie (Bendjoudi et al., 1997 ; Bendjoudi and Hubert, 1998).

En général, les modèles de cascades multifractales fonctionnent par le biais d'un générateur invariant en échelle agissant de l'échelle la plus grande vers la plus petite du système. Ces modèles ont l'avantage de ne nécessiter qu'un nombre limité de paramètres théoriques ou que l'on détermine empiriquement. Les processus géophysiques correspondent généralement à des champs non-conservatifs comme par exemple les champs turbulents de vitesse. Le premier pa-

paramètre multifractal, H , mesure le degré de non-conservation du champ moyen ($H = 0$ pour un flux conservatif, tel que les flux d'énergie). Le paramètre α mesure la multifractalité du processus ($\alpha = 0$ pour un champ mono/unifractal et $\alpha = 2$ pour le cas lognormal), ce qui traduit de la variation des codimensions autour du champ moyen, tandis que l'hétérogénéité de ce champ est donné par la codimension fractale C_1 ($C_1 = 0$ pour une champ homogène).

Un exemple de dégradation multifractale de données de pluies radar (image radar donnée par Selex) pour des valeurs de paramètres multifractals fixes (Gires et al., 2013) est présenté dans la figure 2.4.

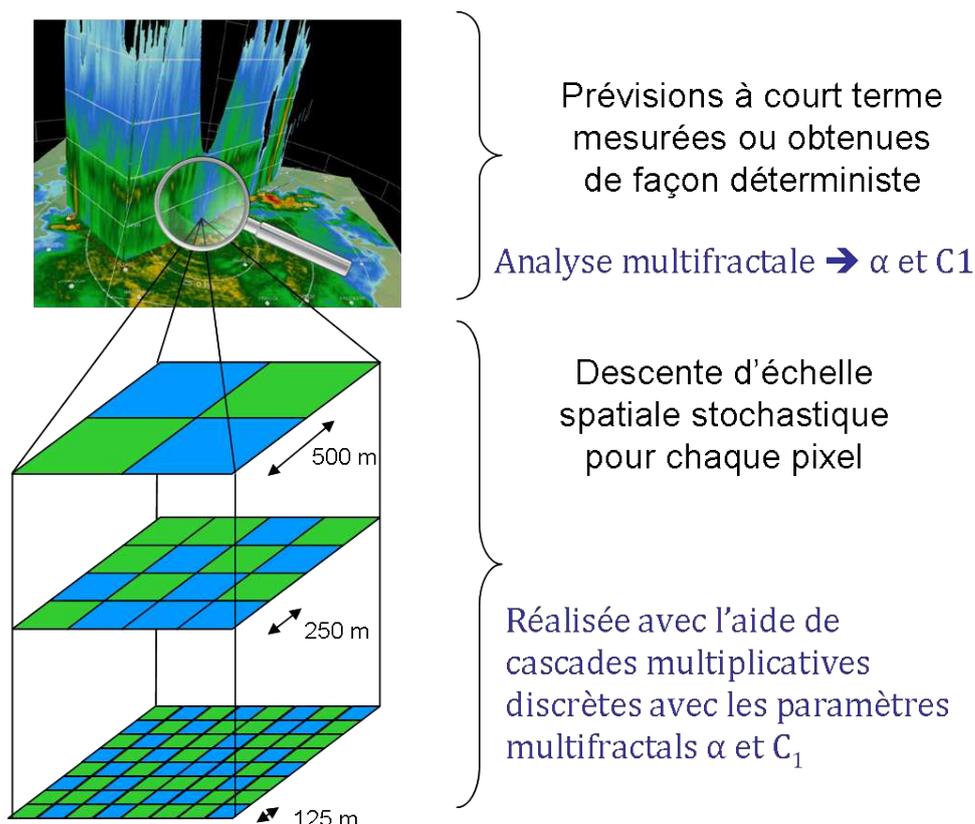


FIGURE 2.4 – Dégradation multifractale de données de pluie (image radar fournie par Selex).

Ensuite, la singularité maximale γ , pour un champ tri-dimensionnel (l'une d'entre elles étant le temps), remplit la condition suivante (Schertzer and Lovejoy, 1993) :

$$c(\gamma_s) = d = 3 - H_t \quad (2.8)$$

Où $H_t = 1/3$ et traduisant de l'anisotropie entre l'espace et le temps. Dans ce cas,

$$\gamma_s = C_1 \frac{\alpha}{\alpha - 1} \left(\left(\frac{3 - H_t}{C_1} \right)^{\frac{\alpha-1}{\alpha}} - \frac{1}{\alpha} \right) \quad (2.9)$$

Ainsi, pour une paire définie de paramètres α et C_1 , cette singularité maximale peut être calculée et permet de définir la variation maximale de la pluie (ou de n'importe quelle autre grandeur géophysique) maximale entre les grandes (g) et les petites (p) échelles :

$$R_P = R_g \times \lambda^{\gamma_s} \quad (2.10)$$

2.3 Couplages des modules - au cœur de Multi-Hydro

Tous les modèles mis en jeu dans Multi-Hydro ne parlent pas le même langage. En effet, chaque élément de la chaîne de modélisation a besoin d'un certain nombre de données d'entrée formatées d'une certaine manière qui lui est propre. Pour permettre l'interaction entre ces différents éléments sans les modifier, il faut passer par leur version console et leurs différents fichiers d'entrée et de sortie.

Le couplage entre les modèles présentés précédemment a été démarré dans une version où les modèles étaient exécutés l'un après l'autre. Dans cette version, aucune rétro-action n'était alors prise en compte. Ainsi, la chaîne de modélisation était capable de ne simuler que les événements courants qui ne risquaient pas de mettre le système en surcharge, ni de dépasser les conditions d'infiltration fixées par la partie surface (c'est-à-dire le modèle TREX). Si la version mise en place par [El-Tabbakh et al. \(2009\)](#) demandait énormément de manipulations de la part de l'utilisateur, l'automatisation a considérablement amélioré la rapidité d'exécution.

L'interfaçage des modèles demandant un grand nombre de manipulation de fichiers et de conversion de données, il a été choisi d'utiliser un logiciel permettant la gestion et le calcul d'un grand nombre de variables. Le choix s'est porté vers Scilab qui présente l'avantage d'être libre et bénéficiant d'un support efficace. Une vue d'ensemble du fonctionnement de Multi-Hydro est donné dans l'annexe [E](#).

Toutes les versions suivantes de Multi-Hydro, développées durant ces trois années de thèse prennent en compte au minimum les rétro-actions entre la surface et le système de drainage des eaux de ruissellement ainsi que celle entre la surface et le sous-sol. Ces interactions entre modèles sont détaillées dans les sections suivantes.

2.3.1 Couplage général

D'une manière générale, la chaîne de modélisation suit la chronologie du cycle de l'eau (figure 2.5). Ainsi, l'eau des précipitations est d'abord gérée par le module de surface (appelé MHSM pour Muti-Hydro Surface Module), c'est-à-dire la partie quantitative de TREX. Dans cette partie, l'eau va donc être répartie entre les processus d'interception, l'infiltration et le ruissellement. L'infiltration n'étant dans ce module que mal représentée, celle-ci ne sera qu'une infiltration potentielle jusqu'à ce qu'elle soit ré-évaluée par le module de sol (appelé MHGM, pour Multi-Hydro Ground Module), c'est-à-dire par la partie quantitative de VS2DT. Dans le cas où trop d'eau aurait été infiltrée par le module de sol, le surplus est remis en surface pour le ruissellement.

Une partie de l'infiltration se fait également dans les avaloirs vers le système d'assainissement ou de drainage. C'est alors le module de drainage (appelé MHDM pour Multi-Hydro Drainage

Module), basé sur la partie hydraulique de SWMM qui va prendre le relais pour donner la charge en eau du système. En cas de surcharge et de débordement de ce système, l'eau sortant des avaloirs est remise à disposition dans le module de surface pour les processus de ruissellement. Cette partie du couplage pose un certain nombre de problèmes détaillés dans la section suivante.

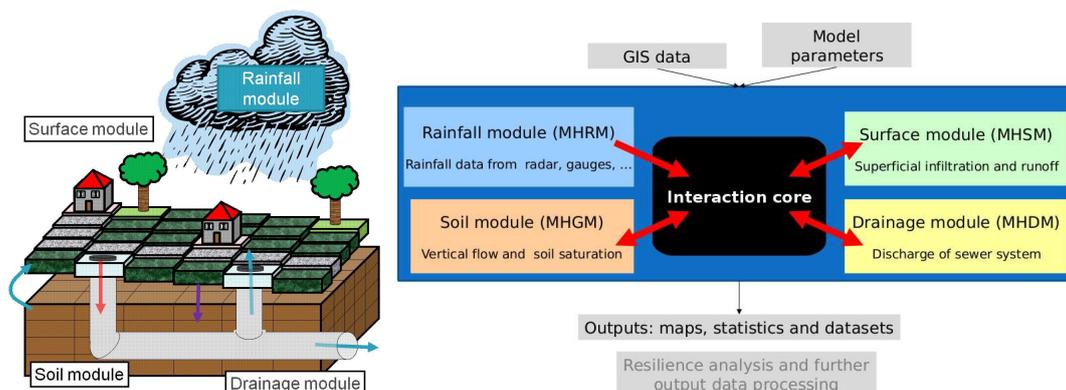


FIGURE 2.5 – Couplage entre les différents modules de Multi-Hydro.

En résumé, une façon de voir les choses est de considérer chaque boucle d'interaction comme une simulation en cascade dont les conditions initiales reprennent les résultats de la boucle précédente. Ainsi, les différents effets éventuels liés au débordement des avaloirs ou aux modifications des conditions d'infiltration peuvent être pris en compte pour la boucle suivante. Si le pas de temps utilisé pour la boucle est assez petit, alors la simulation peut être considérée comme continue. Cependant, les modèles utilisés fonctionnent habituellement pour des modélisations sur des durées de l'ordre de l'heure ou de la journée. Dans le cadre de Multi-Hydro, ces durées se retrouvent réduites à l'ordre de la minute pour une boucle qui morcelle la simulation globale. Il a donc été indispensable de s'assurer que les modèles donnaient bien les mêmes résultats pour une simulation de 60 fois 3 minutes que pour 1 fois 3 heures.

Dans les paragraphes suivants, certains détails du couplage seront détaillés et illustrés par le cas d'étude de Villecresnes (voir section 3.1). Il s'agit d'un bassin versant dont les données étaient prêtes au début du développement de Multi-Hydro. De part sa simplicité, ce cas d'étude a permis de tester les différentes modifications.

2.3.2 La prise en compte de la pluie

Dans Multi-Hydro, la pluie est réceptionnée via le module de surface et le format des données d'entrée est donc conditionné par les possibilités du modèle TREX. Si le modèle en lui-même propose une large gamme de possibilités, son inclusion dans Multi-Hydro a imposé de limiter les choix jusqu'à ce que l'utilisation ne justifie l'implémentation d'autres options. En effet, les scripts initiaux du modèle TREX ne permettent la prise en compte de la pluie que pour la durée totale de la simulation. Le découpage de cette durée en sous-simulations brèves implique

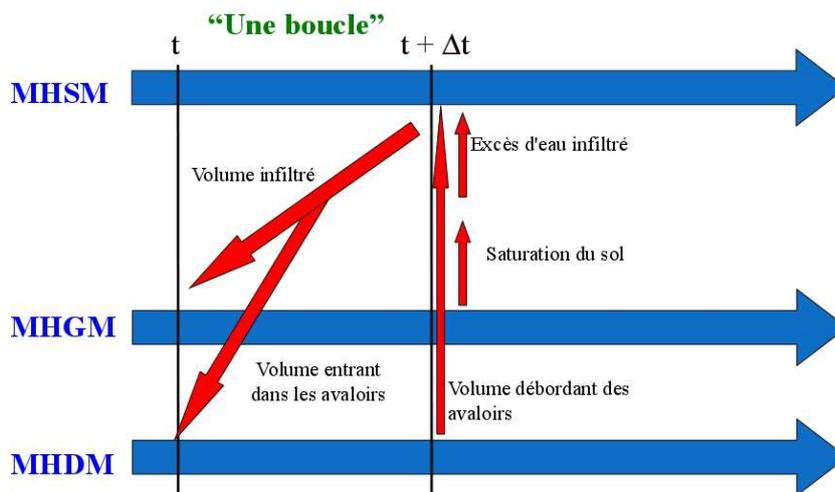


FIGURE 2.6 – Conception des boucles de Multi-Hydro.

donc le découpage des données de pluies en fonction de la sous-simulation en cours, ce qui implique également le développement de scripts Scilab permettant ce découpage pour chacune des possibilités de format de pluie.

Deux types de données de pluies sont exploitables par Multi-Hydro. Les premières correspondent aux sorties typiques des pluviomètres. Il s’agit de couples de valeurs dont la première est le temps et la deuxième est l’intensité de la pluie. Entre chaque couple, le programme fait une interpolation linéaire au cours de temps. Si dans le modèle TREX plusieurs pluviomètres peuvent être implantés sur la zone d’étude (avec interpolation de la pluie entre les différentes localisations), dans Multi-Hydro ce type de donnée est plutôt utilisé pour simuler des pluies constantes spatialement (donc avec un seul pluviomètre) et temporellement (figure 2.7).

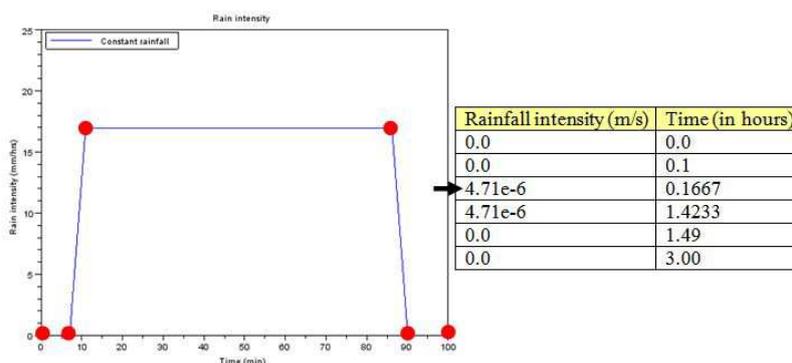


FIGURE 2.7 – Exemple de donnée de pluie type pluviomètre.

Le second type de pluie qui peut être pris en compte dans Multi-Hydro correspond à des séries temporelles présentées sous forme de grilles. En d’autres termes, la pluie est spatialisée (c’est-à-

dire rasterisée) de la même manière que les données SIG d'utilisation du sol par exemple (voir section 2.4). Chacune des grilles contient l'intensité de la pluie pour chacun des pixels du domaine et est valable pour une durée déterminée à l'avance. À chaque changement de grille, l'information de pluie peut changer, ce qui permet de tenir compte de la variabilité spatio-temporelle de la pluie. Cette méthode de lecture des données de pluie est celle qui est recommandée dès que la pluie est très variable que ce soit spatialement et/ou temporellement. En effet, même si l'on considère une pluie spatialement constante, si l'intensité de l'évènement est d'humeur variable au cours du temps, il peut être particulièrement fastidieux de créer le tableau des couples durée-intensité. La figure ?? montre un exemple de pluie spatialement distribuée qui a été utilisé sur le cas d'étude de Villecresnes (cf section 3.1).

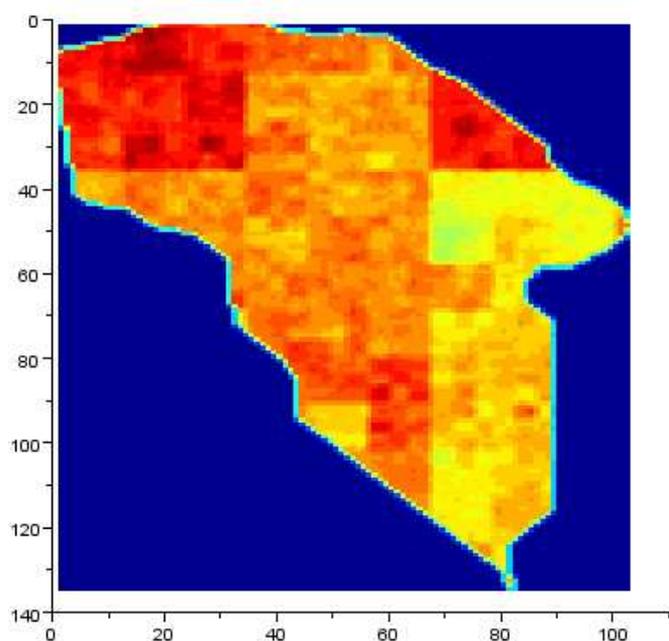


FIGURE 2.8 – Exemple de pluie générée stochastiquement à partir de cascades multifractales universelles discrètes.

D'autre part, les données de pluie sont mesurées soit via des pluviomètres, soit par des radars. Dans ce second cas, les mesures se présentent sous forme de mosaïque dont chaque pixel contient l'intensité de pluie. En France, la plupart des radars sont gérés par Météo France. Pour la région parisienne le radar est situé à Trappes (à une trentaine de kilomètres au Sud-Ouest de Paris). Il s'agit d'un radar en bande C produisant des données ayant une résolution spatiale de 1 kilomètre et une résolution temporelle de 5 minutes. Dans le but de ramener la résolution spatiale des données radar vers une résolution compatible avec le domaine de modélisation, ces données sont désagrégées par la technique des cascades multifractales universelles ([Schertzer and Lovejoy, 1987](#) ; [Gires, 2012](#)). Pour expliquer brièvement, la donnée initiale correspond à une zone de 256 km par 256 km centrée sur le radar avec un temps de mesure de 13h. Ce jeu de données est tout d'abord analysé pour retrouver les paramètres importants nécessaires à la descente d'échelle.

Ensuite le processus de descente d'échelle est mis en place sur ces données et le résultat correspond à un nouveau jeu de données avec la même variabilité spatio-temporelle redistribué dans des grilles ayant une résolution plus proche à celle des grilles du module de surface. Seulement 87 minutes de ces données retravaillées ont été utilisées dans un premier temps sur le cas de Villecresnes.

2.3.3 Connexion des bâtiments au réseau de drainage / assainissement

Il est apparu en cours de développement que les données du réseau d'assainissement ou de drainage des eaux pluviales étaient, tout du moins pour la France, les plus difficiles à obtenir. En effet, ce réseau est géré par différents organismes et à différents niveaux. Or chaque niveau et chaque organisme possède ses propres données qu'il faut aller chercher auprès de chacun. Par dessus cette complexité d'organisation, se greffe la problématique de la sécurité qui fait que chacun est plus ou moins réticent à diffuser l'information sans un certain nombre de garanties.

Même lorsque toutes les données disponibles ont pu être récupérées, cela ne signifie pas forcément que toute l'information est présente. Si la plupart du temps le tracé des conduites est disponible, ce n'est pas toujours le cas de leur description (taille, matériaux, profondeur, etc...). De plus, les zones connectant les différentes parties administratives sont la plupart du temps erronées voire absentes. Ainsi il n'est pas étonnant que les raccordements entre les domaines privés (habitation, hangar, ...) et publics ne figurent nulle part.

Il a donc fallu, pour prendre en compte la contribution des toitures à la charge des réseaux, évaluer quelle part des bâtiments était raccordée à quel niveau du réseau, et ce, en faisant avec les données disponibles et les possibilités des modèles mis en jeu. Ainsi, c'est l'avaloir le plus proche qui a été choisi. Si une hypothèse avait été faite pour ajouter une condition d'altitude en plus de la proximité de l'avaloir, elle peut poser des problèmes lorsque les informations disponibles ne sont pas assez détaillées et/ou lorsque la topographie du bassin versant est variable.

En effet, avec une topographie marquée, ou avec la présence d'un talweg ou avec un réseau très peu renseigné, si l'altitude est prise en compte alors la grande majorité des eaux de ruissellement sur les toitures finissent dans l'avaloir le plus proche de l'exutoire de système. Comme le montre la figure 2.9, dans certains cas, il est préférable d'ignorer la condition d'altitude dans le choix de la localisation de la contribution. ce changement dans la répartition des zones de contribution à chacun des avaloirs peut induire de grands changements dans la charge du système de drainage. Ainsi, avec une répartition comme sur la figure de gauche, le système se trouve en charge même pour des événements très courants, ce qui n'est pas le cas avec une répartition comme sur la figure de droite.

2.3.4 Modification de la topographie en fonction de l'utilisation du sol

Les données de topographie sont disponibles soit sous forme de Modèle Numérique de Terrain (MNT), soit sous forme de Modèle Numérique d'Élévation (MNE). Le premier type représente le niveau du sol naturel, c'est-à-dire en ignorant les modifications apportées par les activités humaines. Ainsi, dans les milieux très urbanisés, la topographie obtenue est celle qui se trouve

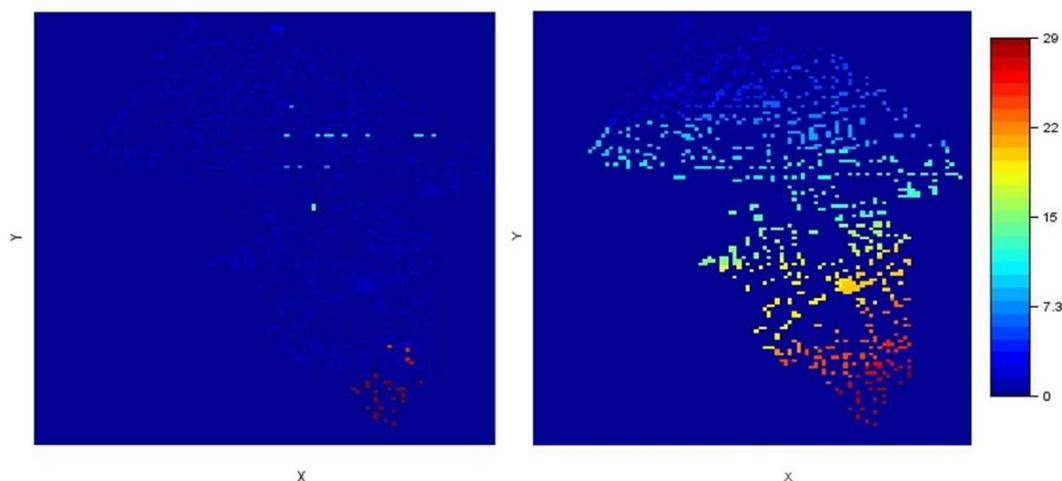


FIGURE 2.9 – Exemple d’identification des bâtiments en fonction de leur connexion à un avaloir du système de drainage. À gauche avec une condition d’altitude, la plupart des bâtiments se retrouvent associés à l’avaloir n°1. À droite, sans cette condition, la répartition se fait plus équitablement dans ce cas particulier.

sous les bâtiments par interpolation linéaire entre les mesures de sol autour de ceux-ci. Le second type quant à lui représente la surface en tenant compte des modifications anthropiques. En France, les données de topographie sont disponibles pour la recherche auprès de l’Institut de Géographie National (IGN) sous la forme d’un MNT ayant une résolution horizontale de 25 mètres et une résolution verticale de l’ordre du mètre⁵.

Cependant, les écoulements d’eau en surface sont conditionnés par la présence de bâtiments. De même, la présence des trottoirs implique le plus souvent la présence d’une petite marche les séparant de la chaussée. Dans ce cas, l’eau peut s’accumuler le long de cette bordure et être canalisée vers les avaloirs. Il est évident que ce genre d’éléments du paysage urbain ne peut être pris en compte que lors de simulation à très fine échelle (avec une résolution autour du mètre).

Ce type de problème ne se pose pas dans les zones où la donnée d’altitude est donnée en conservant l’information sur les activités humaines. C’est par exemple le cas aux Pays-Bas où ces données sont plutôt diffusées sous forme de MNE. En effet, les partenaires du projet Rain-Gain ont obtenu des données issues de mesure LiDAR sur la zone de Rotterdam. Ce type de données, si elle est plus précise puisqu’avec une résolution de l’ordre du centimètre aussi bien horizontalement que verticalement, peut également poser d’autres problèmes. En effet, du fait de la précision de ces données, tous les éléments sont pris en compte et pas seulement les bâtiments. Autrement dit, les véhicules présents sur la chaussée au moment de l’acquisition de ces données ainsi que les végétaux sont également visibles sur le MNE. Dans le cadre d’une modélisation à très fine échelle, ce type de donnée peut être un atout. Mais ce n’est pas le cas des modélisations

5. Ces données sont en cours de mise à jour et devrait être disponibles sur toute la France avec une résolution horizontale comprise entre 1 et 5 mètres et une résolution verticale d’au moins 50 centimètres d’ici à la fin 2014 (<http://professionnels.ign.fr/catalogue>, IGN, 2013)

courantes avec une résolution de l'ordre de la dizaine de mètres, d'autant plus si les données sont formatées automatiquement comme c'est le cas pour Multi-Hydro (cf section 2.4). Dans ce dernier cas, l'ajout d'informations telles que la présence de véhicules sur la chaussée ou la détection du feuillage des arbres par le LiDAR peuvent créer des reliefs artificiels et modifier le cheminement de l'eau en surface.

La prise en compte des modifications de la topographie implique la création de routines qui vont permettre l'augmentation de l'élévation pour les pixels occupés par des bâtiments et la diminution de l'élévation des pixels occupés par de la chaussée. Le résultat de cette routine est illustré par la figure 2.10 qui montre la modification de l'altitude par l'utilisation du sol sur le cas de Villecresnes.

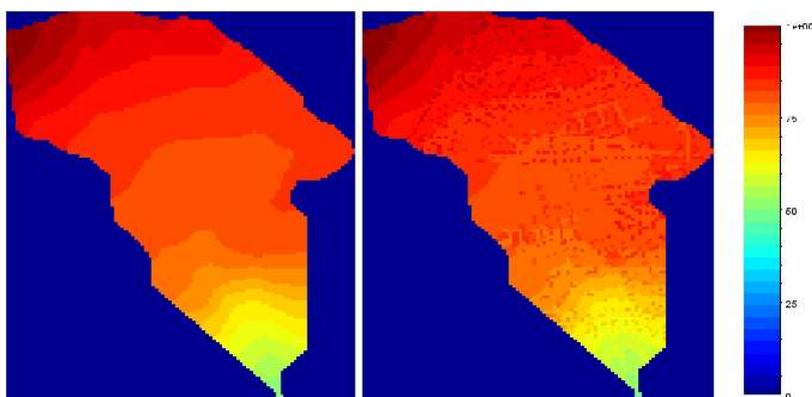


FIGURE 2.10 – Modification de la topographie en fonction de l'utilisation du sol sur le cas de Villecresnes. À gauche sans modification et à droite avec une augmentation de l'élévation de 5m pour les pixels maison et une diminution de 15 cm pour les pixels de routes et d'avaloirs.

2.3.5 Débordement des avaloirs

La modélisation des avaloirs en débordement, ainsi que la problématique de la mise en surcharge du réseau est une chose délicate (Ochoa Rodriguez, 2013). En effet, cette interaction entre la surface et le système de drainage des eaux pluviales est également une interaction entre deux modules totalement différents, représentés par deux modèles différents et répondant à des processus différents, et donc des équations différentes. Il semble alors évident que le module de surface qui gère les entrées du système ne peut pas connaître les conditions données par le module de drainage. De plus, chaque avaloir est plus ou moins indépendant de celui qui déborde en fonction de sa distance à celui-ci. Comme le module de surface fonctionne sur la base de classe d'utilisation du sol, il a fallu trouver un autre moyen de gérer ces débordements.

La première chose évidente à mettre en œuvre est de supprimer la possibilité d'infiltration de l'eau par l'avaloir en débordement. Pour cela, un test simple permet de transformer chaque pixel avaloir en débordement de la grille du fichier de surface en un pixel de route. Ainsi, la connexion descendante entre les modules de surface et de drainage est temporairement rompue. Ensuite, il faudra attendre que la charge du système diminue pour que cette connexion se remette en place.

La deuxième partie du débordement est la remise en ruissellement de l'eau provenant du réseau. Deux méthodes ont été mises en place au fil du développement du modèle Multi-Hydro. Au départ, la solution la plus simple a été mise en place. Il s'agit d'utiliser la grille de hauteur d'eau initiale en surface. Cette grille permet au module de surface de savoir quelle quantité d'eau est présente sur chacun des pixels de la zone simulée en début de boucle d'interaction. En ajoutant le volume d'eau sortant des avaloirs en surcharge sur le pixel correspondant tout en considérant celui-ci comme étant dorénavant un pixel de route, le module de sol répartira ce volume sur les pixels avoisinants via les processus de ruissellement. Cette méthode fonctionne tant que les volumes d'eau débordant du système d'assainissement/drainage sont relativement faibles et peu variables. En effet, lorsque les volumes mis en jeu dans le processus de débordement deviennent importants, cela implique une variation dans la hauteur d'eau du pixel considéré dans le module de surface. Cette nouvelle répartition de l'eau peut créer des instabilités numériques dans le modèle et le faire planter car le modèle doit gérer la totalité du volume d'eau sur les tous premiers pas de temps de la boucle. De plus, cette représentation des débordements permet de prendre en compte un débit et donc d'initialiser un ruissellement et de représenter au moins partiellement l'impact de la mise en pression des eaux provenant des canalisations en surcharge.

Pour éviter ce genre de difficultés qui peuvent s'avérer fréquentes lorsque l'on traite des événements extrêmes, les débordements des avaloirs sont gérés désormais comme des sources ponctuelles spontanées. Ainsi, tout le volume jaillissant de l'avaloir est reparti temporellement sur l'ensemble de la boucle. Cela permet au modèle de n'avoir à gérer que de petites quantités d'eau à chaque pas de temps du calcul.

2.3.6 Les résultats et leurs visualisations

La visualisation des résultats est une partie indispensable de la modélisation. Pourtant, un grand nombre de modèles négligent cet aspect et laisse à l'utilisateur la lourde tâche de trouver un moyen de présenter efficacement les résultats obtenus par le modèle. Il semblait donc, durant le développement de Multi-Hydro, judicieux de fournir un jeu de procédures permettant de tracer des figures de bases pour les principales sorties. De plus, avec la réalisation de scénarios, il est très agréable d'avoir des routines toutes prêtes permettant de tracer les figures avec toujours la même mise en page et ce sans avoir à répéter à chaque fois le code.

Les courbes de débits La première catégorie de résultats qui vient à l'esprit lorsque l'on parle de modélisation hydrologique est celle des débits. Dans le cadre de Multi-Hydro, deux types de débits sont représentés. Il s'agit en premier lieu du débit de ruissellement à l'exutoire du bassin versant. Cette information est récupérée via le module de surface et dépend en majeure partie des indications fournies par l'utilisateur en terme de localisation de cet exutoire mais aussi de surface drainée par celui-ci et de pente en aval. En effet, la vitesse à laquelle l'eau arrive et est évacuée du bassin versant est directement liée avec la pente aux abords de ce point d'évacuation. Du fait que l'utilisateur donne la localisation de l'exutoire et que le module de surface peut gérer des exutoires multiples, il est donc concevable de placer un certain nombre de points sur la zone étudiée et ainsi avoir une idée du débit pour les points stratégiques.

Dans le cadre de la modélisation hydrologique en milieu urbain et péri-urbain, un autre débit est important, c'est celui qui se produit dans le réseau de drainage des eaux de surface. En effet, il permet de traduire de la charge dans ce système. Cette information est gérée par le module de drainage. C'est donc le débit moyen pour chaque boucle qui est accessible, ce qui implique donc que la précision sur ce débit est directement dépendante de la durée de ces boucles. Le débit est donné pour chacun des exutoires.

La partie 3 de ce travail présente un grand nombre de ce type de figures. C'est notamment le cas des figures 3.5, 3.6, 3.7.

L'information est donc classiquement tracée dans un graphique de débits en m^3/s en fonction du temps. Une amélioration qui sera rapidement apportée à ces graphiques sera de permettre le tracé de la pluie sur le haut de graphique pour faciliter la lecture de la réponse hydrologique du bassin et donc la compréhension du fonctionnement de celui-ci.

Les cartes Le module de surface produit un certain nombre de résultats spatialisés. C'est notamment le cas des hauteurs d'eau en surface, de l'infiltration potentielle, et des quantités de pluie tombées sur le bassin versant. Dans le contexte de calcul de scénarios d'inondations qui entoure le développement de Multi-Hydro, c'est évidemment les cartes de hauteurs d'eau en surface qui ont attirées l'attention.

L'information est présentée sous forme d'un raster stocké dans un fichier texte avec, comme pour tous les rasters utilisés en entrée du modèle, une valeur par pixel. Que ce soit à l'aide d'un SIG tel que MapInfo ou QGIS, ou d'un outil destiné aux mathématiques tel que Scilab, la visualisation de ce type de résultats est aisément mise en place au travers d'algorithmes variés implémentés dans les logiciels. Le problème de ces procédures c'est qu'elles permettent certes une belle visualisation, mais elles ont tendance à moyenniser les valeurs entre elles pour adoucir les traits de la figure. Cependant, il peut être préférable de mettre en place une visualisation des valeurs telles qu'elles sont données par le modèle. Il a fallu pour cela créer une routine de traçage propre à Multi-hydro. De plus, les grands écarts dans les hauteurs d'eau qui peuvent se présenter sur un bassin versant, avec des variations de plusieurs centimètres dans la vallée et seulement de quelques millimètres dans les pentes, font que certaines variations passent inaperçues sur les cartes. Le traçage des cartes prend donc en compte la possibilité d'éliminer les valeurs les plus fortes de façon à ré-échantillonner l'amplitude de l'information et ainsi mettre en avant des détails plus fins de la variabilité de l'information. Dans ce travail, certaines figures ont été tracées avec cette méthode (par exemple dans le chapitre 3, figures 3.9, 3.12, 3.34, 3.36).

Le modèle de surface fournissant une carte par pas de temps, il est possible de suivre l'évolution de l'information choisie au cours de l'événement modélisé. Il est donc intéressant de faire des animations sous forme de gifs animés.

Les autres possibilités Un certain nombre de résultats n'ont actuellement pas de visualisation automatisée dans Multi-Hydro. Cela est du soit à l'inclusion récente de nouvelles fonctionnalités dans le modèle, soit au fait que ces résultats n'aient pas encore été réellement exploités.

C'est notamment le cas des profils et des cartes de saturation en eau du sol. En effet, le module de sol n'a été que récemment exploité et les principaux résultats utilisés correspondaient

aux quantités d'eau remises à disposition pour le ruissellement. Ces résultats sont observables et analysables facilement par le biais de cartes, au même titre que celles des hauteurs d'eau en surface. Cependant, le module de sol permet également d'accéder à des profils de saturation en eau du sol, selon l'axe vertical, pour l'ensemble des pixels du bassin d'étude. On peut alors imaginer la mise en place de routines qui permettrait de tracer ces profils pour un certain nombre de points ayant un intérêt particulier. Il est également envisageable de produire des cartes représentant la profondeur du front d'humidification les saturations respectives de chacune des couches du sol.

La mise en place des routines automatisées devrait se faire assez rapidement puisqu'il ne s'agirait que d'adapter celles existantes pour les informations de surface.

Les résultats donnés par le module de drainage comportent un grand nombre d'informations pour chaque tuyau et chaque nœud du réseau modélisé. En ce qui concerne les canalisations, il est possible d'accéder aux hauteurs d'eau. En ce qui concerne les nœuds, c'est les débits entrants et sortants qui sont assez facilement accessibles, ainsi que les volumes débordant éventuellement de ceux-ci. Il est donc envisagé de fournir la possibilité de tracer ces débits pour un certain nombre de points stratégiques. Une telle démarche peut s'avérer utile pour évaluer par exemple des problèmes locaux de surcharge ou de mieux comprendre les mécanismes de répartition des eaux dans des zones complexes (embranchement multiples, ouvrages).

Ces informations peuvent également servir de base pour le calcul de bilans prenant en compte les volumes de pluie pour en évaluer la redistribution entre la surface (stockage et ruissellement), l'infiltration (dans le sol et dans le réseau d'assainissement) et les volumes sortants du bassin. De même, puisque le module de drainage produit un grand nombre d'informations pour chaque élément du réseau, il peut être intéressant de calculer les bilans pour les points présentant un intérêt particulier.

D'une manière générale, les bilans sont à la fois utiles pour la compréhension des fonctionnements hydrologiques des zones étudiées, mais aussi des modèles. Ils sont un outil puissant pour la correction d'erreurs qui peuvent facilement se glisser dans une modélisation, surtout lorsque celle-ci fait entrer en jeu autant de données, de paramètres et de processus que Multi-Hydro.

La production de résultats sous forme de raster à chaque pas de temps permet la réalisation d'analyses multifractales. Par le biais de la procédure mise en place par [Hoang \(2011\)](#), il est possible d'appliquer ce type d'analyse sur les sorties de Multi-Hydro. C'est, par exemple, ce qui a été fait pour les cartes de hauteurs d'eau sur le cas de Villecresnes (section 3.1). Ces analyses permettent de caractériser la réponse générale de la zone étudiée en s'affranchissant des variations à petite échelle.

2.3.7 Utilisation du modèle par des personnes non-expertes

Le modèle étant développé dans le cadre du projet européen SMARTeST, il est destiné à être utilisé par un large panel d'utilisateurs. Parmi ceux-ci se trouvent des personnes n'ayant pas une grande connaissance de l'informatique et encore moins de la programmation. Pour ce type

d'usagers, il n'existe que deux solutions : se tourner vers des outils proposant de belles interfaces ou faire appel à une tierce personne possédant les connaissances requises pour l'utilisation des outils les plus rustiques. Si au départ Multi-Hydro se plaçait plutôt dans la deuxième catégorie, son contexte de développement a vite imposé de prendre en compte la facilité d'utilisation. Ainsi, un tutoriel d'utilisation a été mis en place pour guider la prise en main du modèle (voir annexe F).

En plus d'être modulaire, Multi-Hydro prend en compte un grand nombre d'options (type de pluie, possible implémentation de mesures de protection, modification de la topographie en fonction de l'utilisation du sol, ...). Ainsi, pour éviter à l'utilisateur de devoir naviguer dans le code Scilab pour activer ou non les différentes options et choix de modélisation, il a été choisi de passer par le biais de fenêtres pop-up (figure 2.11).



FIGURE 2.11 – Fenêtre interactive permettant une utilisation aisée de Multi-Hydro.

Actuellement, un grand nombre de ces pop-up sont nécessaires au fonctionnement de Multi-Hydro. Même si une connaissance basique de Scilab permet assez facilement de s'affranchir de celles-ci (ce qui est généralement le cas dès qu'il s'agit d'enchaîner les simulations ou de travailler via un serveur...), toutes ces fenêtres devraient assez rapidement être intégrées en une seule (illustrée dans la figure 2.12).

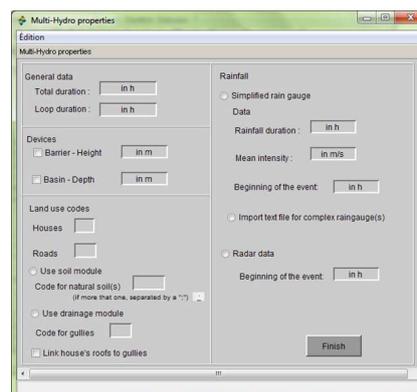


FIGURE 2.12 – Fenêtre globale regroupant les pop-up existantes.

De même, la mise en place de routines d'automatisation de visualisation des résultats permet de faciliter l'utilisation du modèle pour la plupart des utilisateurs (cf section 2.4.2).

Un autre point important de l'ergonomie de Multi-Hydro provient également de l'assimilation des données d'entrées. La section suivante traite de cette tâche et de son automatisation au travers d'un outil SIG dédié au modèle.

2.4 Données d'entrée et formatage

2.4.1 Les données d'entrées

Un modèle tel que Multi-Hydro, qui met en relation des modules ayant leurs propres besoins, nécessite une grande gamme de données en entrée selon des formats propres à chacun. De plus, le format n'est pas le seul facteur à prendre en compte dans la modélisation. Il faut aussi tenir compte à la fois du modèle et des données.

D'une manière générale, il existe deux types de données : les données rasters et les données vecteurs. Dans le premier cas, les informations sont présentées sous forme d'une grille dont la taille des cellules est fixe et ne peut contenir qu'une seule indication. Ces données ont l'avantage de ne nécessiter que peu d'informations spatiales (coordonnées d'un coin et dimension de la grille). Les données vecteurs, quant à elles sont représentées par des formes géométriques (polygones, lignes, points) dont les sommets sont caractérisés par leurs coordonnées géographiques et dont leur emprise traduit d'une ou plusieurs propriétés. Ces données vectorielles comprennent aussi une table attributaire. Celle-ci permet d'avoir pour chaque entité du fichier vectoriel des informations supplémentaires, pas forcément liées à la géométrie de la forme. Par exemple, un fichier contenant les délimitations communales d'un département peut contenir pour chaque commune dessinée le nombre d'habitants, la densité de la population, etc. .. Ces données sont appelées données attributaires. Elles seront utilisées pour la conversion des données sources vers les formats d'entrées de Multi-Hydro.

Les modèles hydrologiques tels que Multi-Hydro qui demandent des données géographiques pour leur fonctionnement n'ont généralement la capacité de lire ces informations que d'une seule manière. La création d'un modèle qui ne serait pas limité par le format de la donnée nécessiterait en effet un temps de développement très important et une actualisation des possibilités assez fréquente pour tenir compte de l'évolution quasiment constante et rapide des pratiques. Ainsi, Multi-Hydro lit les données selon un format qui est propre au module où elles sont nécessaire et parfois indépendant du format initial où elles se trouvent.

Pour représenter toutes les parties des zones étudiées avec Multi-Hydro, il faut donc pouvoir décrire la surface, le sous-sol et le réseau de drainage des eaux de pluie.

En ce qui concerne la surface, Multi-Hydro demande essentiellement des données rasters avec une résolution correspondante à celle du modèle mis en place. La donnée essentielle pour la modélisation du ruissellement est la topographie. Cette donnée est généralement fournie sous le bon format, mais nécessite le plus souvent (pour ne pas dire toujours à moins de choisir la modélisation en fonction de la donnée) un ajustement de résolution horizontale. La plupart des outils SIG

permettent cet ajustement par l'application de différents algorithmes moyennant temps, compromis et maîtrise des outils.

La surface des zones modélisées est également décrite par l'utilisation du sol, les propriétés de surface et la localisation éventuelle des dépressions trop petites pour figurer dans le fichier de topographie mais pouvant influencer les volumes d'eau mis en ruissellement. Ces deux caractéristiques sont intimement liées et proviennent généralement de données vectorielles. Cependant, le modèle réclame des données rasters où chaque pixel traduit de l'appartenance de la zone à une classe d'utilisation du sol. Le passage de données vectorielles à des données rasters peut s'avérer complexe. En effet, si la plupart des propriétés physiques sont représentées comme des valeurs numériques qui acceptent facilement d'être moyennées sur l'étendue du pixel, ce n'est pas le cas des données d'utilisation du sol. Or, cette information conditionne un grand nombre de propriétés physiques telles que la rugosité ou les capacités d'infiltration. De plus, quelques éléments de très petite taille peuvent avoir un impact conséquent sur les processus à des échelles plus vastes que leur simple taille. C'est par exemple le cas des avaloirs qui vont drainer les eaux de ruissellement sur une cinquantaine de mètres en aval. De plus, ces éléments ponctuels ont un rôle majeur dans la connexion entre surface et système de drainage des eaux de pluies et sont donc absolument indispensables. Cependant, les algorithmes de rasterisation classiquement implémentés dans les outils SIG classiques basent généralement l'attribution d'une classe en fonction de la proportion du pixel occupé par cette classe. Ainsi, un pixel comportant 30% de maison, 20% de route, 40% de jardin et 10% d'avaloir se retrouvera classé comme un jardin alors que l'élément le plus pertinent d'un point de vue hydrologique sera l'avaloir. La rasterisation des données d'utilisation du sol est donc la partie la plus problématique et la plus coûteuse en temps de l'étape de mise en place d'un nouveau cas d'étude.

Une fois que chacun des pixels s'est vu attribuer une classe d'utilisation du sol, Multi-Hydro lira dans un fichier résumant tous les paramètres de la modélisation les propriétés associées à chaque classe telles que les hauteurs d'interception, les coefficients de rugosité, la conductivité hydraulique, le déficit en eau et la succion capillaire. Ces trois derniers paramètres sont ceux qui gouvernent l'infiltration superficielle dans le module de surface. La description fine du sol, quant à elle, passe par la définition de l'épaisseur de chacune des couches qui composent le sous-sol ainsi que des paramètres liés à la composition de celles-ci et la profondeur de la nappe.

La dernière partie devant être décrite est celle qui concerne le réseau de drainage des eaux de pluie. Ces données sont généralement données sous la forme de données vectorielles. Multi-Hydro exploite ces informations sous la forme d'un fichier texte qui recense chaque nœud, chaque conduite et chaque ouvrage avec leurs propriétés physiques (forme, longueur, profondeur, débit de base, matériaux, ...). Le passage des données SIG vers ce fichier texte peut se faire via l'interface graphique fournie avec le modèle SWMM sur lequel est basé le module de drainage. Cette procédure est assez longue et fastidieuse puisqu'il n'est pas possible d'importer les données dans cette interface. S'il est assez facile et rapide de créer un réseau simple avec cet outil plutôt ergonomique, ce n'est plus le cas pour des réseaux plus complexes.

D'autres données utiles pour la modélisation sont celles qui traduisent de l'état initial du domaine étudié. Ces informations sont notamment des cartes des quantités d'eau déjà présentes en surface, des quantités d'eau précédemment infiltrées dans le sol et influençant les conditions d'infiltration en début d'événement, la charge éventuelle dans le réseau de drainage.

L'assimilation de données géographiques est une étape cruciale de la mise en place de nouveau cas d'étude pour la modélisation. C'est également la partie la plus coûteuse en temps si elle doit être effectuée manuellement. De plus, certaines données ne sont pas forcément disponibles pour les cas intéressants. Il est donc utile de mettre en place un outil pour l'assimilation de toutes ces données et permettant éventuellement de générer des jeux de données réalistes pour combler les manques possibles.

2.4.2 Le formatage de ces données, la nécessité d'une automatisation

Avec une telle diversité de données et de formats, mettre en place un nouveau cas d'étude peut se révéler chronophage, même pour un utilisateur expérimenté des différents logiciels SIG. La mise en place par exemple de celui de Chennevière a pris presque un mois et demi, et sans compter le formatage des données du réseau qui manquaient à l'appel.

Pour éviter de trop perdre du temps, et d'effrayer les utilisateurs potentiels de Multi-Hydro, un outil a été mis en place pour automatiser la démarche. Ainsi, la modélisation n'est plus une lutte contre les données pour les faire entrer dans les bonnes cases, mais bien une réflexion sur comment représenter au mieux la réalité. Cet outil, appelé MH-AssimTool (pour Multi-Hydro Assimilation Tool), a été développé au sein du laboratoire par [Richard et al. \(2013\)](#) (soumis dans « Journal of Hydrology and Earth System Sciences », HESS). Cet outil a permis notamment la mise en place rapide du cas d'étude d'Heywood, dans la banlieue de Manchester au Royaume-Unis, et de Rotterdam, aux Pays-Bas, et ce dans un temps record. S'il reste des problèmes sur des cas très particuliers comme ceux de Rotterdam (qui demandent la prise en compte de nombreuses particularités inhérentes à la vie en polder), le cas d'Heywood a lui pu être mis en place en seulement quelques jours.

Cet outil d'assimilation des données permet également de générer des fichiers pour les données manquantes. C'est notamment le cas des données de sous-sol qui ne sont généralement pas facilement accessibles. Pour ce type de donnée, l'utilisateur peut rentrer via une fenêtre le nombre de couches constituant le sol du bassin versant (limité à 4) et pour chacune son type (selon une liste par défaut ou alors manuellement) et son épaisseur. Ces données sont accessibles par des données de forages, généralement accessibles sur internet (en France le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) permet de consulter tous les forages réalisés sur le territoire).

L'outil, dont l'interface graphique se présente comme un logiciel SIG simplifié, permet de charger directement les données géographiques sous leurs formats les plus communs et produit des fichiers compatibles avec la modélisation Multi-Hydro. Un soin tout particulier a été apporté à la définition des grilles d'utilisation du sol pour permettre de conserver les informations de petite taille qui sont indispensables à la continuité hydrologique des modélisations. L'extraction de la donnée constituant l'utilisation du sol se base sur un concept simple de classification par importance. L'utilisateur peut choisir selon sa propre donnée d'occupation du sol une classification des types d'occupations. La catégorie « avaloir » se doit d'être choisie en premier pour garder la connexion entre le module de surface et le module de drainage. Ensuite, les autres types de sols

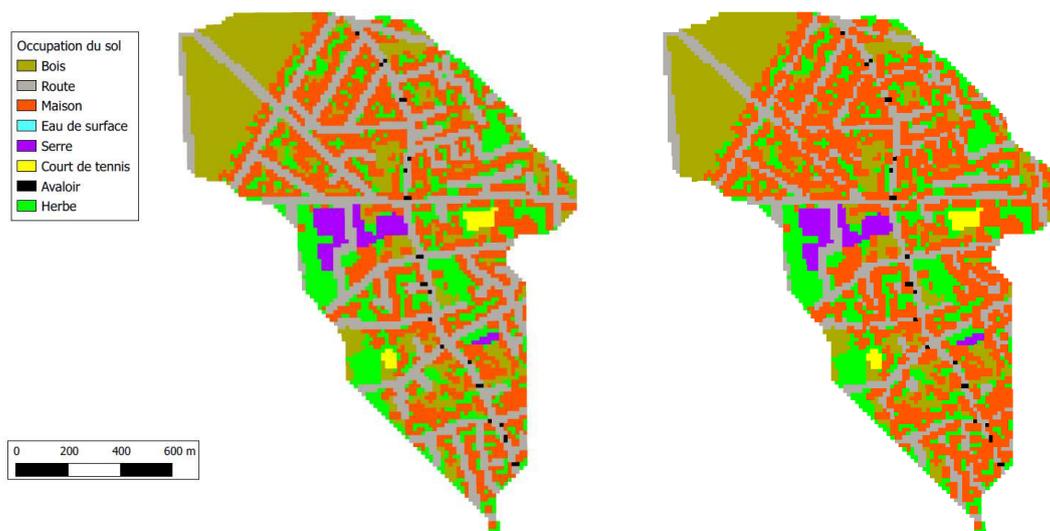


FIGURE 2.13 – Comparaison de l’assimilation des données d’utilisation du sol avec une priorité sur la classe route (à gauche) et sur la classe maison (à droite) obtenues avec MH-AssimTool.

doivent être classés les uns par rapports aux autres.

Dans le but d’évaluer cet outil, les données d’utilisation du sol du cas de Villecresnes obtenues manuellement ont été comparées avec celles obtenues via MH-AssimTool. Lors de la mise en place manuelle du fichier, il a fallu plusieurs semaines de travail pour assigner une classe d’utilisation du sol à chacun des pixels de la zone d’étude. Avec l’outil dédié, il suffit de quelques minutes pour obtenir un fichier à la même résolution. Les répartitions des classes d’utilisation du sol sont assez différentes en fonction de la classe définie comme étant prioritaire. La figure 2.13 montre le résultat de la classification de l’utilisation du sol par MH-AssimTool, en prenant comme priorité la classe route (à gauche) puis la classe maison (à droite). Ces classifications sont très différentes l’une de l’autre puisque dans le second cas, le pourcentage de surface couverte par les pixels maison est plus important que dans le premier cas. De même, lorsque la classe maison est mise en priorité, la continuité du réseau routier n’est plus assurée, ce qui peut avoir un impact majeur sur la réponse hydrologique de la zone.

Si la classification de l’utilisation du sol semble plus précise avec MH-AssimTool que lorsqu’elle est faite à la main, la rapidité d’obtention de celle-ci permet de mettre en place facilement plusieurs scénarios de modification de l’information. De plus, l’exemple présenté ici correspond à une résolution de 10 mètres, ce qui est, d’un point de vue modélisation hydrologique, une résolution faible. Les résultats d’une telle conversion correspondent forcément à une vision trop pixelisée de la zone d’étude. Une préparation des données avec une résolution de 5 mètres ou inférieur est plus juste et permet de garder les continuités hydrologiques apportées par les données sources.

2.5 Pour résumer

Multi-Hydro a donc été développé avec cet objectif de fournir rapidement un outil de modélisation hydrologique qui soit avant tout utilisable par le plus grand nombre. C'est donc un outil modulaire basé sur des modèles open source entièrement distribués et à base physique qui a été mis en place, associé à un outil SIG dédié à l'assimilation des données d'entrée pour en faciliter la diffusion et l'utilisation sur de nouveaux cas d'étude. Ainsi, c'est aussi un outil qui permet de multiplier les scénarios de pluies et

Chapitre 3

Application du modèle

Comme le montre la figure 3.1, l'approche SMARTeST des cas d'études apporte une dimension d'échelle dans la définition des scénarios. Ainsi, pour un cas de figure donné, avec une problématique donnée, il convient de pouvoir appréhender qu'il existe différentes possibilités d'action à différentes échelles. C'est donc différents scénarios de protection qui peuvent être envisagés, chacun d'entre eux devant être évalués par des outils tels que Multi-Hydro.

C'est avec cette approche que Multi-Hydro a été appliqué sur différents cas d'études durant son développement. Il s'agit de cas d'étude variés, permettant tous d'aborder des problématiques différentes et parfois à des échelles variées.

Le premier cas d'étude est situé en région parisienne, dans le Val-de-Marne. Il s'agit d'une partie de la ville de Villecresnes. Cette zone avait été délimitée lors des travaux préliminaires sur Multi-Hydro. Il s'agissait initialement du seul jeu de données prêt pour travailler avec le modèle. Cette zone est donc devenue le cas de référence pour les tests utiles à chaque nouvelle modification du code.

Le second cas d'étude présenté ici est situé non loin du premier, dans le même département. Il s'agit d'une partie de la ville de Saint-Maur-des-Fossés. Cette zone a récemment subi une évaluation de son réseau d'assainissement (eaux usées et pluviales) et bénéficie donc d'une cartographie mise à jour du réseau d'assainissement. De plus des campagnes de mesures ont eu lieu durant la première moitié de l'année 2013. Ces données permettront à terme de réaliser une validation de Multi-Hydro. Cependant, il n'a pas encore été possible d'implémenter Multi-Hydro sur la zone avec précision puisque les résultats n'ont été diffusés qu'en octobre dernier. L'application de Multi-Hydro sur une zone plus large à toutefois permis de poser la problématique de la modélisation des rivières lorsque celles-ci ont une largeur supérieure à la résolution du modèle.

Dans le cadre du projet SMARTeST, un cas d'étude a été mis en place en partenariat avec l'équipe de Manchester. Il s'agit d'un quartier de la ville d'Heywood, située à une trentaine de kilomètres au nord-est de Manchester. Cette zone est intéressante pour l'application de Multi-Hydro car elle a permis d'initier les changements d'échelles et de commencer la validation du modèle en comparant les résultats des simulations avec les témoignages des habitants de la zone.

Les deux derniers cas présentés dans ce manuscrit ont été mis en place dans le cadre du projet

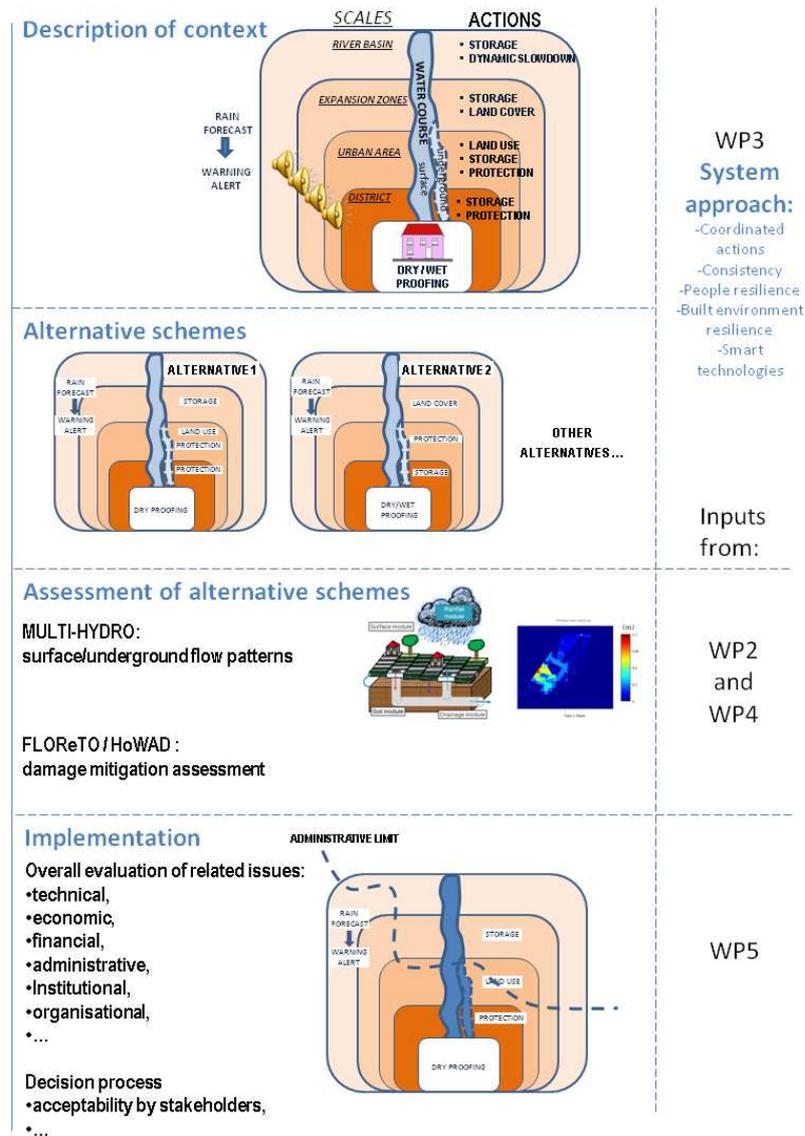


FIGURE 3.1 – Approche des cas d'études au sein du projet SMARTeST. La résilience des systèmes se traduit par la possibilité de mettre en place différentes actions à différentes échelles créant ainsi plusieurs scénarios alternatifs possibles. Chacun de ces scénarios à donc besoin d'être évalué dans le but de d'estimer la meilleure réponse possible

RainGain. Le premier est situé au Nord-Est de Paris, sur la commune de Villepinte. Il s'agit du bassin versant du Loup et dont l'exutoire est occupé par un bassin de rétention des eaux de ruissellement. Ce dernier est géré par la Direction Eau et Assainissement de Seine-Saint-Denis (DEA 93) et est équipé pour permettre la gestion des volumes d'eau stockés dans le cadre de la réduction des risques de surcharge du système.

Le dernier cas d'étude de ce manuscrit correspond à la zone de Spanse Polder, à Rotterdam

(Pays-Bas). Cette zone a permis de mettre en avant les difficultés de la modélisation des zones très planes, au réseau d'assainissement complexe car comportant des pompes de relèvement et de nombreux exutoires. Ce cas d'étude, bien qu'il n'ait pas encore donné de résultat puisque pas entièrement mis en place, permet d'orienter les développements futurs de Multi-Hydro.

3.1 Le bassin versant de Villecresnes, Val de Marne, France

3.1.1 Description

Villecresnes est une ville du Val-de-Marne qui compte un peu moins de 10 000 habitants et qui s'étend sur près de 6 km². La zone étudiée se trouve dans la partie Ouest de la ville, à la frontière avec le département de l'Essonne. Cette zone correspond au bassin versant d'une canalisation départementale d'évacuation des eaux de pluies (figure 3.2), canalisation gérée par la Direction des Services de l'Environnement et de l'Assainissement du Val-de-Marne (DSEA 94). C'est une commune qui a connu quelques épisodes d'inondations dont le dernier remonte au 8 juin dernier¹ et a fait l'objet d'une demande de déclaration en catastrophe naturelle auprès de la préfecture.



FIGURE 3.2 – Localisation de la zone d'étude sur la ville de Villecresnes.

Ce bassin versant fait 0.72 km². Du fait de sa localisation en périphérie de ville, l'occupation du sol est typiquement péri-urbaine avec une grande part du sol non construite. Ainsi, et comme il l'est facilement identifiable sur la figure 3.3, les zones recouvertes d'herbe et de forêt (respectivement en vert clair et en vert foncé) occupent près de 50% de la zone. Le reste est occupé par des maisons typiques de quartier résidentiel (en rouge) et des rues (en gris). Certains éléments de la zone sont un peu particuliers comme les serres (en violet) et les courts de tennis (en jaune). Ces zones seront considérées comme des zones imperméables.

Dans le cas du quartier de Villecresnes étudié, les données disponibles pour le réseau se limitent aux données du réseau pluvial départemental (en noir sur la partie droite de la figure 3.2).

1. <http://www.villecresnes.fr/blog/2013/06/11/un-orage-exceptionnel/>

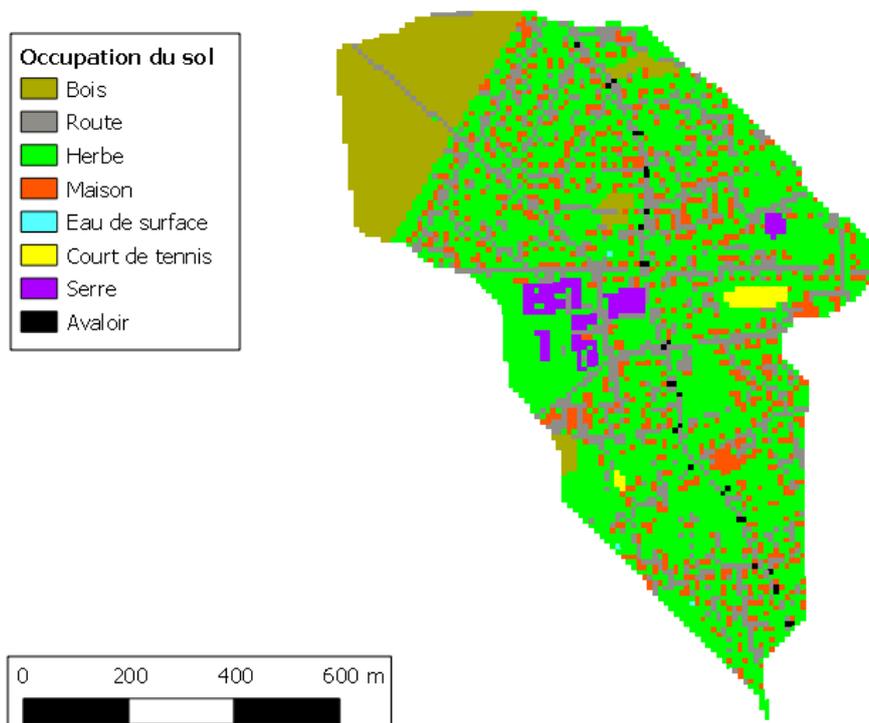


FIGURE 3.3 – Répartition de l'utilisation du sol sur le bassin versant de Villetresnes pour une résolution de 10 mètres obtenue manuellement.

Il est évident, pour une commune aussi urbanisée que Villetresnes, que l'ensemble de la zone résidentielle est équipée d'un réseau plus étoffé que cette simple canalisation et que la plupart des habitations individuelles sont raccordées à un réseau pluvial. Cependant, ces informations relèvent de la gestion communale de ce réseau et elles n'ont pu être obtenues lors de la mise place du domaine de modélisation. Ainsi, différentes options de prise en compte de la connexion des bâtiments au réseau d'eaux pluviales ont également été testées avec Multi-Hydro et reprennent les explications fournies dans la section 2.3.3.

Durant le développement de Multi-Hydro, ce quartier de Villetresnes a été utilisé pour tester les différentes améliorations apportées au code initial ainsi que la mise en place des mesures de résilience fictives utiles à l'illustration des besoins liés au projet SMARTeST. Du fait du manque de mesure sur le terrain, les résultats des modélisations ne sont que des comparaisons relatives des changements les uns par rapport aux autres.

L'événement de pluie utilisé pour ce cas d'étude correspond à une pluie de 80 minutes durant lesquelles il est tombé environ 23 mm et qui a eu lieu en région parisienne le 9 Février 2009. Cette

pluie correspond à un événement de période de retour de 5 ans². Par comparaison, l'événement du 8 juin 2013 correspondait à près de 21 millimètres en une demi-heure de temps et a inondé une partie de l'axe principal Nord-Sud de la zone étudiée ici.

Cet événement est utilisé tout d'abord comme une pluie constante en temps et en espace. L'événement est ensuite décrit plus précisément via la méthode des séries temporelles (voir section 2.3.2). Les données radar de cet événement ont été mesurées par le radar situé à Trappes et géré par Météo France. Les hyétogrammes des deux types de pluie sont donnés par la partie gauche de la figure 3.4, alors que la partie droite de cette figure traduit de la variabilité spatiale en terme de cumul de pluie en fin d'événement obtenue avec l'utilisation des données radar désagrégées multifractalement.

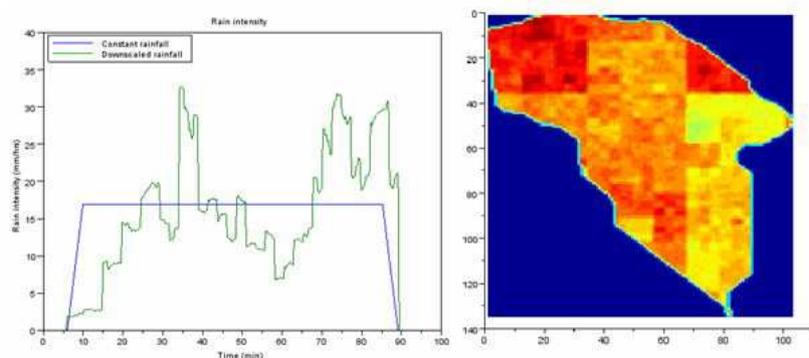


FIGURE 3.4 – Événement pluvieux appliqué sur le cas de Villecresnes. A gauche, l'hydrogramme avec en bleu la pluie uniforme en espace et en temps et en vert la pluie provenant de la dégradation multifractale des données radar. A droite, le cumul d'eau tombé sur le bassin versant dans le cas de la pluie provenant des données radar.

3.1.2 Résultats

Les différents résultats³ présentés ici ne porteront que sur les versions de Multi-Hydro qui prennent en compte au minimum les interactions surface-réseau, c'est-à-dire dès qu'une rétroaction a lieu entre les modules de surface MHSM et de drainage MHD. En effet, la version initiale de Multi-Hydro ne présentait que peu d'intérêt et n'a pratiquement pas été utilisée.

Les différentes simulations effectuées sur le secteur de Villecresnes permettent tout d'abord de mettre en avant l'importance des interactions surface-réseau dans le cadre de la modélisation d'événements extrêmes. En effet, lors des événements courants, le réseau de drainage des eaux de ruissellement n'a que peu ou pas de raisons de se trouver en surcharge.

Ensuite, c'est l'influence des éléments du paysage urbain (tels que les bâtiments ou les routes) sur la topographie qui sera étudiée au travers de la comparaison des débits et des cartes de hauteurs d'eau associées à la modification de la topographie en accord avec l'utilisation du sol.

2. <http://www.meteo-paris.com/ile-de-france/climat.html>

3. Une partie de ces résultats ont fait l'objet d'un article dans les proceedings de la conférence Urban Drainage Modelling. Voir annexe A ainsi que des rapports SMARTeST, voir annexes C et D.

Une troisième section portera sur les interactions entre la surface et le sous-sol, en montrant l'importance de ces volumes remis à disposition pour les processus de ruissellement.

Pour finir, quelques mesures de résilience (barrières et noues) seront implémentées sur la zone modélisée pour évaluer leurs impacts sur le fonctionnement hydrologique global du bassin versant.

Les interactions réseaux-surface

Comme il l'a été décrit dans la section traitant des couplages dans Multi-Hydro, la connexion de la surface et du système de drainage des eaux de pluies peut apporter différentes problématiques. Pour commencer, il est important de se rappeler que cette connexion ne peut être que supposée et n'est qu'une approximation grossière de la réalité. En effet, la proximité géographique entre un avaloir et une canalisation n'assure pas forcément que cet avaloir soit connecté à cette canalisation. Les jeux successifs de la mise en place et de maintenance des réseaux réservent quelquefois de petites surprises et la seule façon d'obtenir une information détaillée de ces connexions serait d'aller voir chacun des éléments l'un après l'autre et de les vérifier. De plus, n'ayant à disposition que les données du réseau départemental, la contribution du ruissellement sur les toits se fait via le réseau communal (en supposant bien sûr que toutes les habitations soient connectées au réseau pluvial et ce sans erreurs de branchement). Ainsi, la répartition des eaux provenant des toitures tout au long de la canalisation départementale s'est faite sur la base de la proximité entre la maison et l'avaloir. Dans le cas de Villecresnes, la condition d'altitude dans cette connexion a été ignorée (voir section 2.3.3).

Comme le montre la figure 3.5, le pic de débit en surface est diminué de $0.19 \text{ m}^3/\text{s}$, soit une diminution de 30% du pic initial. Au contraire, le pic de débit dans le réseau est augmenté d'un peu plus de 40% de sa valeur initiale (soit une augmentation de $0.21 \text{ m}^3/\text{s}$). Ces résultats ne sont pas étonnants puisqu'une plus grande partie de l'eau de pluie est drainée par le système d'assainissement. Cependant, l'impact de cette connexion sur les débits de surface et dans le réseau est assez important pour réclamer d'être pris en compte dans les calculs et ainsi affiner les analyses.

La modification de la topographie par l'utilisation du sol et variabilité de la pluie

Comme il l'a été vu dans la section 2.3.4, les activités humaines en milieu urbain et péri-urbain sont susceptibles de modifier les données de topographie. Sur le bassin versant de Villecresnes, où les bâtiments correspondent en majeure partie à des habitations individuelles (zone résidentielle pavillonnaire), il a été choisi de modifier la hauteur des pixels occupés par la classe d'utilisation du sol « maison » en l'augmentant de 5 mètres. D'autre part, pour représenter le caractère drainant des routes, cette classe d'utilisation du sol est quant à elle diminuée de 15 centimètres. La topographie résultante de ces modifications est présentée par la figure 2.10 du chapitre 2.3.4 (page 49).

La figure 3.6 montre que le débit de surface passant par l'exutoire est considérablement diminué par cette modification des données d'altitude, et ce quelque soit la répartition de la pluie.

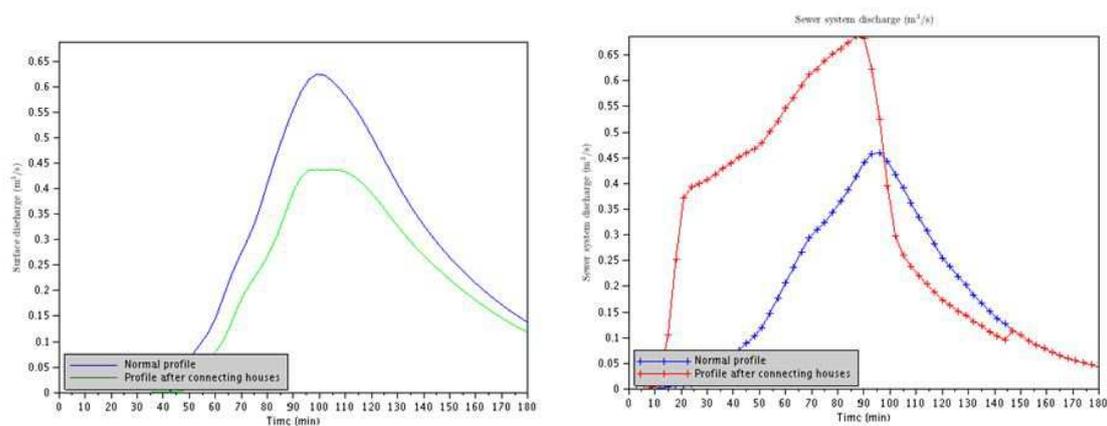


FIGURE 3.5 – Influence de la connexion des bâtiments sur le débit (en $m^3 \cdot s^{-1}$) de ruissellement de surface (à gauche), où la courbe bleue est le débit sans connexion et la courbe verte avec celle-ci. Le débit dans le réseau d’assainissement (à droite) est donné lui aussi avec la connexion (en rouge) et sans (en bleu).

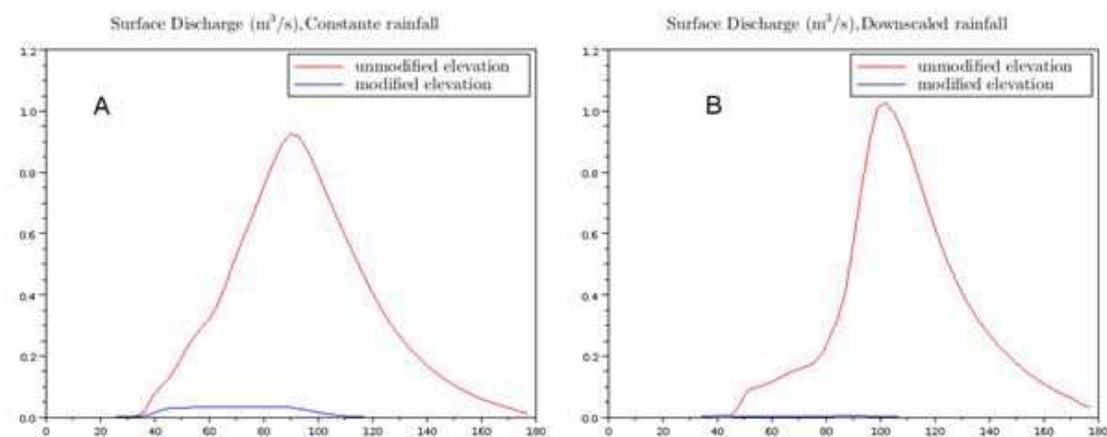


FIGURE 3.6 – Influence de la modification de la topographie en fonction de l’utilisation du sol sur le débit (en $m^3 \cdot s^{-1}$) de ruissellement de surface avec une pluie constante (à gauche) et une pluie variable spatialement et temporellement (à droite). En rouge sans modification de la topographie et en bleu avec.

Cette importante diminution (de près de 90%) est le témoin que l’eau trouve un autre passage pour quitter le bassin versant.

La figure 3.7 montre quant à elle une augmentation du débit calculé à l’exutoire du réseau de drainage des eaux de ruissellement. Cette augmentation s’explique aisément puisqu’elle est associée à la diminution des volumes transitant par l’exutoire de surface. En effet, en diminuant l’élévation des pixels de chaussée, des chenaux artificiels ont été créés et drainent les eaux de ruissellement vers les avaloirs qui sont intégrés dans la route (donc leur altitude a également été diminuée dans le processus). Ainsi, plus d’eau entre dans le système de drainage. La diminution

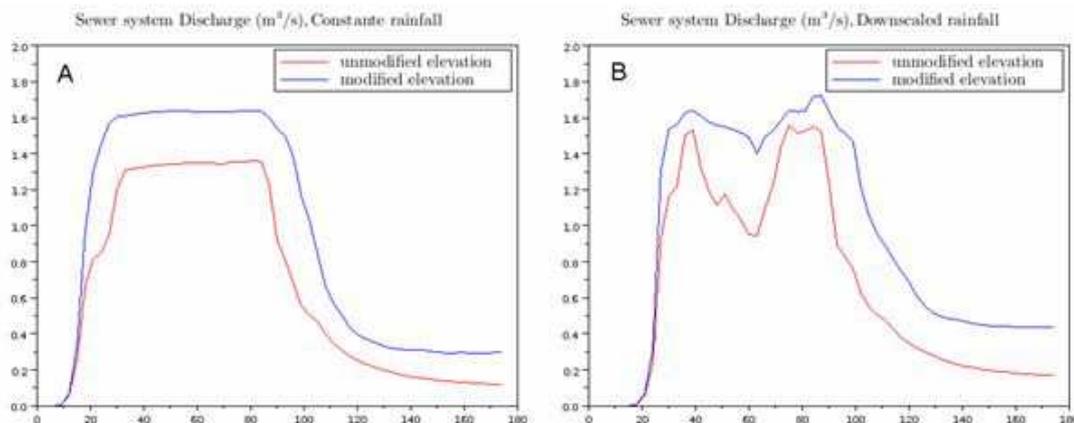


FIGURE 3.7 – Influence de la modification de la topographie en fonction de l'utilisation du sol sur le débit (en $m^3 \cdot s^{-1}$) dans le réseau d'assainissement avec une pluie constante (à gauche) et une pluie variable spatialement et temporellement (à droite). En rouge sans modification de la topographie et en bleu avec.

importante du débit en surface se traduit d'une part par une augmentation des eaux entrant dans le système de drainage (voir figure 3.7 ainsi que paragraphe suivant), et d'autre part par la modification de l'exutoire du bassin versant. En effet, comme le montre la figure 3.8, plusieurs pixels « maison » sont situés quelques dizaines de mètres au nord de l'exutoire. Avec la modification de la topographie qui augmente l'altitude de ces pixels de 5 mètres, cette ligne de maisons crée une barrière artificielle qui empêche une partie de l'eau d'atteindre l'exutoire. Ainsi, l'eau de surface quitte le bassin versant par un ou plusieurs autres points.

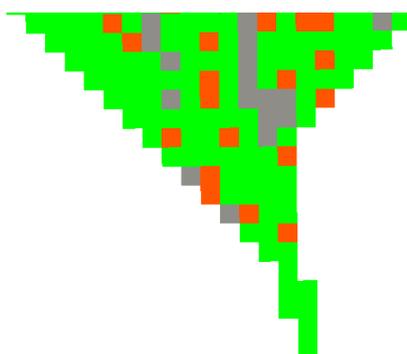


FIGURE 3.8 – Zoom sur l'exutoire du bassin versant de Villecresnes avec une résolution de 10 mètres.

La modification du comportement hydrologique du bassin versant par l'altération de l'altitude de certains pixels ne se traduit pas seulement par une modification des débits. La figure 3.9

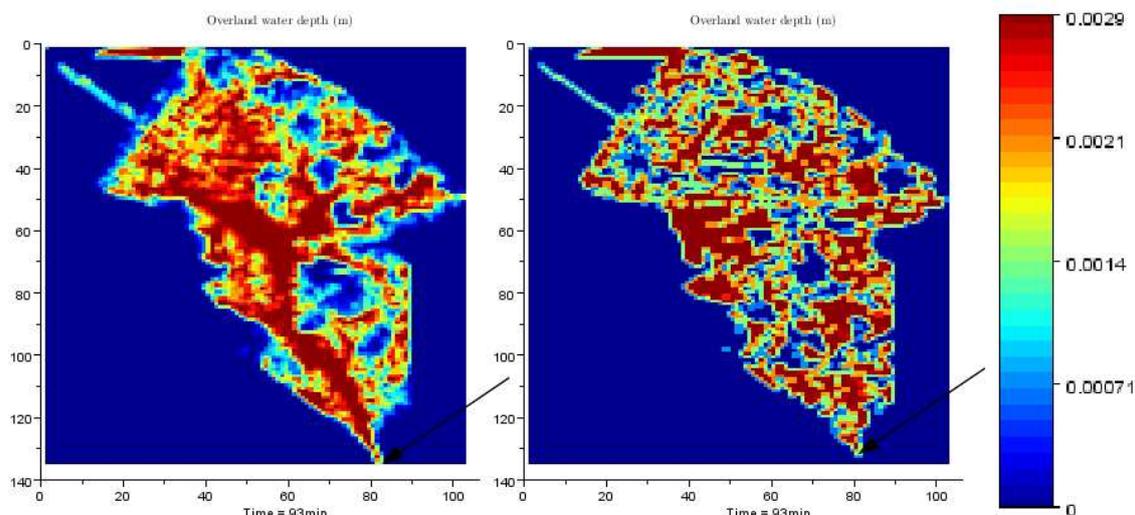


FIGURE 3.9 – Impact de la modification de la topographie sur les cartes de hauteur d’eau (à gauche sans, à droite avec) à la fin de l’événement pluvieux. Les hauteurs sont données en mètre, mais un seuil a été mis en place pour accentuer la variation de répartition des eaux.

présente les hauteurs d’eau à la fin de la pluie avec (à droite) et sans (à gauche) la modification de la topographie. Ces cartes montrent que la répartition des hauteurs d’eau se trouve très modifiée. En effet, la présence des routes et des maisons modifie la disposition des flaques d’eau (qui ne peuvent plus être sur des pixels de maison par exemple). Ainsi, l’eau ne suit plus la topographie naturelle pour s’accumuler principalement dans le fond du talweg mais s’accumule là où elle se retrouve piégée par les bâtiments.

L’analyse de ce genre de carte n’est pas aisée au premier abord. Une solution efficace pour permettre une analyse est d’utiliser des outils statistiques poussés tel que le permettent les analyses multifractales. La figure 3.10 présente la variation des paramètres α et c_1 au cours du temps. Les courbes rouge et bleue correspondent respectivement aux deux paramètres pour une topographie non modifiée, alors que les courbes jaune et verte montrent la variation de ces paramètres pour une topographie modifiée.

Pour rappel, le paramètre α traduit de la variabilité de la couche d’eau en surface d’un pixel à l’autre et le paramètre C_1 traduit lui le l’inhomogénéité de cette couche. En d’autres termes, cela signifie que pour un α égal à zéro, tous les pixels portent la même hauteur d’eau alors que pour sa valeur maximale ($\alpha = 2$) la variabilité d’un point à l’autre est maximale. En ce qui concerne le paramètre C_1 , lorsqu’il est maximum, la couche d’eau est constituée de flaques indépendantes les unes des autres, alors que pour un C_1 égal à zéro la couche d’eau recouvre l’ensemble de la surface analysée.

Ainsi, la modification de la topographie entraîne une légère augmentation de l’inhomogénéité (paramètre C_1) de la couche d’eau et une nette diminution de la variabilité (paramètre α) de celle-ci. Autrement dit, avec une modification de la topographie en accord avec les données de

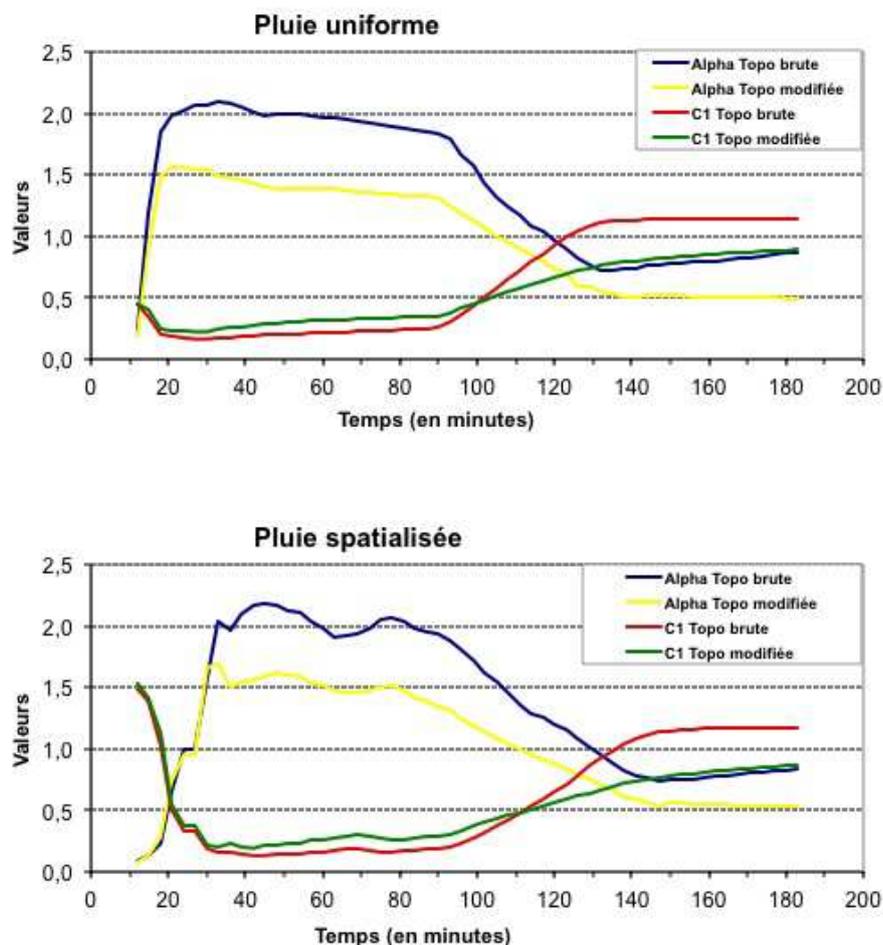


FIGURE 3.10 – Variation au cours du temps des paramètres α (en jaune avec une topographie modifiée et en bleu pour une topographie « brute ») et C_1 (en vert avec une topographie modifiée et en rouge pour une topographie « brute ») des hauteurs d'eau en surface. En haut, il s'agit de l'analyse des résultats obtenus avec la pluie uniforme et en bas avec la pluie spatialisée.

l'utilisation du sol, les flaques d'eau sont de surface plus réduites et de hauteurs plus constantes. Ce comportement peut être expliqué par le fait que la répartition de l'eau suit le réseau anthropique dans le cas de la topographie modifiée et est moins liée à la répartition des classes d'utilisation du sol naturelles.

En outre, la conductivité hydraulique a été fixée très basse ($K_h = 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$) dans le but de minimiser les processus d'infiltration pour mieux tester l'influence seule de la topographie. La figure 3.11 présente les singularités critiques γ_s qui sont calculées par l'équation 2.9 (page 44). Pour rappel, si l'on considère que la distribution en deux dimensions de la hauteur d'eau est représentée par des multifractales universelles, alors cette singularité critique sera proportionnelle à la singularité maximale définie par le niveau d'eau maximal que l'on peut observer sur

un pixel. Durant l'événement, c'est-à-dire entre 20 et 90 minutes de simulation, cette singularité critique reste plutôt stable et il n'y a pas de différence significative du comportement des γ_s pour les cas considérés ici. Cependant, à partir de la fin de l'événement, le scénario de topographie « brute » avec pluie uniforme (en orange) est celui qui donne l'augmentation la plus forte de la singularité critique, alors qu'elle est la plus faible dans le cas d'une topographie modifiée, et ce pour n'importe quel type de pluie.

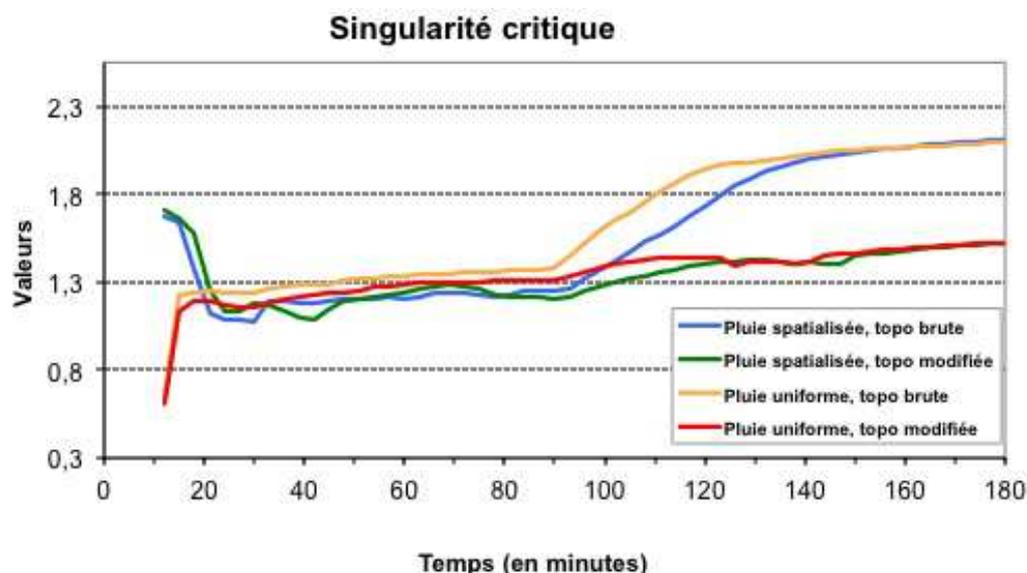


FIGURE 3.11 – Évolution temporelle de γ_s pour les paramètres UM estimés (figure 3.10 pour une topographie « brute » sous une pluie uniforme (en orange) et sous une pluie spatialisée (en bleu), aussi bien que pour une topographie modifiée (respectivement en rouge et en vert).

Cette modification, si elle montre bien que l'altération des données d'altitude en fonction des données d'utilisation du sol a un fort impact sur les différents débits et doit être prise en compte dans les calculs, présente cependant certains problèmes. En effet, une augmentation de 5 mètres comme il l'a été fait ici dans le cas de la modélisation d'événements extrêmes, implique que les pixels occupés par des bâtiments représentent également des blocs infranchissables de 5 mètres de haut. Or, les bâtiments constituent certes une barrière pour les écoulements d'eau, mais seulement tant que la hauteur d'eau considérée est inférieure au seuil qui sépare le sol du pas de la porte. Au-delà de cette hauteur, l'eau est susceptible de pénétrer dans le bâtiment par toutes les ouvertures qu'elle rencontre. Ce choix d'augmenter l'altitude des pixels « maison » de 5 mètres semble donc un peu élevé. Il devrait être plus judicieux de n'augmenter cette altitude par une trentaine de centimètres, hauteur assez classique des seuils de portes dans un quartier résidentiel comme celui modélisé ici.

Influence des paramètres de sol

La prise en compte des données du sol, quand elle sont présentes, est importante, surtout pour des bassins versants péri-urbains tels que celui de Villecresnes. En effet, une proportion importante des pixels du bassin versant sont occupés par des surfaces naturelles telles que les parcs, les jardins ou la forêt. Or, ces surfaces représentent des zones où l'infiltration joue un rôle important dans la répartition des eaux de pluies.

La mise en place du module de sol par Ichiba (2012)⁴ a permis de tester l'importance d'un module dédié aux processus d'infiltration. En effet, comme il l'a été montré dans la présentation des modules de Multi-Hydro, la prise en compte de l'infiltration dans le module de surface est assez sommaire. La figure 3.12 montre un exemple de l'évolution des quantités d'eau qui peuvent être remises à disposition pour les processus de ruissellement après avoir été infiltrées par le module de surface lors du pas de temps précédent. L'alternance de bandes traduisant des hauteurs d'eau plus ou moins importante dans la direction est-ouest est due au choix de l'orientation des tranches définies dans le module de sol et traduit du fonctionnement en « tranches » du module de sol. Dans le cas de Villecresnes, les pentes étant assez faibles, cette direction n'a que peu d'influence sur les résultats finaux (Ichiba, 2012).

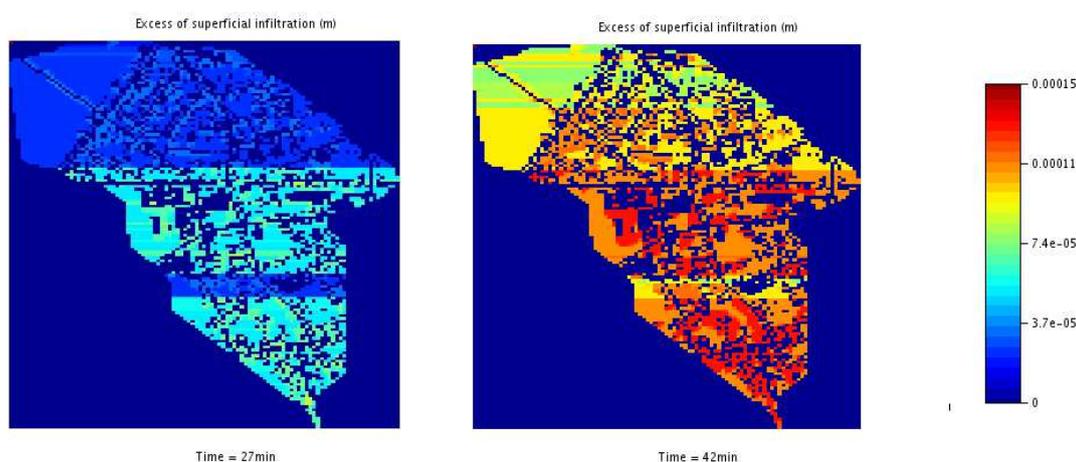


FIGURE 3.12 – Hauteur d'eau (en mètres) remise à disposition pour le ruissellement par le module de sol au bout de 27 minutes de simulation (à gauche) et 15 minutes plus tard (à droite).

Les paramètres d'infiltration ont également un impact sur la répartition des eaux de surface. Cette modification peut donc elle aussi être quantifiée par les analyses multifractales. Pour cette analyse, deux conductivités hydrauliques ont été testées pour le sol. La première est de 10^{-4} m/s et correspond à des sols assez sableux. La deuxième conductivité hydraulique utilisée est de l'ordre de 10^{-6} m/s et correspond à des sols plus argileux où l'eau a de plus en plus de difficultés

4. Stage de fin de master effectué sous mon encadrement entre Mars et Août 2012

à circuler. Ces deux valeurs correspondent aux bornes des types de sol qu'il est possible de rencontrer dans les environs de Villecresnes⁵.

Pour rappel, la dimension fractale D_f correspond à la pente de la droite obtenue sur un graphique log-log du nombre de pixels contenant de l'eau en fonction de l'échelle d'observation. Elle permet d'évaluer la répartition de l'eau sur la zone d'étude d'une manière globale.

Tout d'abord, la dimension fractale des hauteurs d'eau infiltrées (figure 3.13 en haut) montre que quelque soit la pluie et la conductivité hydraulique considérée, au delà de 40 minutes de simulation (ce qui correspond à la moitié de l'événement pluvieux), la répartition de l'eau n'évolue plus et atteint un palier pour $D_f = 1.8$. Ce palier traduit du fait qu'à partir de 40 minutes de simulation, la totalité des pixels pouvant infiltrer de l'eau en contiennent.

En ce qui concerne la lame d'eau en surface (figure 3.13, en bas), c'est-à-dire l'eau qui ruisselle, l'évolution de sa répartition est très dépendante de la conductivité hydraulique. Jusqu'à la fin de l'événement, c'est-à-dire jusqu'à 90 minutes de simulation, pour tous les cas on retrouve une augmentation de la dimension fractale puis ce plateau pour $D_f = 1.8$. Après la fin de l'événement, la dimension fractale diminue ce qui traduit de l'évacuation de l'eau de certains pixels. Dans le cas d'une conductivité hydraulique forte, la diminution de la dimension fractale est plutôt rapide pour atteindre un palier pour $D_f = 1.6$, ce qui correspond à la dimension fractale des surfaces imperméables. Ceci s'explique par le fait que l'eau sur les surface perméables est très vite infiltrée, alors que sur les surfaces imperméables elle doit ruisseler pour quitter chaque pixel, ce qui prend beaucoup plus de temps. Dans le cas d'une conductivité plus faible, l'eau des surfaces perméable met plus de temps à être infiltrée, d'où la diminution plus lente de la dimension fractale de la lame d'eau en surface.

Les résultats de la figure 3.14 montrent que le comportement hydrologique du bassin versant change selon la conductivité hydraulique choisie pour les pixels traduisant une surface naturelle au travers de l'évolution des paramètres α et C_1 déjà présentés plus haut. Dans le cas de la conductivité hydraulique la plus élevée, l'évolution de la répartition de l'eau en surface atteint un plateau dès la fin de la pluie (autour de 90 minutes de simulation), et ce pour les deux paramètres étudiés. Cela traduit le fait que la plus grande partie de l'eau atteint très rapidement son point final, c'est-à-dire qu'elle est rapidement infiltrée dans le sol. Ainsi, avec une conductivité assez forte, le bassin réagit très vite et atteint rapidement son état d'équilibre.

À l'inverse, avec une conductivité hydraulique plus faible, la répartition de l'eau ne se stabilise pas à la fin de l'événement. En effet, l'eau ne peut quasiment pas s'infiltrer et ruisselle progressivement jusqu'à l'exutoire. L'état hydrique du bassin versant continue donc à évoluer au cours du temps, jusqu'à ce que toute l'eau ait ruisselé jusqu'à son point de fuite du bassin versant.

5. Des cartes de pédologie sont disponible sur <http://infoterre.brgm.fr/viewer/>

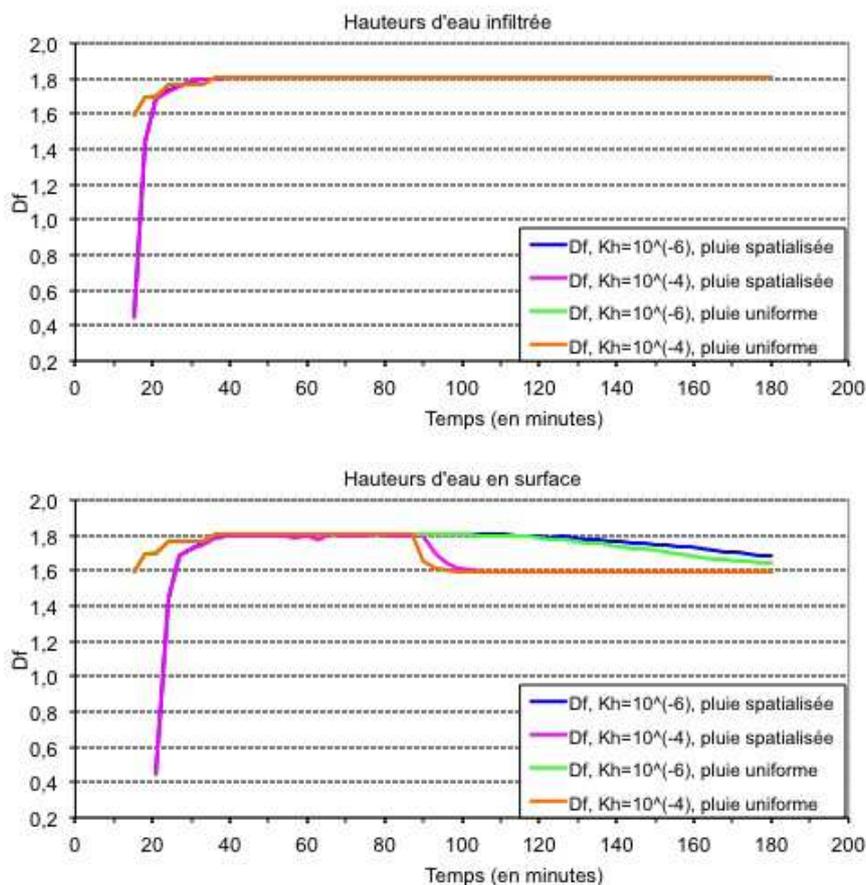


FIGURE 3.13 – Évolution au cours du temps de la dimension fractale (D_f) des hauteurs d'eau infiltrées (en haut) et restant en surface (en bas) pour chacune des conductivités hydrauliques (en $m.s^{-1}$) et chacun des scénarios de pluie. Le temps est donné en minutes.

Les résultats ci-dessus restent en accord avec le comportement global des singularités critiques γ_s qui sont cette fois-ci comparées aux singularités maximales γ_{max} . Les figures 3.15 et 3.17 montrent l'évolution temporelle des hauteurs maximales H_{max} obtenues par les simulations Multi-Hydro. Si l'on considère une analyse pour une résolution de 128×128 pixels (donc $\lambda = 128$), la singularité maximale peut être définie telle que :

$$\gamma_{max} = \log(H_{max}; 128) \quad (3.1)$$

L'évolution temporelle de la singularité maximale est donnée par les figures 3.16 et 3.18 (courbes bleues et vertes) en comparaison avec celle de la singularité critique γ_s (courbes oranges et rouges) qui a été translatée vers le bas de façon à correspondre avec la singularité maximale moyenne respective. Une telle translation des singularités correspond à une simple re-normalisation du champ d'origine. Durant l'événement (entre 20 et 90 minutes de simulation), et indépendamment du type de pluie, les singularités critiques sous-estiment largement les singu-

larités maximales γ_s dans le cas d'une conductivité hydraulique très faible. Après l'événement et jusque la fin de la simulation, les singularités critiques augmentent fortement, mais restent peu représentatives des singularités maximales. Ce comportement est directement lié à la non-stationnarité des paramètres multifractals (voir figure 3.14).

Au contraire, Dans le cas d'une conductivité hydraulique plus forte ($K_h = 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$), les processus d'infiltration se mettent en place et les simulations Multi-Hydro deviennent bien plus compatibles avec le comportement multifractal. Dans ce cas, l'évolution temporelle des singularités critiques γ_s , qui sont des indicateurs statistiques, reste très proche de l'évolution temporelle des singularités maximales, qui sont elles les résultats d'une modélisation physique distribuée (voir figures 3.16 et 3.18, courbes vertes et rouges).

Ces résultats n'ouvrent pas seulement de nouvelles perspectives pour l'évaluation du fonctionnement global de Multi-Hydro en tant que modèle (par exemple, un choix de paramètres appropriés pour le type d'utilisation du sol en regard de la résolution de modélisation), mais relancent également le cadre approprié pour étudier le problème de la résilience effective des systèmes de résilience aux inondations de façon indépendante de l'échelle. En effet, la stationnarité des paramètres multifractals (voir figure 3.14, en bas, et figure 3.13) coïncide avec la valeur bien définie de la singularité maximale la plus probable γ_s . Ainsi, en fixant une hauteur limite pour une échelle donnée, ainsi que la singularité maximale correspondante (voir équation 3.1), il est effectivement possible de déterminer un seuil de singularité critique γ_s comme étant un critère de résilience aux inondations pour cette échelle. De nombreux scénarios d'utilisation de mesures de résilience pourraient alors être simulés à l'aide de Multi-Hydro. Les scénarios qui aboutissent à des estimations stables de la valeur de γ_s assureront une résilience aux inondations pour le système entier et pour toutes les échelles.

Modifications locales et résilience face aux inondations

Dans le cadre du projet SMARTeST, il était intéressant de pouvoir évaluer les impacts des mesures de résilience prises localement sur le comportement hydrologique général du bassin versant. Sur le cas d'étude de Villecresnes, une zone semblait présenter une plus forte vulnérabilité aux risques d'inondation. En effet, sur le versant Est du talweg, un légère dépression dans la topographie provoque le stockage de l'eau en surface. Or, cette zone étant occupée par des habitations, il semble utile de protéger ce secteur. Ainsi, un scénario imaginé pour réduire les risques d'inondations a été virtuellement mis en place avec l'installation d'une barrière périmétrique comme le montre la figure 3.19.

Localement, la mise en place de cette barrière permet de réduire considérablement la hauteur d'eau pour le quartier protégé. Comme le montre la figure 3.20, en présence de la barrière, les pixels recouverts d'une plus grande hauteur d'eau (pixels en rouge, traduisant une hauteur d'eau autour d'une cinquantaine de centimètres pour la figure de gauche et d'une vingtaine pour la figure de droite) se trouvent en dehors de la zone protégée. Au sein de la zone protégée, la hauteur d'eau maximale est de près de 10 cm alors qu'avant la mise en place de la barrière, la hauteur d'eau maximale était de 50 cm. La mise en place de cette barrière permet donc d'améliorer la situation pour la zone protégée. L'augmentation des hauteurs d'eau sur le pourtour de cette zone

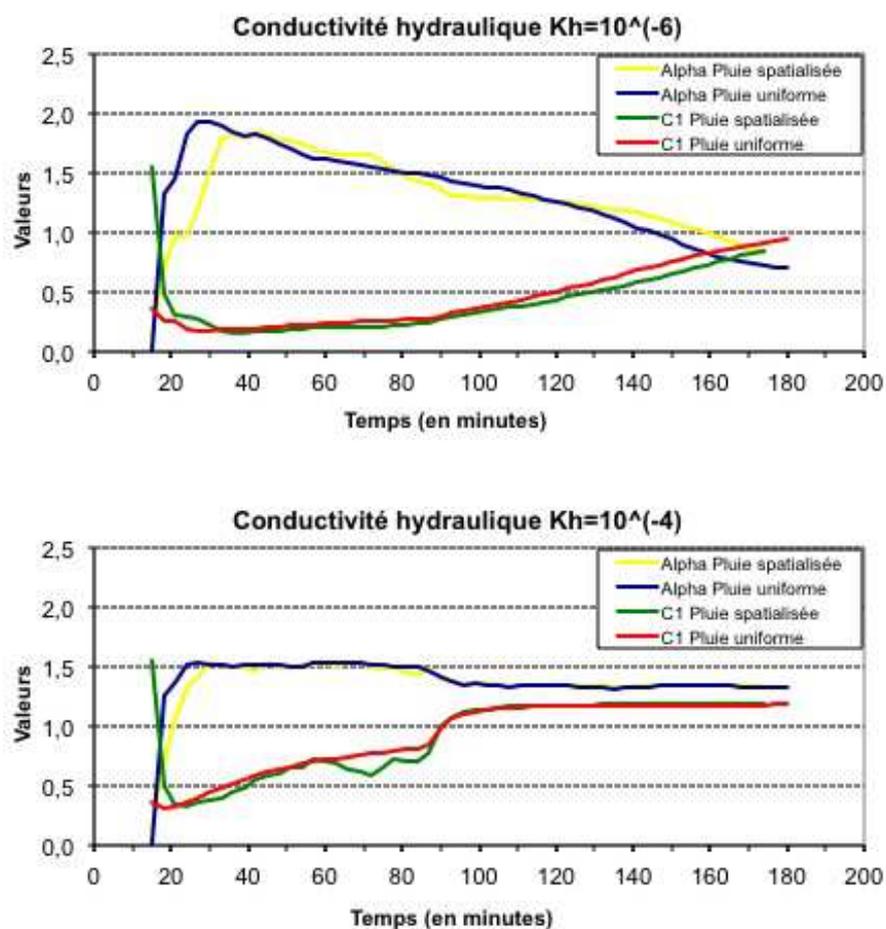


FIGURE 3.14 – Évolution au cours du temps des paramètres α et C_1 des hauteurs d'eau en surface pour une conductivité hydraulique de l'ordre de $10^{-6} m.s^{-1}$ en haut et de l'ordre de $10^{-4} m.s^{-1}$ en bas. Le temps est donné en minutes.

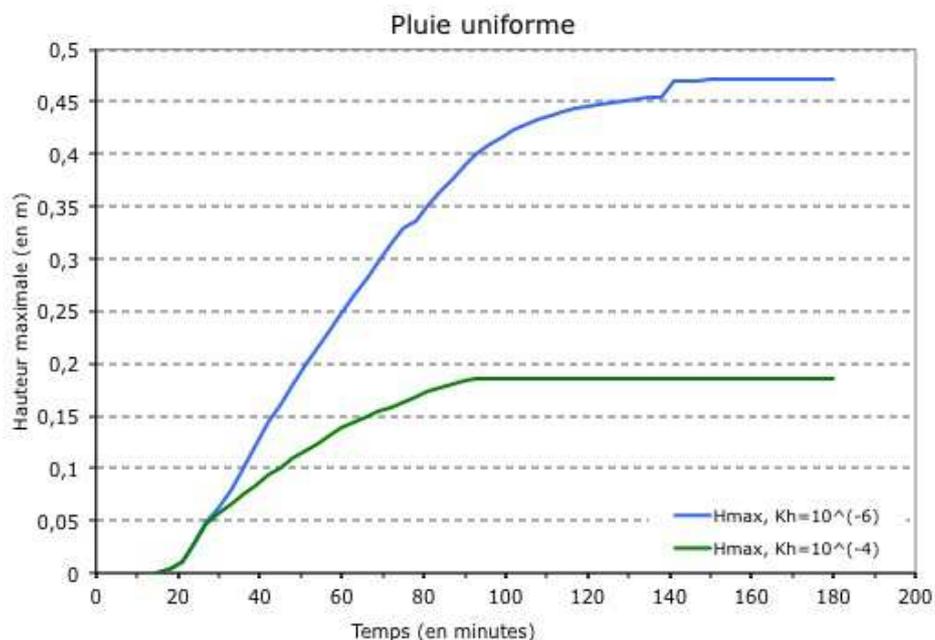


FIGURE 3.15 – Évolution au cours du temps (en minutes) des hauteurs maximales (en mètres) pour une pluie uniforme et des conductivités hydrauliques de 10^{-6} m.s^{-1} (en bleu) et de 10^{-4} m.s^{-1} (en vert).

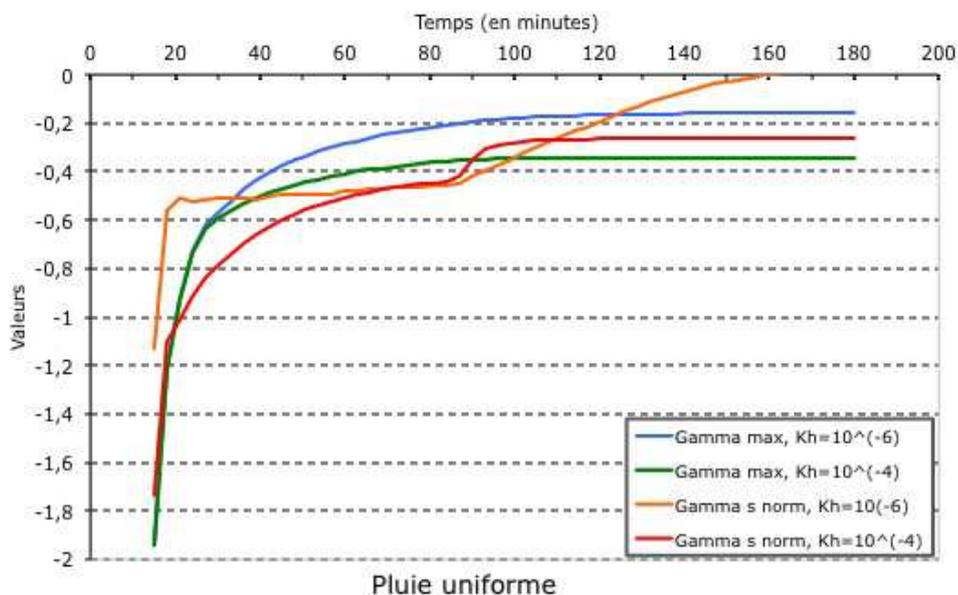


FIGURE 3.16 – Évolution au cours du temps (en minutes) des singularités maximales (en bleu et en vert) et normalisée (en orange et en rouge) pour une pluie uniforme et des conductivités hydrauliques de 10^{-6} m.s^{-1} (en bleu et en orange) et de 10^{-4} m.s^{-1} (en vert et en rouge).

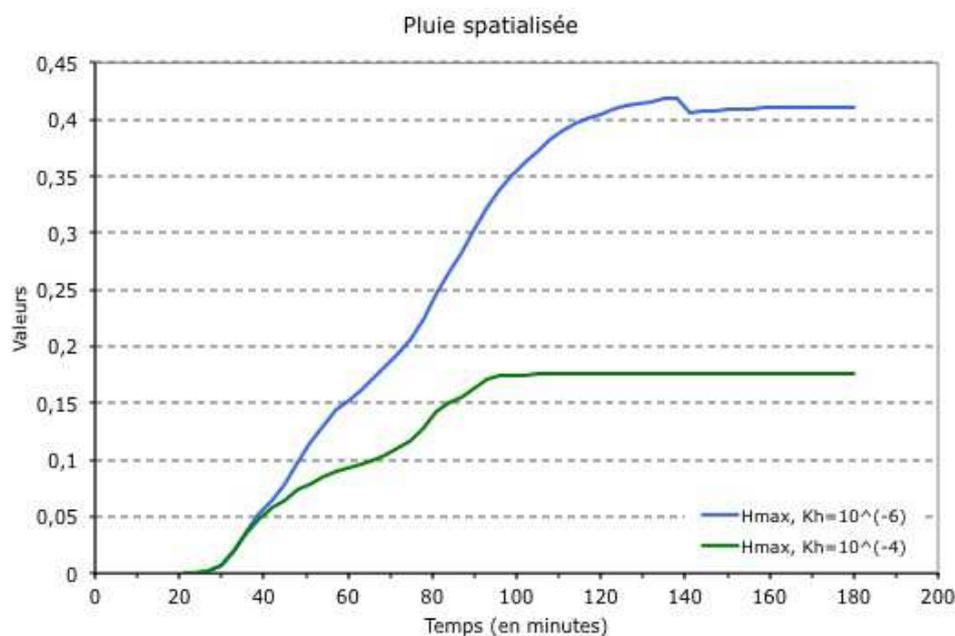


FIGURE 3.17 – Évolution au cours du temps (en minutes) des hauteurs maximales (en mètres) pour une pluie spatialisée et des conductivités hydrauliques de 10^{-6} m.s^{-1} (en bleu) et de 10^{-4} m.s^{-1} (en vert).

implique cependant de placer cette mesure de protection avec soin afin de ne pas augmenter les risques pour d'autres habitations par exemple.

Si l'on regarde les courbes de débits en surface (figure 3.21) et dans le réseau, les volumes transitant par les exutoires reste inchangés par la mise en place de cette barrière, ce qui indique que cette mesure de protection n'a pas d'impact majeur sur le comportement global du bassin versant.

Ainsi, cette méthode de protection permet localement de réduire les hauteurs d'eau sans pour autant avoir des répercussions sur la dynamique générale du bassin versant.

Une autre possibilité de réduction des eaux de ruissellement communément utilisée est la mise en place de noues. Sur le bassin versant de Villecresnes, il a été choisi comme scénario de mettre en place une noue avec une double utilisation. En effet, la grande surface occupée par les courts de tennis à proximité de la zone la plus vulnérable permettrait de mettre en place une zone de stockage temporaire des eaux de pluie en cas d'événements extrêmes tout en conservant son utilisation pour les activités sportives par temps sec.

Pour modéliser cela, l'altitude des courts de tennis est virtuellement diminuée de cinquante centimètres pour représenter la dépression de la noue. Les eaux de ruissellement s'écoulent naturellement dans celle-ci et seront évacuées par la suite par infiltration et évaporation.

La figure 3.22 montre l'influence d'une telle transformation sur le débit de surface. La diminution du pic de débit de $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$ montre que la noue remplit bien son rôle en écrétant les débits

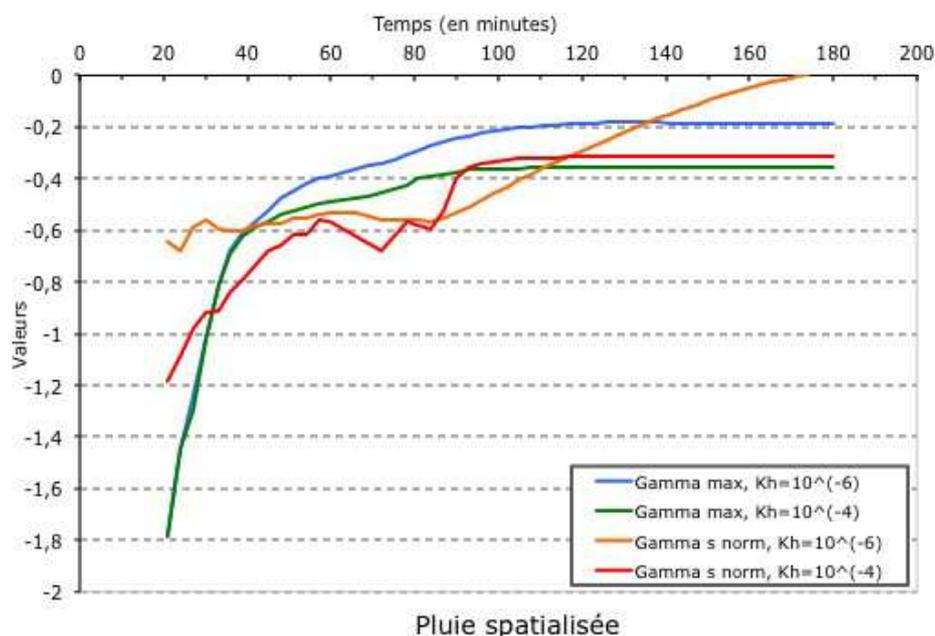


FIGURE 3.18 – Évolution au cours du temps (en minutes) des singularités maximales (en bleu et en vert) et normalisée (en orange et en rouge) pour une pluie spatialisée et des conductivités hydrauliques de $10^{-6} m.s^{-1}$ (en bleu et en orange) et de $10^{-4} m.s^{-1}$ (en vert et en rouge).

les plus importants lors de l'événement.

3.1.3 Conclusions

La synthèse de ce cas d'étude est donné par la figure 3.23 et permet de retrouver rapidement les principales caractéristiques et conclusions obtenues sur Villecresnes par l'utilisation de Multi-Hydro.

Ce premier cas d'étude a permis d'une part de tester les possibilités de Multi-Hydro en terme de modélisation de la réponse hydrologique d'un bassin versant typiquement péri-urbain. Ainsi, la sensibilité du modèle aux modifications de topographie, d'utilisation du sol et de gestion des eaux de ruissellement est clairement définie et montre que l'outil permet de représenter les impacts de l'implémentation de scénarios divers.

De plus, les analyses multifractales apportent la possibilité d'évaluer les résultats au travers des échelles et permettent ainsi de valider les résultats sur une gamme d'échelle donnée. Cela permet entre autre d'estimer le comportement global de la zone étudiée, sans se focaliser sur des valeurs spécifiques et pas toujours représentatives du champs analysé (hauteur d'eau en surface, infiltrées, ...) pour les échelles de la gamme analysée.

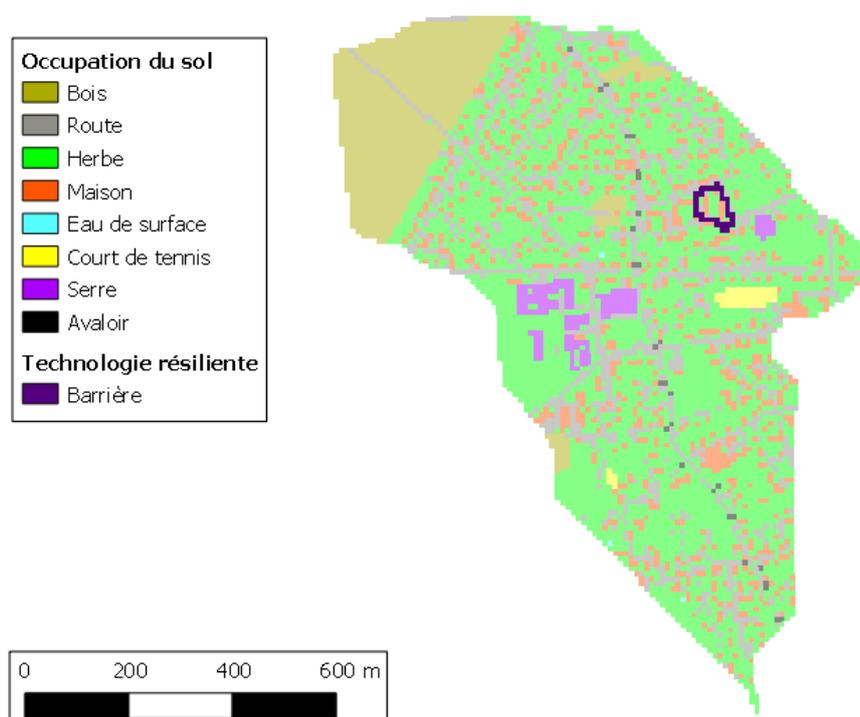


FIGURE 3.19 – Localisation de la barrière périmétrique virtuellement installée sur le bassin versant de Villecresnes.

3.2 Le bassin versant de Saint-Maur-des-Fossés, Val de Marne, France

3.2.1 Description

La mise en place du cas d'étude de Saint-Maur-des-Fossés a débuté avec la volonté de mettre en place une modélisation comportant une rivière. En effet, dans le module de surface, la présence de cours d'eau peut être prise en compte avec les difficultés liées au rapport entre la largeur de ceux-ci et la taille des pixels définies pour la modélisation qui ont été détaillées dans la section 2.2.1.

La zone initialement choisie correspond à un bassin versant délimité par l'IAURIF (Institut d'Aménagement et d'Urbanisme d'Ile de France⁶) et se situe à cheval entre les communes de Saint-Maur-des-Fossés et de Chennevières-sur-Marne (figure 3.24), communes séparées par la

6. <http://www.datar.gouv.fr/observatoire-des-territoires/fr/institut-damenagement-et-durbanisme-dile-de-france-iaurif>

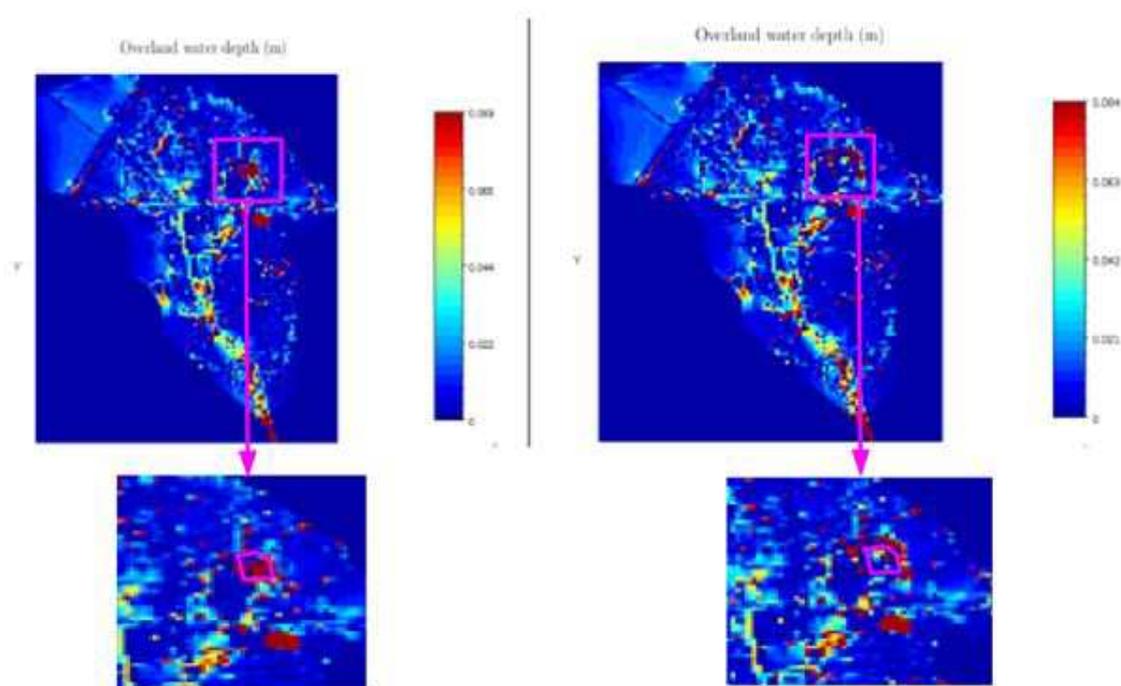


FIGURE 3.20 – Effet de la mise en place de la barrière périmétrique sur les hauteurs d'eau (en mètre) du quartier de Villetresnes, à gauche sans protection et à droite avec. Un seuil de visualisation a été mis en place à 9 cm bien que les hauteurs maximales soient de 50 cm dans le premier cas et de 20 cm dans le second.

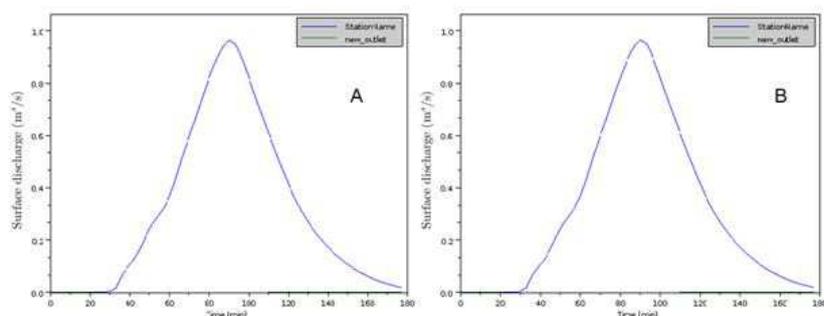


FIGURE 3.21 – Débit de ruissellement à l'exutoire du bassin versant de Villetresnes, avant (à gauche) et après (à droite) la mise en place d'une barrière périmétrique.

Marne. Cette délimitation permet d'avoir une portion de la rivière proche d'une station de mesure des débits ce qui permet donc de paramétrer facilement les conditions aux limites. Cependant, le choix de la zone s'est également basé sur les données du réseau de drainage et d'assainissement récupérées en 2009 auprès de la DSEA du Val de Marne et ces données étaient incomplètes et/ou imprécises. Or, récemment, de nombreuses communes du département (dont Saint-Maur-

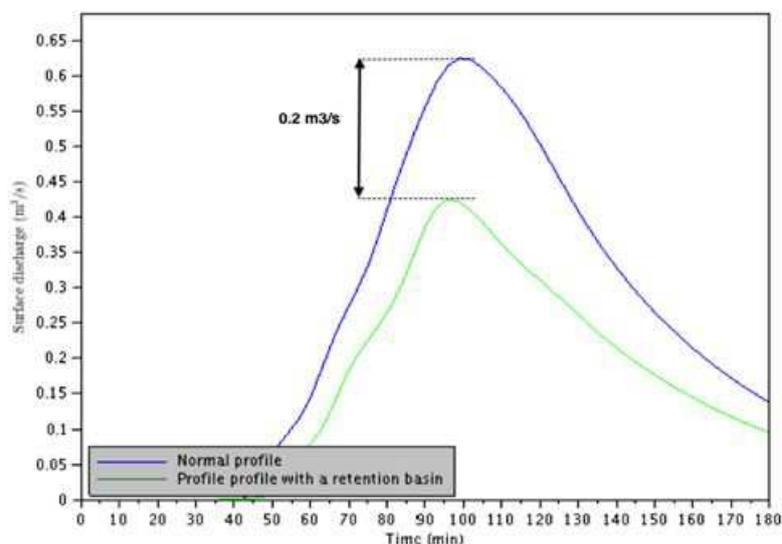


FIGURE 3.22 – Influence de la transformation des courts de tennis en noue sur le débit de ruissellement à l'exutoire du bassin versant de Villecresnes.

des-Fossés et Chennevière-sur-Marne) ont subi un audit de l'état du réseau d'assainissement. Au travers de cette étude, la cartographie du réseau a été affinée et corrigée. Il est alors apparu que la délimitation choisie n'est pas des plus judicieuses puisqu'elle ne suit pas les limites des bassins versants du réseau de drainage des eaux pluviales. Ainsi, la zone modélisée doit être ajustée pour tenir compte de ces nouvelles informations.

Cependant, les résultats de cet audit n'ayant été diffusés qu'en octobre dernier, les modélisations n'ont pas encore eu lieu et seuls des résultats préliminaires existent.

Le bassin versant étudié ici est assez large puisqu'il couvre près de 10 km². La partie Est de la zone, située sur la commune de Chennevières-sur-Marne, présente une pente importante caractéristique des coteaux. Le haut de ce dernier est à une altitude de 110 mètres et les berges de la rivière à une altitude de 33 mètres, ce qui donne une pente de près de 60%. À l'inverse, la partie Ouest de la zone, située sur la commune de Saint-Maur-des-Fossés est beaucoup plus plane avec une altitude maximale de 55 mètres, ce qui donne une pente de 10% (figure 3.25).

Cette zone est essentiellement une zone résidentielle, très urbanisée comme le montre la classification des utilisations du sol obtenues par le biais de MH-AssimTool (figure 3.26). Les bâtiments sont principalement des habitations individuelles parfois entourée d'un jardin ou d'une cour. Cependant, la résolution de 20 mètres choisie pour la simulation de cette zone (résolution qui est un compromis entre la taille de la zone modélisée et la précision disponible pour les données d'entrée), ainsi que la priorité donnée aux bâtiments sur les espaces verts pour l'attribution d'une classe de ruissellement à chaque pixel, ne permet pas toujours de faire ressortir la présence de ces espaces entre les bâtiments.

Le réseau routier est quant à lui bien développé de part et d'autre de la rivière. Ainsi, la

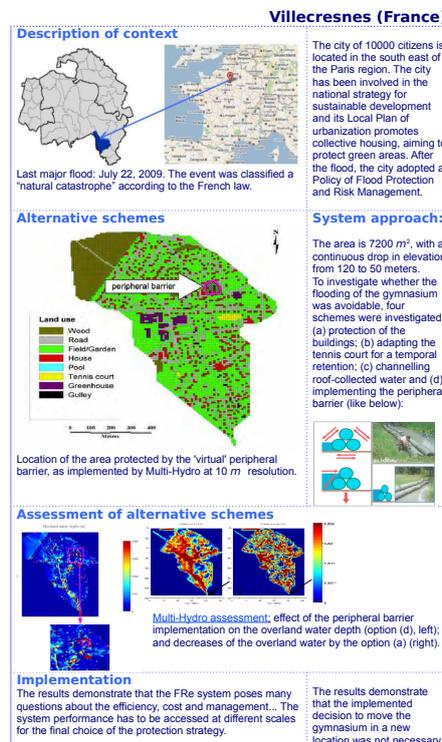


FIGURE 3.23 – Synthèse du cas d'étude de Villecresnes.

communication entre les deux rives se fait par le biais de ponts. Cependant, ces ponts ne sont pas pris en compte dans la modélisation de la zone. En effet, les ponts et la rivière sont deux éléments modélisés par le module de surface MHSM et il n'est pas possible qu'un pixel puisse appartenir à plusieurs classes de propriétés de surface. Il a semblé plus logique d'assurer la continuité du cours d'eau à la place de celle du réseau routier pour ne pas créer d'instabilités dues aux débits calculés dans la Marne. De plus, la contribution des surfaces des ponts au ruissellement de surface ne représente qu'une infime partie du ruissellement produit par rapport à toutes les autres surfaces de route.

Les données de pluies utilisées pour cette modélisation correspondent à un scénario basé sur la pluie constante utilisée sur Villecresnes, mais dont l'intensité à été doublée. Ainsi, c'est 44 millimètres de pluie qui s'abattent sur le domaine en 83 minutes d'évènement. Cela place cet évènement à une période de retour comprise entre 10 et 25 ans ⁷.

7. <http://www.meteo-paris.com/ile-de-france/climat.html>

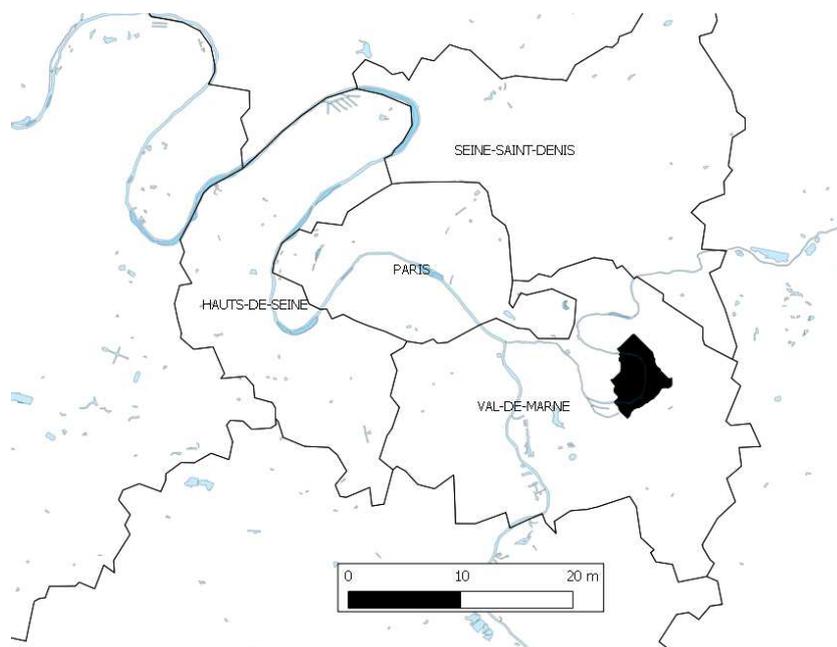


FIGURE 3.24 – Localisation du cas d'étude de Saint-Maur-des-Fossés, Val de Marne, France.

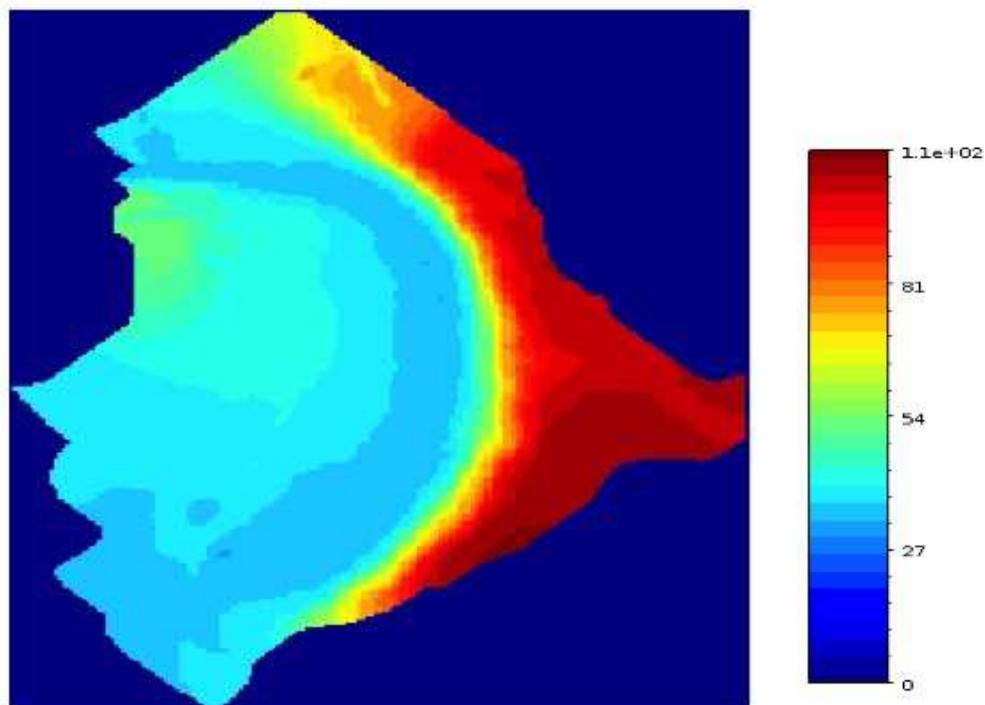


FIGURE 3.25 – Topographie du cas d'étude de Saint-Maur-des-Fossés. Les altitudes sont données en mètres.

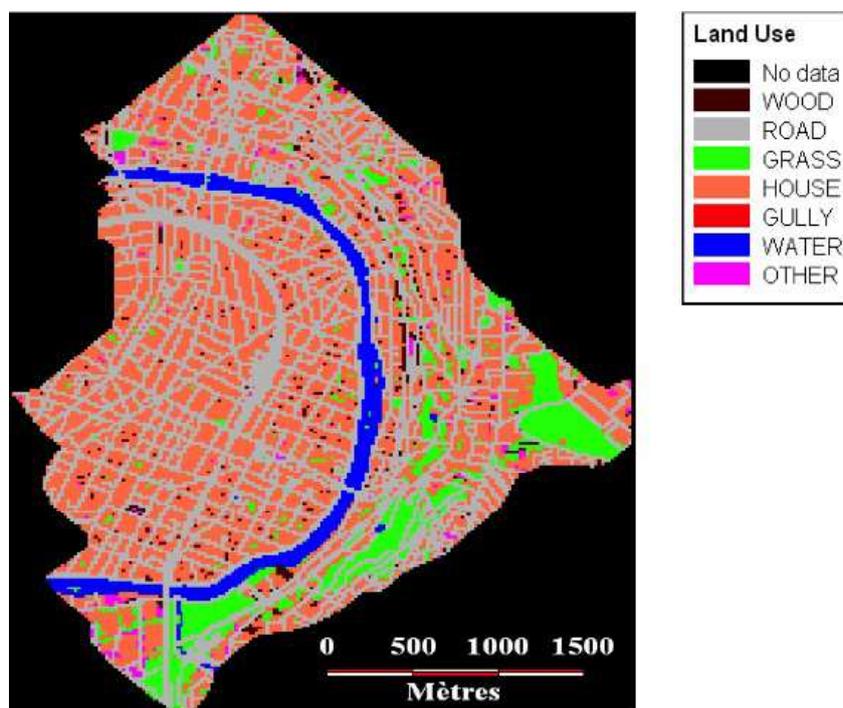


FIGURE 3.26 – Classification de l'utilisation du sol sur le cas d'étude de Saint-Maur-des-Fossés (avec la présence des ponts) obtenue avec MH-AssimTool pour une résolution de 20 mètres.

3.2.2 Résultats préliminaires

Les premières simulations effectuées sur ce cas d'étude permettent de tester la modification de la topographie en fonction de l'utilisation du sol. Dans un premier temps, la topographie est celle récupérée auprès de l'IGN, sans la moindre interpolation verticale, ce qui signifie que la résolution verticale est de 1 mètre. C'est ce qui crée les paliers que l'on observe sur la figure 3.27. Ces paliers sont d'autant plus visibles que la pente est faible, comme c'est le cas sur le versant Ouest ainsi qu'au niveau du plateau Est de la zone modélisée. Du fait de la pluie intense utilisée pour ces calculs et du manque de données concernant le réseau de drainage, les hauteurs d'eau calculées à proximité de la rivière dépassent largement les bords des rives.

La répartition de l'eau en surface, comme dans le cas de Villecresnes (voir section 3.1.2), est fortement modifiée lorsque la topographie est réajustée en fonction de l'utilisation du sol. La figure 3.28 montre cette répartition en fin d'évènement. La modification de la répartition de la lame d'eau est nettement plus importante sur le versant Ouest que sur le versant Est. Cela est dû aux fortes pentes de la partie Est qui provoquent des écoulements tellement rapides que l'eau ne reste pas en surface. De plus, ce versant est occupé en grande partie par des espaces verts qui ne sont pas influencés par l'altération des données d'altitude. De même, sur la partie Ouest de la zone, l'eau occupe une grande partie des rues situées au Sud-Ouest, ce qui correspond à la zone la plus basse.

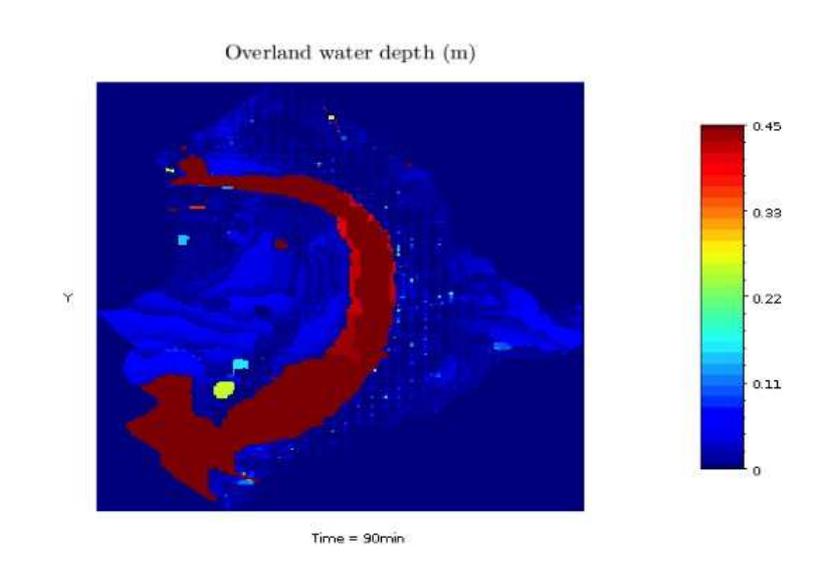


FIGURE 3.27 – Hauteurs d’eau (en mètres) à la fin de l’évènement sur le cas d’étude de Saint-Maur-des-Fossés sans modification de la topographie.

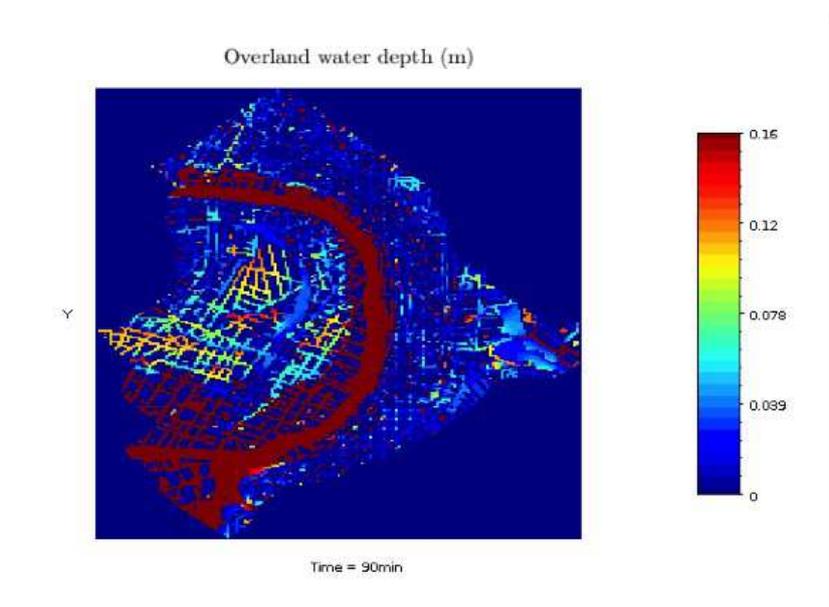


FIGURE 3.28 – Hauteurs d’eau (en mètres) à la fin de l’évènement sur le cas d’étude de Saint-Maur-des-Fossés avec modification de la topographie.

3.2.3 Perspectives

Le bassin étudié jusque là présente plusieurs inconvénients. D’une part, la surface importante du bassin ne permet pas une modélisation fine de la totalité de la zone. D’autre part, et c’est là le

problème majeur, avec les nouvelles données du réseau de drainage ainsi que les indications des personnes en charge de la gestion de ce réseau (DSEA 94), il est apparu que le bassin versant topographique utilisé ici est très différent du bassin versant déterminé par le réseau. Ainsi, toute la partie Nord de la zone modélisée reçoit des volumes importants provenant du voisinage Nord et Est. De plus, la partie Nord du réseau de la zone actuelle est très complexe et comporte des parties restant obscures.

Avec les nouvelles informations provenant de l'audit récemment fini sur les communes de Saint-Maur-des-Fossés, il est désormais possible de déterminer des zones à modéliser qui apporteront non seulement des indications sur les capacités de Multi-Hydro, mais aussi la possibilité de valider le modèle sur plusieurs cas d'étude aux propriétés variées. De plus, les campagnes de mesures ayant duré plusieurs mois, elles ont enregistré la réponse hydraulique de différentes parties du réseau pour divers événements d'intensités et de durées variables. Ainsi, les données fournies par la DSEA du Val-de-Marne devrait à terme permettre la validation de Multi-Hydro.

La première analyse de ces données nous ont permis de délimiter trois nouveaux bassins hydrologiques prenant en compte les limites du chevelu du réseau d'assainissement (voir carte globale 3.29). Nous avons déjà le débit aux exutoires de chacun de ces bassins pour un événement

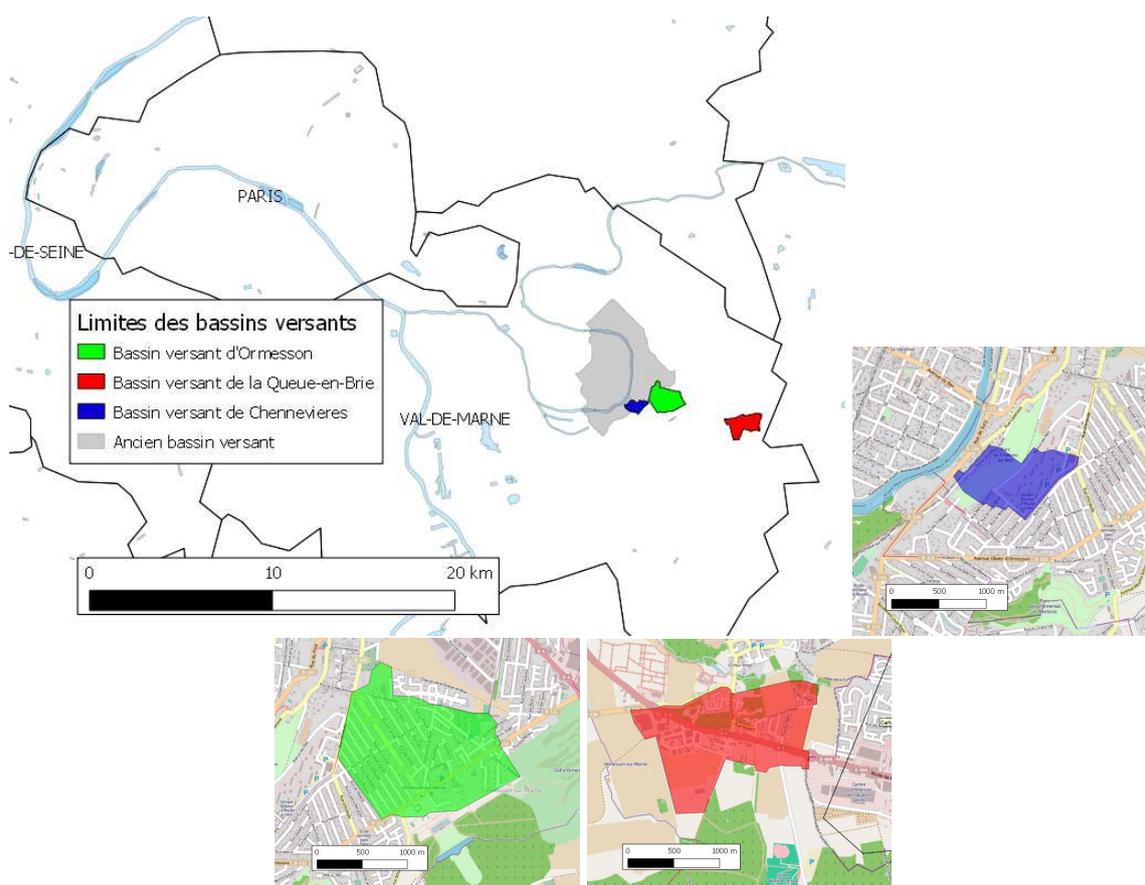


FIGURE 3.29 – Nouvelles limites des trois nouveaux bassins versants sur le département du Val de Marne et ancienne limite pour les études préliminaires.

daté au 30 Avril 2004. Comme dit précédemment, d'autres données seront disponibles et bientôt mises en place pour des événements plus récents. Ces bassins sont les suivants :

1. CHP3 : Ce bassin de petite taille, situé sur la commune de Chennevières-sur-Marne (vue à gauche dans la figure 3.29), est idéal pour tester Multi-Hydro avec des résolutions fines. Nous pourrions aisément tester le modèle avec des grilles de 1m. De plus, la proximité avec la rivière sera cruciale dans le comportement hydraulique de ce bassin. L'exutoire se situe sur la rue de Sucy, au niveau de la Marne.
2. OPR3 : Ce bassin est situé sur la commune d'Ormesson et est fortement urbanisée (vue au centre dans la figure 3.29). Son exutoire se trouve sur la partie sud du bassin versant, sur le chemin de Noiseau, au bout du boulevard séparant en deux la zone pavillonnaire principale de la commune. La forte urbanisation de cette zone nous permettra de voir précisément l'écoulement de surface et l'efficacité du réseau d'assainissement.
3. QBP3 : Le bassin versant de la Queue-en-Brie est plus dans une zone péri-urbaine (vue à droite dans la figure 3.29). L'infiltration sera importante dans ce bassin est sera intéressante à analyser avec les résultats du module gérant la saturation en eau dans les couches géologiques. Son exutoire se situe rue Jean Jaurès, au nord du bassin.

3.3 Le cas d'étude d'Heywood, banlieue de Manchester, Royaume-Uni

3.3.1 Description

Dans le contexte du projet SMARTeST, une collaboration a été mise en place avec l'équipe de l'université de Manchester dans le but d'employer Multi-Hydro sur l'un de leurs cas d'étude. Cette initiative a été lancée lors d'une séance de démonstration du modèle organisé à l'ENPC en février 2012. Lors de cet événement, plusieurs membres du projet sont venus se rendre compte par eux mêmes des capacités du modèle et ont fait part de leurs remarques concernant son utilisation.

Les cas d'études de l'équipe de Manchester sont tous situés sur la ville d'Heywood, localisée à une douzaine de kilomètres au nord de Manchester (figure 3.30). Les problèmes d'inondation de la ville, qui compte 28 000 habitants, avait déjà été étudiée par Bubel (2008) par le biais d'une analyse basée sur les SIG pour déterminer la possibilité de la réduction des risques liés aux inondations.

Durant la dernière décennie, la ville a connu quelques épisodes d'inondations importants dans des zones jusque là exemptes de tels problèmes. Ainsi, six quartiers de la ville ont été inondés lors des événements pluvieux d'août 2004 et de juillet 2006. Ces deux événements traduisent d'une pluie de 117 millimètres en 30 minutes (287 millimètres en 90 minutes) en 2004 et de 18 millimètres en 30 minutes (58 millimètres en 24 heures) en 2006.

La modélisation des problèmes d'inondation à Heywood avec Multi-Hydro s'est focalisée sur l'un de ces quartiers. Il s'agit d'un croisement entre Egerton Street et Wilton Grove. C'est un quartier résidentiel dont la partie médiane s'est trouvée couverte par une centaine de centimètres

d'eau lors de ces évènements. C'est une zone résidentielle où les maisons sont individuelles et entourées par une petite parcelle de jardin. Cet environnement est typique des zones résidentielles anglaises du début de la deuxième moitié du XX^{ème} siècle et nécessite une résolution assez fine pour représenter ses particularités.

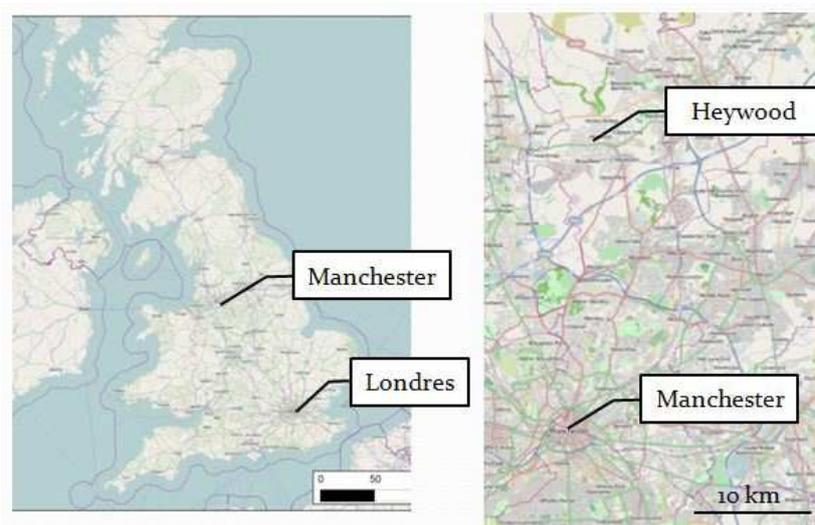


FIGURE 3.30 – Situation d'Heywood par rapport à Manchester, Royaume-Unis.

La topographie d'Heywood est relativement plane avec des pentes majoritairement comprises entre 5 et 7.5 %. La zone de Wilton Grove (figure 3.31) quant à elle forme une cuvette dont les altitudes vont de 115 à 125 mètres. Ainsi, la pente est de 2.5% entre la zone la plus basse et le coin Nord-Est de la zone et de 5% entre le centre et le coin Sud-Est.

Le sol, dans la zone de Wilton Grove, est très argileux, ce qui le rend très imperméable. Bien que la nature du sol n'ait pas fait l'objet d'une analyse poussée, la visite du quartier concerné par cette modélisation lors d'un stage à l'université de Manchester a donné les indications nécessaires à l'évaluation des paramètres de conductivité hydraulique. En effet, alors que les dernières précipitations dataient alors d'au moins trois semaines, le sol présentait encore de nombreuses flaques et était également très humide.

L'une des particularités de la zone étudiée est l'inutilité du système de drainage des eaux de surface lors des événements pluvieux importants. En effet, le système de drainage résulte à la fois du réseau unitaire passé et des évolutions dues à l'urbanisation galopante de la zone. Les canalisations étant de diamètres assez réduits, le refoulement des eaux drainées est assez fréquent. Ainsi, en cas de fortes pluies, des clapets permettent d'isoler le système, évitant tout risque de refoulement qui pourraient éventuellement aggraver la situation.

D'un point de vue hydrologique, la zone étudiée n'est pas indépendante de son voisinage. La zone de Wilton Grove implique donc la nécessité à la fois d'une modélisation à grande échelle pour évaluer les différents flux latéraux ayant lieu autour du quartier, ainsi qu'une modélisation à plus petite échelle qui permettra d'affiner et de mieux comprendre localement quels sont les

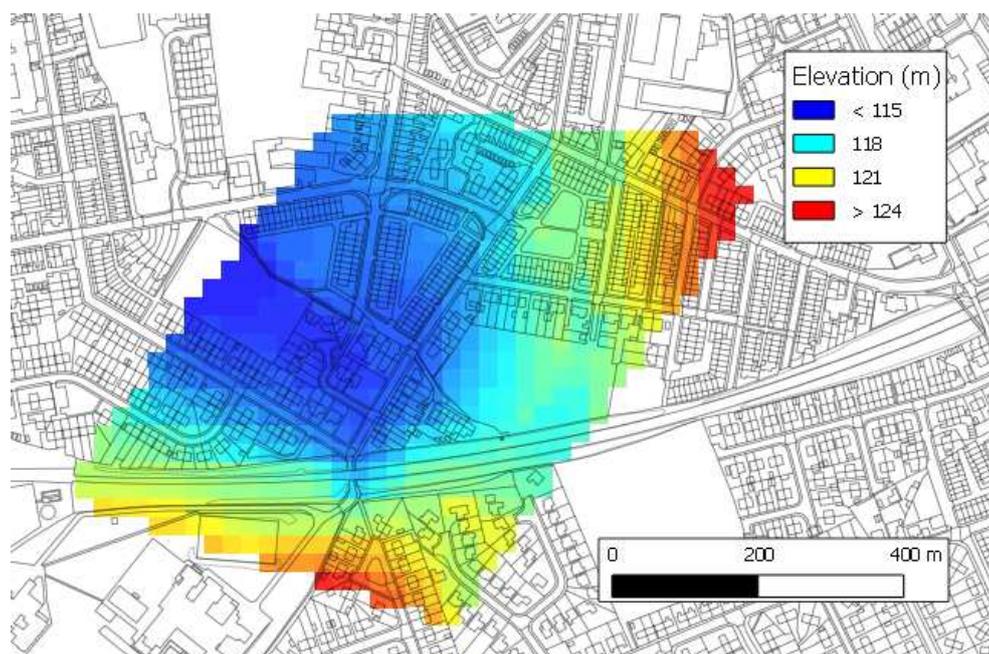


FIGURE 3.31 – Topographie de la zone d’Egerton Street et Wilton Grove. Il s’agit ici des données d’élévation telles qu’elles sont utilisées dans Multi-Hydro, c’est-à-dire avec une résolution horizontale de 15 mètres.

raisons de ces inondations. De plus, une partie de la problématique locale est de trouver une solution pour protéger les habitations de ces inondations.

Le travail de modélisation sur Egerton Street s’est déroulé en deux temps. Tout d’abord, lors de la mise en place du cas d’étude, les efforts se sont focalisés sur la rue concernée avec une résolution de l’ordre du mètre (figure 3.32) pour évaluer l’effet de la mise en place de barrières en travers de la rue dans le but de réduire l’importance de l’inondation. Par la suite, les études se sont plutôt orientées sur le quartier environnant pour évaluer l’impact de la mise en place d’autres mesures de protection. Pour cela, la résolution a été descendue à 2 mètres pour gagner en temps de calcul mais en conservant assez de précision dans les résultats. Dans les deux cas, une zone plus grande, incluant les domaines à fine résolution et modélisée avec une résolution de 15 mètres, a permis d’évaluer les flux latéraux pouvant influencer les hauteurs d’eau calculées.

Les données de pluie utilisées pour ces modélisations sont issues des enregistrements radar obtenues par le système NIMROD géré par Met Office⁸ (l’équivalent anglais de Météo France) pour l’évènement du 3 août 2004. Seule la variabilité temporelle a été conservée de cet enregistrement puisque la zone n’est couverte que par un seul pixel radar. La totalité de l’évènement n’a de plus pas été enregistré, ce qui fait que seule la période entre 8h20 et 10h du matin n’a pu être utilisée. La quantité de pluie modélisée est de 58.5 millimètres en 2 heures (figure 3.33), ce qui est bien loin des 117 millimètres en 30 minutes réellement tombés ce jour là.

8. http://badc.nerc.ac.uk/view/badc.nerc.ac.uk__ATOM__dataent_nimrod

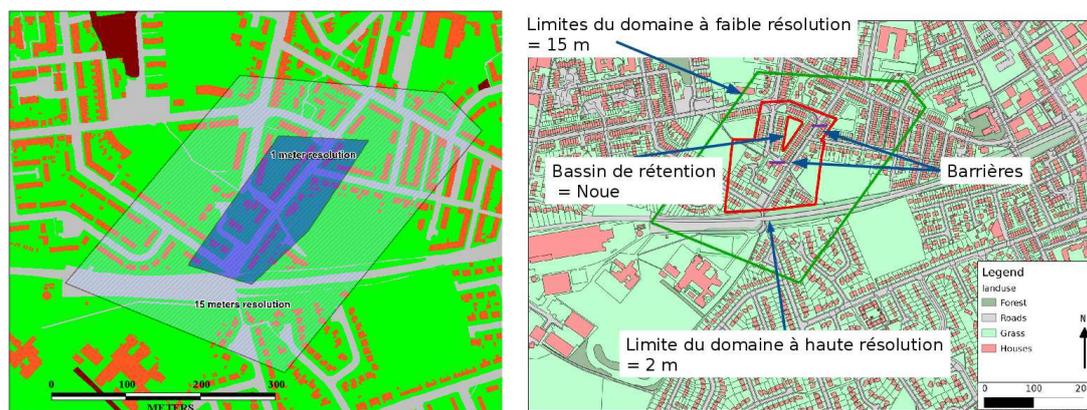


FIGURE 3.32 – Localisation des limites du cas d'étude d'Heywood pour le premier scénario (à gauche) et pour les trois scénarios suivants (à droite).

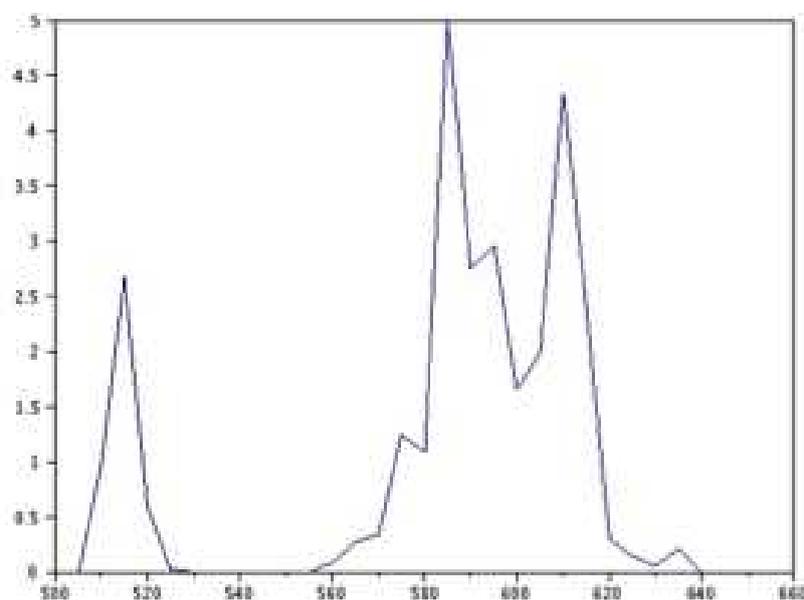


FIGURE 3.33 – Evolution au cours du temps (en minutes) de l'intensité de la pluie (en mm/h) modélisée sur la zone de Wilton Grove.

3.3.2 Résultats

Hydrologie

La mise en place d'une modélisation à 15 mètres sur une zone plus large et incluant le bassin versant de la zone a permis de voir l'évolution des flux d'eau pour chacun des pixels de 15 mètres. La carte présentée sur la figure 3.34 montre la couche d'eau présente sur le domaine à la fin de l'évènement pluvieux.

Les hauteurs d'eau vont de quelques centimètres à près de 30 centimètres. Même s'il n'est

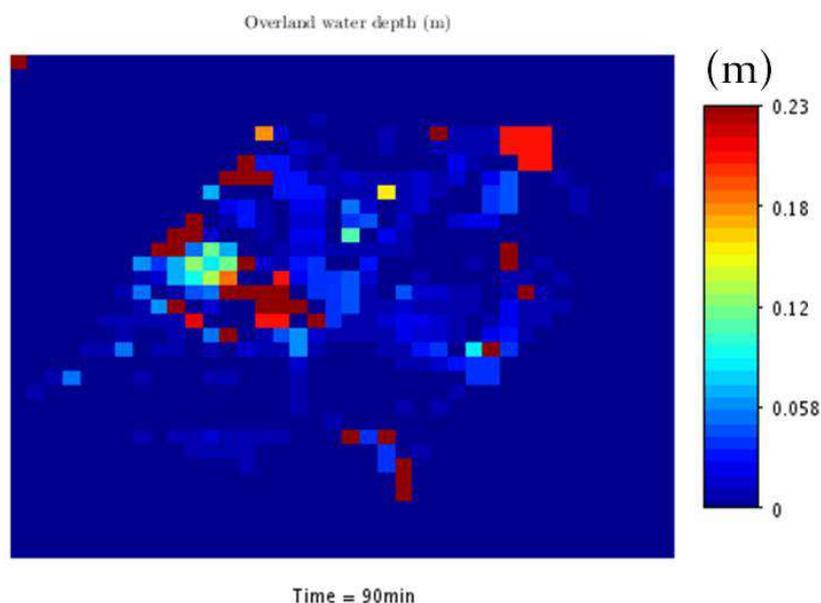


FIGURE 3.34 – Carte des hauteurs d’eau sur la zone d’Egerton Street - Wilton Grove avec une résolution de calcul de 15 mètres

pas possible de distinguer de détails sur cette carte, la zone centrale avec les hauteurs les plus élevées (en rouge) est identifiable comme étant au niveau du carrefour entre Egerton Street et Wilton Grove. L’analyse des cartes au cours du temps associée à la correspondance entre les zones d’études à 15 mètres et à 1 mètre permet de définir le débit des flux latéraux alimentant la zone à fine résolution. La figure 3.35 montre l’évolution de ce débit au court du temps. Entre l’analyse des cartes et la visite du terrain avec les personnes connaissant la problématique locale, il a été possible de déterminer que la majeure partie de l’eau inondant Wilton Grove descendait par le nord de la rue.

La modélisation avec une résolution de 1 mètre permet de déterminer que la zone la plus vulnérable de la rue se trouve une dizaine de mètres au sud du croisement entre Wilton Grove et Egerton Street. La figure 3.36 montre que ce carrefour est inondé par 1,20 mètres d’eau. Or les témoignages recueillis par le responsable local du cas d’étude affirment que les maisons à cet endroit là ont été inondées par environ un mètre d’eau lors d’événements d’intensité similaires à celui modélisé. Ces résultats, même s’ils ne remplacent pas une validation en bonne et due forme, indiquent que le modèle est à même de représenter les événements importants conduisant à une inondation en milieu péri-urbain, et ce en utilisant un changement d’échelle pour l’évaluation des conditions aux limites.

Premier scénario de protection : deux barrières dans Wilton Grove

Le premier scénario envisagé par les responsables locaux du cas d’étude est de mettre en place deux barrières dans Wilton Grove dans le but de barrer la route à l’eau provenant du nord

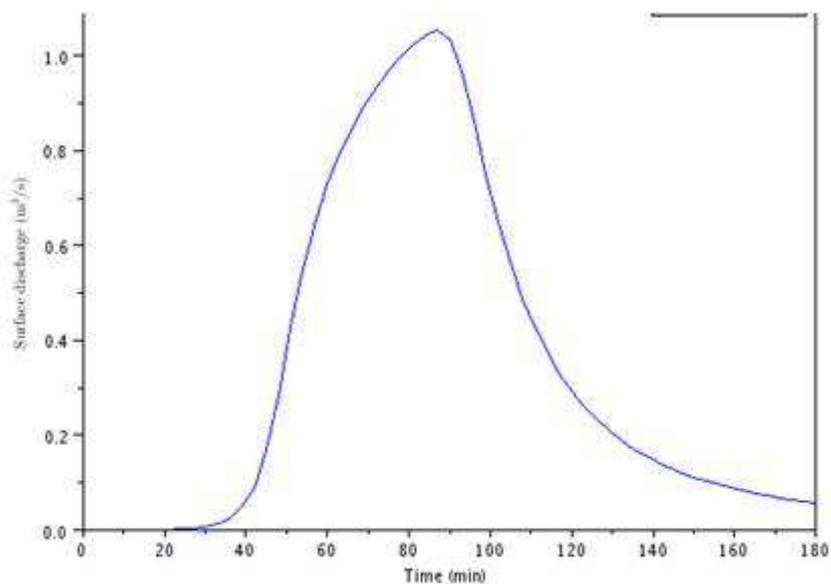


FIGURE 3.35 – Débit (en $m^3.s^{-1}$) défini par la modélisation à 15 mètres pour les flux latéraux des modélisation à plus fine résolution.

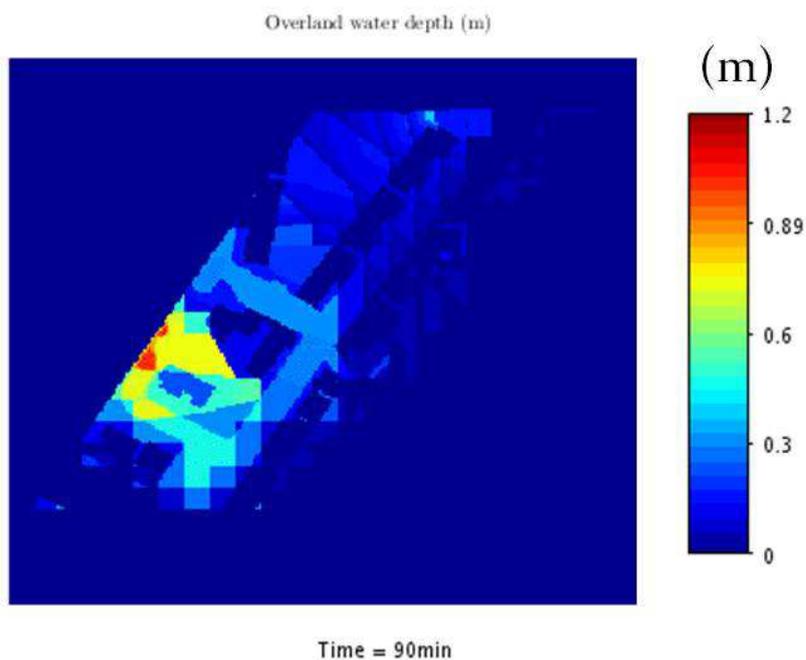


FIGURE 3.36 – Carte de hauteur d'eau dans Wilton Grove en fin d'événement avec une résolution de calcul de 1 mètre.

et du sud de la rue. Ces deux barrières doivent être situées en travers de la rue au nord et au sud.

La figure 3.37 montre les hauteurs d'eau résultantes de la mise en place de ces deux barrières

à la fin de l'événement pluvieux. La première barrière, située au nord de la rue (zone 1) remplit bien son rôle en empêchant les eaux de ruissellement provenant du nord d'entrer dans la rue. Cependant, en amont de cette barrière, la rétention de l'eau sur une soixantaine de centimètres ne fait que déplacer le problème. De plus, du fait de la disposition des maisons dans le quartier, c'est-à-dire isolées les unes des autres par un petit jardin, l'eau passe entre celles-ci pour s'écouler vers la zone 3.

La barrière sud (zone 2) quant à elle n'a pas réellement d'efficacité pour bloquer les flux d'eau.

La hauteur d'eau dans la zone 3 est au maximum de 1,10 mètres, ce qui n'est qu'une faible diminution par rapport aux 1,20 mètres observés avant la mise en place des barrières. Ce scénario de protection ne semble donc pas être la meilleure solution pour protéger les maisons du quartier. Pour pouvoir tester d'autres scénarios, il est nécessaire de passer à une vision plus large du quartier.

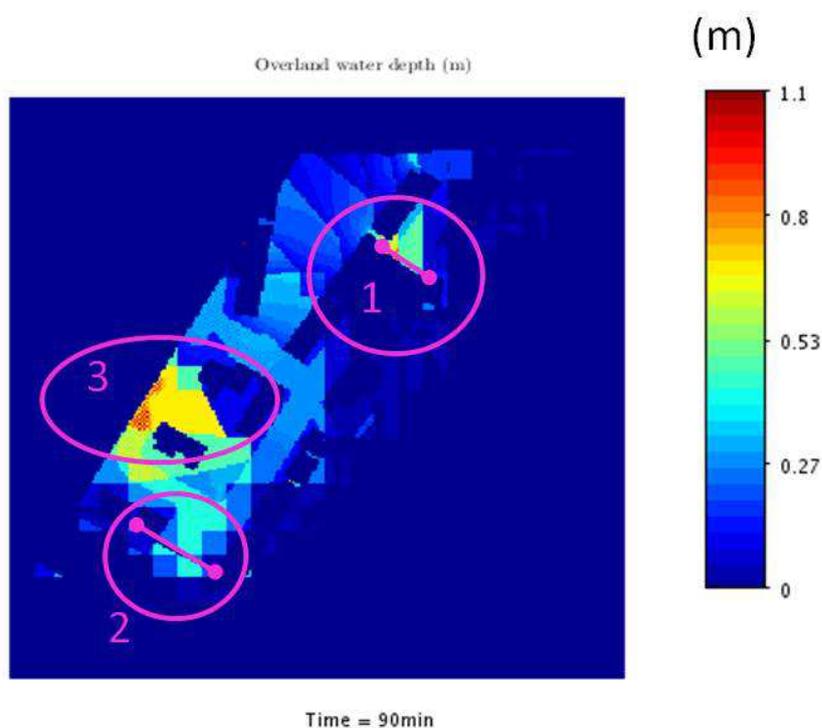


FIGURE 3.37 – Hauteur d'eau à la fin de l'événement après installation de deux barrières sur Wilton Grove (calculs effectués avec une résolution de 1 mètre).

Deuxième scénario de protection : une barrière dans Wilton Grove et une barrière dans Egerton Street

Compte tenu de la disposition des bâtiments dans le quartier et les résultats du premier scénario, la disposition des barrières a été repensée. Cette fois, le but de ces barrières n'est plus de

stopper l'eau dans la rue, mais de la rediriger vers l'espace vert du sud de la zone en passant par le terrain non construit entre Wilton Grove et Egerton Street (zone en forme de triangle). Pour cela, la barrière nord est placée un peu plus au nord avec un angle d'une trentaine de degrés par rapport à l'axe de la rue. La barrière sud est elle déplacée dans Egerton Street, elle aussi avec un angle d'une trentaine de degrés par rapport à l'axe de la rue.

La figure 3.38 montre les hauteurs d'eau en fin d'événement après la mise en place des barrières (représentées par les traits rose) avec cette nouvelle disposition. L'eau monte à environ 30 centimètres dans Egerton Street et à près de 80 centimètres dans l'espace vert situé à l'ouest de la zone modélisée.

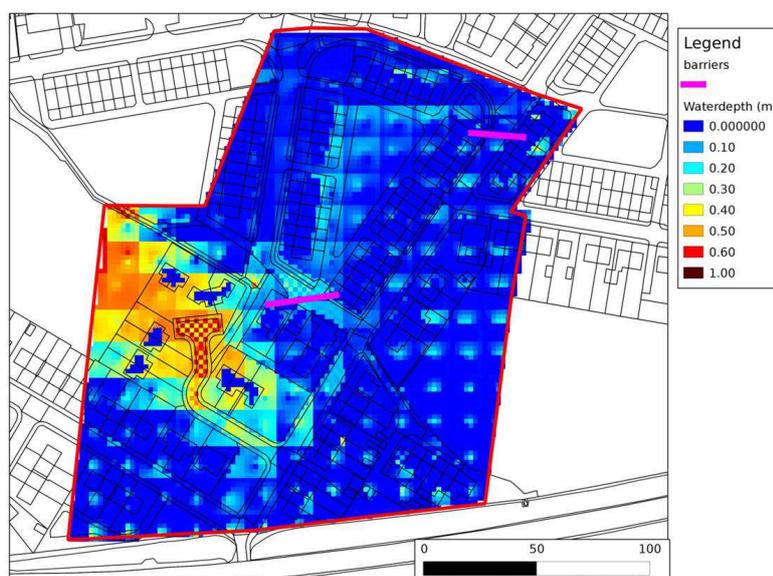


FIGURE 3.38 – Hauteur d'eau à la fin de l'événement après installation d'une barrière sur Wilton Grove et d'une autre sur Egerton Street (calculs effectués avec une résolution de 2 mètres).

Troisième scénario de protection : une noue de 1,50 m de profond

Une autre possibilité pour limiter l'ampleur de l'inondation est d'employer une méthode alternative telle que la mise en place d'une noue. Compte tenu des volumes d'eau mis en jeu dans ce cas d'étude, il a été choisi de mettre en place une noue de 1,50 mètres de profondeur au niveau de l'espace vert triangulaire se situant entre Egerton Street et Wilton Grove.

La carte des hauteurs d'eau (figure 3.39) montre l'état de la zone d'étude à la fin de l'événement. Pour permettre la comparaison avec les scénarios précédent, au niveau de la noue, la hauteur d'eau est corrigée par la modification de la topographie inhérente à la mise en place de la noue. Ainsi, pour une hauteur d'eau inférieure à la profondeur de la noue, les hauteurs d'eau sur la zone seront indiquées comme nulles. Cela signifie donc que les hauteurs d'eau apparaissant comme positives sur la zone de la noue correspondent à un débordement de celle-ci.

Les hauteurs d'eau sont au maximum de 20 centimètres dans Egerton Street et de 50 centimètres dans l'espace vert de l'ouest de la zone modélisée. Cela représente une diminution de près de 50% des hauteurs initialement calculées pour ces endroits, ce qui traduit de l'efficacité de la noue pour réduire l'ampleur de l'inondation.

Cependant, compte tenu de la localisation un peu décalée de la noue par rapport à l'axe de Wilton Grove où une grande partie de l'eau transite, il semble que l'utilisation de cette noue ne soit pas optimale.

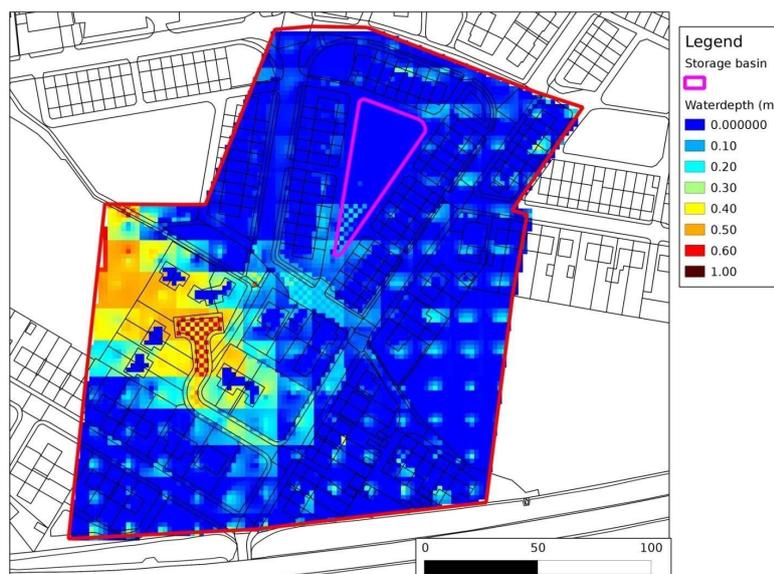


FIGURE 3.39 – Hauteur d'eau à la fin de l'évènement après installation d'une noue de 1,50 mètre de profond entre Wilton Grove et Egerton Street (calculs effectués avec une résolution de 2 mètres).

Quatrième scénario de protection : association de barrières et d'une noue de 50 cm de profond

D'après les résultats du scénario précédent, une partie de la noue n'est pas utilisée par le stockage des eaux de ruissellement. Pour pallier à l'écoulement de ces eaux par Wilton Grove, l'idée est donc maintenant d'associer les deux derniers scénarios : deux barrières installées au Nord de Wilton Grove et dans Egerton Street, et une noue installée entre ces deux rues avec une profondeur cette fois-ci de 50 centimètres seulement.

Les résultats donnés par la modélisation (figure 3.40) montrent des hauteurs d'eau autour d'une vingtaine de centimètres dans Egerton Street et de 55 centimètres dans l'espace vert de l'ouest de la zone. Ces résultats sont très proches de ceux obtenus par le scénario précédent (une seule noue de 1,50 mètres de profond).

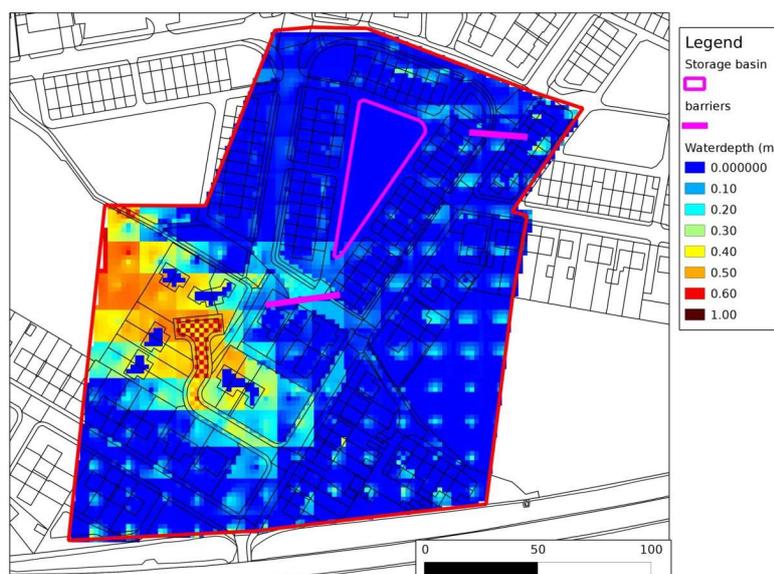


FIGURE 3.40 – Hauteur d’eau à la fin de l’évènement après installation d’une noue de 50 centimètre de profond et de deux barrières sur Wilton Grove et Egerton Street (calculs effectués avec une résolution de 2 mètres).

3.3.3 Conclusions

Les résultats des quatre scénarios (dont les principales caractéristiques sont données par la figure 3.41 appliqués sur le cas d’étude de Wilton Grove à Heywood ont permis plusieurs choses.

D’une part, la modélisation avec une résolution spatiale de 1 ou 2 mètres permet de simuler les écoulements d’eau en surface avec assez de précision pour prendre en compte des modifications de petites tailles et assez précises telles que la mise en place de barrières entre certaines habitations. Pour permettre une modélisation aussi fine tout en conservant des temps de calculs qui ne soient pas rédhitoires à la multiplication de scénarios, la réduction de la surface couverte par la modélisation est impérative. Ainsi, la détermination des conditions aux limites de la zone modélisée à 1 ou 2 mètres de résolution par une modélisation plus large à faible résolution (15 mètres) semble être une solution efficace.

D’autre part, l’emploi de Multi-Hydro pour tester des scénarios de mise en place de mesure de protection contre les inondations a permis tout d’abord d’écarter une première solution inefficace, puis d’en évaluer deux autres comme ayant des conséquences similaires et acceptables au vu des objectifs de la réduction des risques.

Cependant, il reste évident que d’autres paramètres doivent entrer en ligne de compte pour l’évaluation des mesures de protection contre les inondations. En effet, le coût lié à l’installation des barrières ou de la noue, leur facilité de mise en place et leur entretien sont des paramètres indispensables à la décision finale qui ne sont pas pris en compte dans un outil tels que Multi-Hydro.

3.4 D'autres applications de Multi-Hydro

En parallèle des études ci-dessus réalisées dans le cadre du projet SMARTeST, Multi-Hydro a également été mis en place sur des cas provenant d'autres projets. Ces cas d'études ont chacun apporté des indications sur les capacités du modèle à prendre en compte certains détails de l'hydrologie urbaine.

Le premier cas d'étude a été mis en place durant un stage scientifique de l'École des Ponts ParisTech dont j'ai participé à l'encadrement. Jean-Baptiste Abbes a alors pu comparer des mesures in situ avec les résultats des modélisations effectuées avec Multi-Hydro. Il s'agit d'un bassin versant situé au nord de la frontière entre la Seine-Saint-Denis et la Seine-et-Marne. Ces résultats ont fait l'objet d'un article soumis récemment à l'Urban Water Journal (voir annexe B).

Le deuxième cas d'étude, s'il n'a pas encore permis de donner des résultats, a permis de réaliser le besoin d'un certain nombre d'améliorations sur Multi-Hydro. Il s'agit de l'un des secteurs situé à Rotterdam, aux Pays-Bas, qui entrent dans les cas d'études du projet Raingain. Il a été mis en place avec la collaboration de l'équipe de TU Delft.

3.4.1 Le bassin du Loup, Seine-Saint-Denis, France

Description

Le bassin du Loup est situé à cheval sur les communes de Villepinte, en Seine-Saint-Denis et de Mitry-Mory en Seine-et-Marne (figure 3.42). Ce bassin comporte comme exutoire un bassin de stockage des eaux de ruissellement géré par la Direction Eau et Assainissement du département de Seine-Saint-Denis. Cet ouvrage permet de temporiser les écoulements vers l'aval des eaux de ruissellement. Cela permet, en cas de forte pluie, de ne pas surcharger le système en aval et donc de limiter les risques de débordement du réseau.

Du fait de l'enjeu important de la gestion des volumes d'eau stockés et stockables dans ce réservoir, le niveau d'eau est mesuré à intervalle régulier. La géométrie du réservoir étant connue avec certitude et les entrées dans celui-ci ne se faisant que par le biais du réseau de drainage des eaux de ruissellement, il est possible de relier la variation de la hauteur d'eau dans le réservoir au débit sortant du réseau. Il est donc possible de confronter les résultats obtenus avec Multi-Hydro pour un événement donné aux mesures faites in-situ.

Le réseau de drainage des eaux de pluie est assez simple et suit globalement le réseau routier. Les conduites sont essentiellement de forme circulaire mais, dans la partie aval du réseau ces conduites deviennent un peu plus majoritairement elliptiques. Ce réseau draine au total une surface d'un peu moins de 50 hectares occupé en majeure partie par une zone industrielle et commerciale (figure 3.43). Le reste de la zone, c'est-à-dire le décrochement sud-est, est plus résidentiel. Les pixels en blanc sur cette figure traduisent des données qui n'ont pas pu être classées par l'outil MH-AssimTool et couvrent environ 20% de la surface totale de la zone d'étude. Compte tenu de la localisation de la zone d'étude et des images aériennes⁹, il semble que ces pixels correspondent principalement à de la route ou à des parking.

9. Il est assez facile d'accéder à de telles images via Google Maps par exemple.

Le modèle Multi-Hydro a été appliqué sur ce cas d'étude avec quatre événements pluvieux ayant des caractéristiques différentes. Les événements ont eu lieu entre le 9 février 2009 et le 15 décembre 2011 et ont produit des précipitations comprises entre 12 et 54 mm. Le tableau 3.1 liste ces différents événements avec leurs propriétés. Les enregistrements du niveau d'eau pour ces quatre événements montrent que les trois plus anciens présentent une diminution de ce niveau à des moments précis de l'événement. Ces baisses de niveaux sont le fruit de la gestion du volume de stockage nécessaire en fonction des prévisions sur la suite de l'événement. Multi-Hydro ne prenant pas en compte ces lâchés d'eau, il ne peut donc pas simuler les baisses d'eau dans le réservoir. Pour l'événement du 15 août 2010, dont la gestion a nécessité deux lâchés d'eau, la simulation de l'événement s'est faite en trois parties.

Evènement	Durée (h)	Cumul (mm)	Intensité maximale (mm/h)	Intensité moyenne (mm/h)
09/02/2009	11	12,3	6,5	1,11
14/07/2010	5,83	25,4	55	4,36
15/08/2010	29,167	53,22	15	1,82
15/12/2011	13,33	28,83	22	2,16

TABLE 3.1 – Récapitulatif des événements simulés sur le cas d'étude du bassin du Loup

La zone d'étude est représentée par le modèle avec une résolution spatiale de 10 mètres et une résolution temporelle de 5 minutes dépendante de la résolution temporelle des données radar disponibles pour la zone. Il s'agit des mesures effectuées par le radar en bande C dégradé par cascades multifractales (Gires, 2012) situé sur la ville de Trappes, à une trentaine de kilomètres au Sud-Ouest de Paris.

Résultats

Événement du 9 février 2009 L'évènement le plus ancien est celui qui donne les moins bons résultats comme le montrent les courbes bleue et verte de la figure 3.44. Cet événement est aussi celui qui produit les plus faibles quantités d'eau, c'est-à-dire 6100 m³ soit une hauteur de 12,3 mm d'eau en 11 heures (voir tableau 3.1), ce qui est un événement des plus courant en Ile-de-France. Les résultats donnés par Multi-Hydro montrent une mise en charge assez lente du réservoir (soit un taux de 7,67 m³.s⁻¹) en comparaison avec les mesures affichant une vitesse de mise en charge de 17,5 m³.s⁻¹. Cette différence, qui traduit d'une différence dans la rapidité de réponse du bassin versant, peut venir des conditions initiales, des données d'entrée ou des données de pluie. Cette modélisation a été refaite avec des données de pluie provenant de pluviomètres. Les résultats de ces calculs sont donnés par la courbe bleue de la figure 3.44. Cette courbe traduit une vitesse de mise en charge proche de celle mesurée, avec un décalage dans le temps de 25 minutes. Ces simulations ont été effectuées avec une interception nulle quelque soit la classe d'utilisation du sol, puisqu'en hiver, dans la région parisienne, il est assez fréquent

que les surfaces soient déjà saturées en eau. Cette interception produisant un délai dans la mise en ruissellement des eaux de pluies, il est probable que les conditions d'interception n'étaient pas entièrement remplies en début d'événement. Il faut aussi prendre en compte que les données radar initiales provenant du radar de Trappes ont une résolution spatiale de 1km. Malgré la descente d'échelle multifractale permettant d'obtenir une donnée avec une meilleure résolution, la variabilité de la pluie calculée selon les paramètres du champs de la pluie ne correspondra pas ou peu à la spatialisation réelle de la pluie à fine échelle. Afin d'avoir des données de meilleure qualité, un radar de type bande X sera installé en 2014 dans le cadre du projet RainGain. Les données récoltées seront alors de meilleure qualité (notamment grâce à la double polarisation) et auront une résolution spatiale de 250m. Cela permettra d'avoir des données avec une meilleure répartition spatiale pour lancer nos nouvelles simulations avec Multi-Hydro.

Évènement du 15 août 2010 Cet évènement est lui aussi plutôt courant puisque son intensité moyenne n'est que de $1,82 \text{ mm.h}^{-1}$. Cependant, cet évènement est très long, et une fois séparé en trois parties permettant de s'affranchir des lâchés d'eau, il est plutôt bien simulé par Multi-Hydro (figure 3.45). Seule la première partie donne une augmentation de volume calculé plus élevée que les mesures, ce qui traduit de problèmes dans l'initialisation de l'évènement au sein du modèle. Les autres parties étant simulées dans la continuité des pas de temps précédents, c'est-à-dire avec une certaine quantité d'eau déjà présente sur le bassin versant et dans les canalisations.

Événements du 14 juillet 2010 et du 15 décembre 2011 Les deux derniers événements modélisés donnent des résultats simulés proches des mesures dans le bassin de rétention (figure 3.46). Ces deux événements sont caractérisés par des hauteurs d'eau cumulées assez proches (25,4 mm pour l'évènement du 14 juillet 2010 et 28,83 mm pour celui du 15 décembre 2011). De même, bien que l'intensité maximale pour le premier soit le double de l'intensité maximale du second, l'intensité moyenne de ces deux événements est autour de $2,5 \text{ mm.h}^{-1}$. Le premier évènement est simulé avec une mise en charge un peu plus lente que celle mesurée (avec un taux de $40 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ pour Multi-Hydro et $50 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ pour les mesures), mais le volume maximum est atteint à peu près simultanément à ces mesures. Au delà de ce point, il n'est plus vraiment possible de comparer les deux courbes puisque la diminution du volume mesuré traduit de la libération progressive de l'eau stockée dans le bassin de rétention.

Conclusions Les résultats obtenus sur le bassin versant du Loup avec Multi-Hydro apportent la confirmation que le modèle est capable de reproduire les volumes d'eau entrant dans le bassin de rétention pour des événements courants (période de retour inférieure à cinq ans) mais aussi pour des événements plus importants. La mise en charge du bassin de rétention situé à l'exutoire de la zone étudiée est globalement assez bien retrouvée avec le modèle.

La réponse modélisée d'un bassin versant est très dépendante des données d'entrée. La principale information nécessaire au calcul est la donnée de pluie. Si cette dernière est de mauvaise qualité, il est préférable d'améliorer la résolution spatiale et temporelle grâce aux descentes d'échelles multifractales tout en prenant en compte la variabilité spatiale. Le paramètre définissant cette variabilité sera le mieux approximé si la résolution de la donnée initiale se rapproche

le plus de la résolution de la simulation.

3.4.2 Le cas d'étude de Spaanse Polder, Rotterdam, Pays-Bas

Description

Dans le cadre du projet RainGain toujours, la ville de Rotterdam (partie gauche de la figure 3.47), aux Pays Bas, est celle choisie pour la mise en place d'un radar en bande X. Ainsi, la ville accueille trois cas d'études pour des campagnes de mesures et de modélisation de l'hydrologie urbaine. La première zone d'étude est une zone principalement industrielle de près de 2 km² située au nord-ouest de Rotterdam et appelée Spaanse Polder (partie droite de la figure 3.47). Les deux autres zones sont essentiellement résidentielles, l'une, de 4 km², étant au centre et accueillant le radar en bande X alors que l'autre est plutôt située à l'Est de la ville et comporte également de nombreux espaces verts et un lac. Cette dernière zone est beaucoup plus étendue que les deux autres et s'étend sur près de 8 km². Actuellement, seule la zone de Spaanse Polder a commencé à être mise en place pour une modélisation Multi-Hydro.

La modélisation de l'hydrologie urbaine de ces quartiers se déroule actuellement via le modèle SOBEK (Deltares, 2013). Il s'agit d'un modèle en une dimension pour le réseau de drainage qui résout les équations complètes de Saint Venant et représente le réseau d'une façon assez similaire à celle de SWMM. Les entrées dans le réseau sont gérées dans SOBEK par un modèle conceptuel de pluie-débit qui dépend de l'aire drainée, de l'intensité de pluie et d'infiltration, ainsi que d'un facteur de forme qui nécessite un calibrage pour chaque cas d'étude et pour chaque pluie.

Une modélisation avec Multi-Hydro a également commencé à se mettre en place pour ces cas d'étude. Si aucun résultat n'a encore pu être obtenu pour le moment, cela a permis d'identifier des difficultés dans la chaîne de modélisation de Multi-Hydro, et donc de proposer une direction pour les améliorations futures du modèle.

Précision des données

Les données d'altitudes sur les cas de Rotterdam sont très précises en comparaison de celle obtenues pour les cas français et anglais. En effet, ces données ont été fournies avec une précision horizontale de 50 centimètres et une précision verticale de 5 centimètres (à plus ou moins 5 centimètres). Il s'agit de données LiDAR n'ayant pas subies de corrections sur la présence de bâtiments ou de mobilier urbain (c'est donc un MNE, voir chapitre 2.3.4). Ce type de données pose un certain nombre de problèmes pour la mise en place du cas d'étude. Du fait que tout apparaît dans l'altitude, les données comportent des variations pour des éléments qui ne devraient pas être pris en compte comme les arbres, les voitures ou le petit mobilier urbain. Or, comme il l'a été vu dans le chapitre 2.4.2, les données d'altitudes doivent être fournies à Multi-Hydro avec la même résolution que celle choisie pour le modèle. Cependant, l'interpolation des données pour remplir cette condition nécessite de prendre deux points et de moyenniser leurs valeurs en fonction de la distance qui les sépare. Si l'un de ces points se retrouve localisé sur du mobilier ou sur un arbre, la topographie résultante et utilisée ensuite par Multi-Hydro va comporter des variations

importantes artificielles de niveau influençant la dynamique des écoulements en surface (figure 3.48).

De plus, comme les données indiquant la profondeur à laquelle est enterré le réseau de drainage des eaux de pluies ne sont pas toujours disponibles, l'outil d'assimilation des données offre la possibilité de définir cette profondeur en fonction des altitudes de surface. Or, si ces données présentent des artefacts, il peut en résulter des variations dans la profondeur des canalisations et donc créer des pentes incompatibles avec le fonctionnement d'un réseau de drainage.

À l'inverse, ce type de donnée tenant compte de la présence des bâtiments, la modification de la topographie en fonction de l'utilisation du sol développé dans le chapitre 2.3.4 n'est plus nécessaire. Cependant, il est indispensable de vérifier la bonne superposition entre la topographie et l'utilisation du sol générée pour la modélisation afin d'éviter des problèmes de décalages.

Mise en place des ouvrages

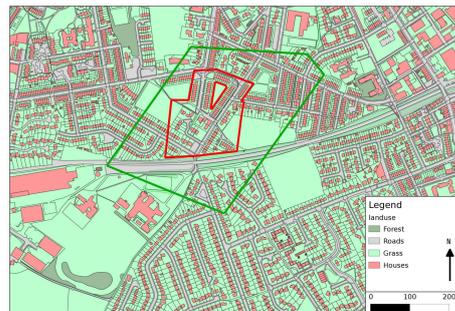
La problématique à Rotterdam est due à l'environnement général du pays. En effet, les Pays-Bas étant en majeure partie construits sur un polder, l'altitude moyenne de la ville se situe autour de 7 mètres en dessous du niveau de la mer et la topographie est assez plane. Dans le réseau de drainage, l'écoulement des eaux collectées se fait grâce à la présence de pompes qui complexifient la dynamique hydraulique locale. Parmi les ouvrages présents sur la zone de Spaanse Polder, on trouve 4 pompes et 7 déversoirs d'orages (figure 3.49).

Conclusions

Seules les pompes ont réellement apporté une quelconque complexité à la modélisation, nécessitant la mise en place des courbes de fonctionnement spécifique à chacune d'entre elles. Ces pompes sont définies comme des conduites ayant un débit forcé donné par ces courbes. Il est donc indispensable, du fait du morcellement des simulations selon la résolution temporelle utilisée pour le modélisation Multi-Hydro, de lire et de modifier des courbes en fonction du temps courant des calculs. Cette difficulté supplémentaire n'avait encore jamais été rencontrée du fait de la localisation et de la simplicité des réseaux modélisés dans les trois premières années de développement de Multi-Hydro.

Heywood, Greater Manchester (UK)

Description of context



Larger catchment (green) will be used to evaluate the lateral inflow for the smaller catchment (red).

The Heywood (Greater Manchester) catchment of about 8 km² has experienced serious pluvial flooding in 2004 and again in 2006. There is no recorded history of previous flood events in the area. Since 1960 many open areas and brownfield sites have been occupied by new housing and new low-rise large warehouses on a new distribution centre. Typical of the edges of many British towns, this urban infill process adds to problems of effective surface water management.

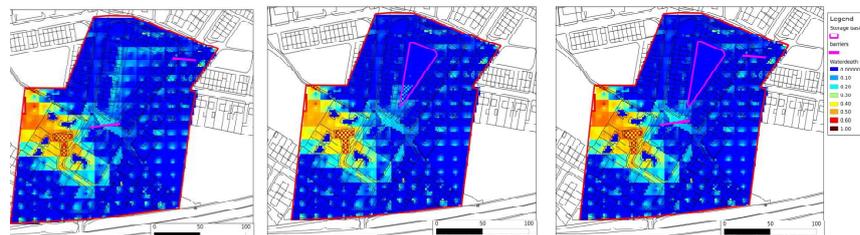
Alternative schemes

'Virtual' implementation of: (a) barriers of 1 m; (b) swale of 1.5 m depth; (c) barriers and a swale of 0.5 m depth.

System approach:

To reduce implementation costs by associating different FRe technologies.

Assessment of alternative schemes



Multi-Hydro assessment (from left to right): 0.2 m of water in Egerton street and still 0.6 m in green areas (scheme a) compare to 0.6 m of water without protection; 0.2 m of water in Egerton street and in green areas (scheme b); 0.2 m of water in Egerton street and in green areas (scheme c).

Multi-Hydro water depth assessments were used by FLOReTO / HoWAD for the damage mitigation assessment.

Implementation

More economical and still efficient FRe measures would be the smaller swell (0.5 m deep) associated with two barriers of 1m height located across the Wilton Grove and Egerton streets.

The two barriers only will not be sufficient to improve the situation, an implementation of swell has not been considered by the stakeholders.

FIGURE 3.41 – Synthèse du cas d'étude d'Heywood.

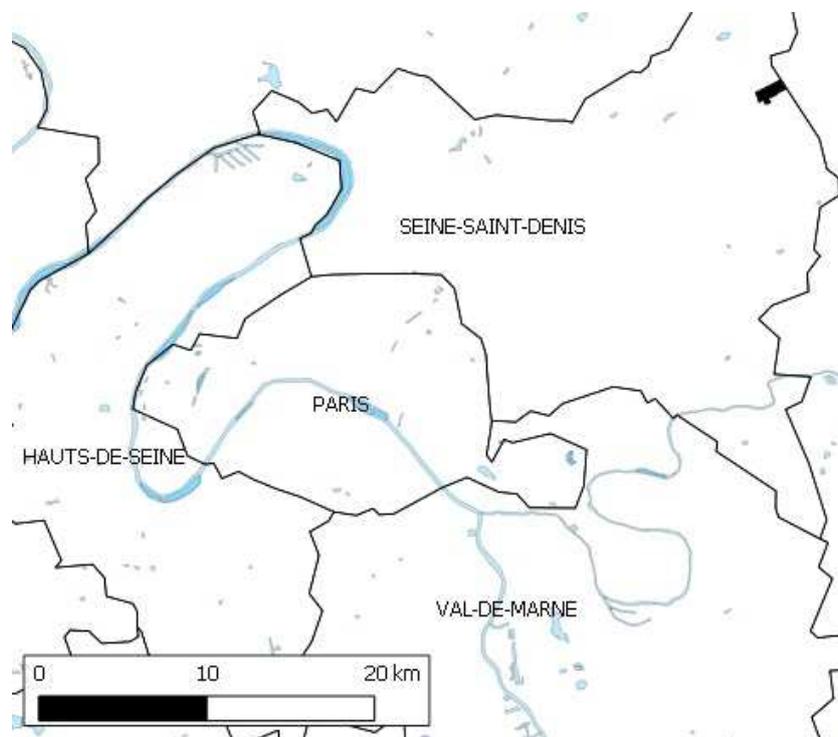


FIGURE 3.42 – Localisation du bassin du Loue à Villepinte, Seine-Saint-Denis (France).



FIGURE 3.43 – Utilisation du sol pour le bassin versant du Loue avec une résolution de 10m (Abbes (2013)).

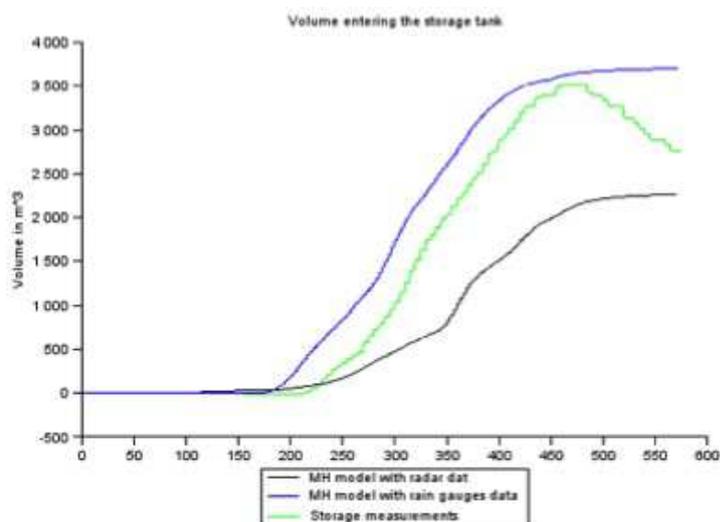


FIGURE 3.44 – Évolution du volume entrant dans le bassin de rétention pour l'événement du 9 février 2009. La courbe verte représente le volume (en m^3) mesuré dans le bassin de rétention. Les autres courbes correspondent à celui calculé par Multi-Hydro à partir des données radar (en noir) et à partir des données pluviométriques (courbe bleue). Le temps est donné en minutes (Abbes, 2013).

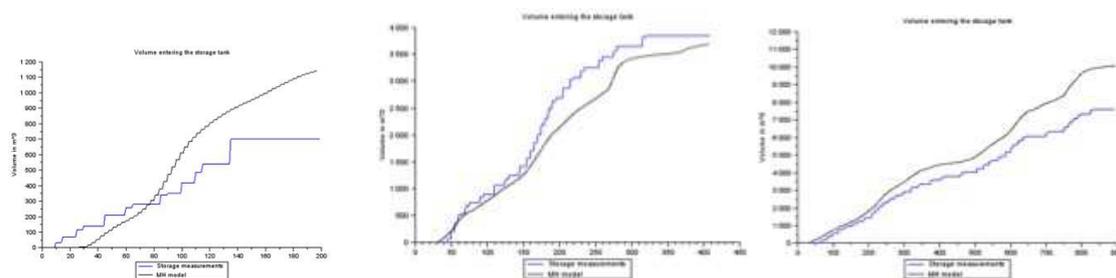


FIGURE 3.45 – Résultats des simulations de l'événement du 15 août 2010 (Abbes (2013)).

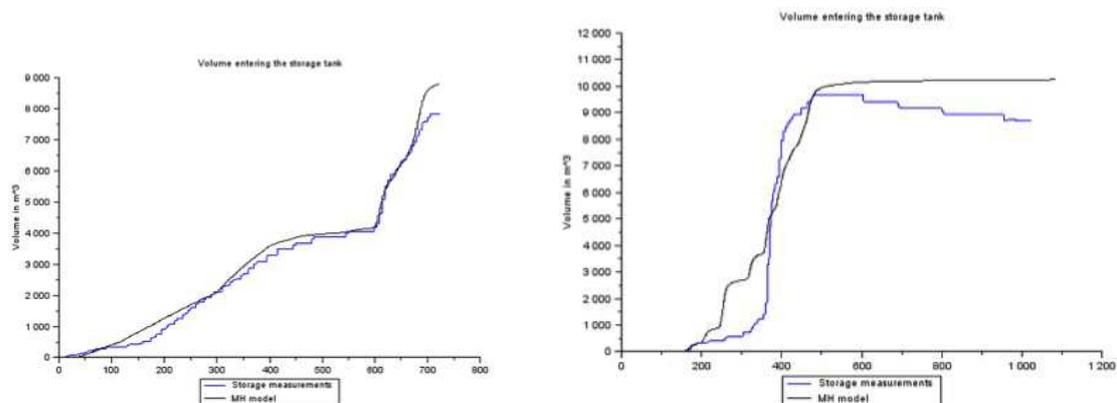


FIGURE 3.46 – Résultats des simulations de l'événement du 15 décembre 2011 (à gauche) et du 14 juillet 2010 (à droite) (Abbes (2013)).

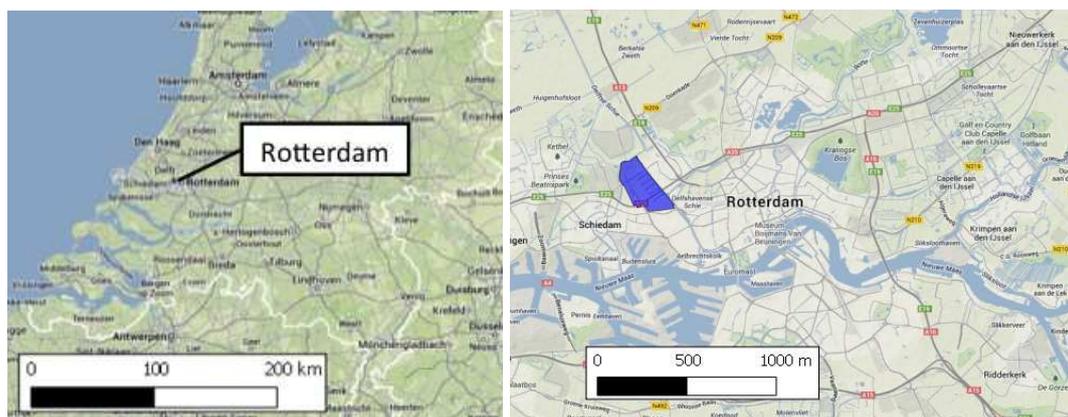


FIGURE 3.47 – Localisation de Spanse Polder, Rotterdam (Pays-Bas).

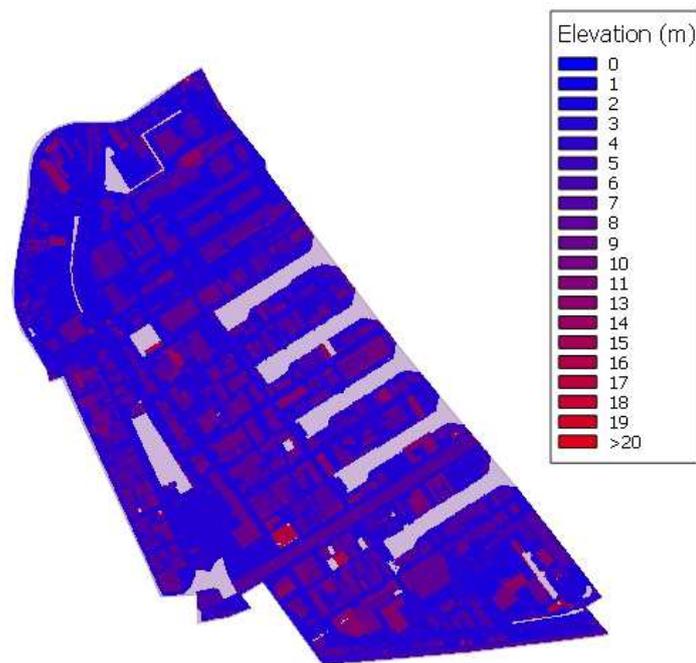


FIGURE 3.48 – Influence du mobilier urbain sur la topographie avec un MNE d'une précision horizontale de 50 cm.

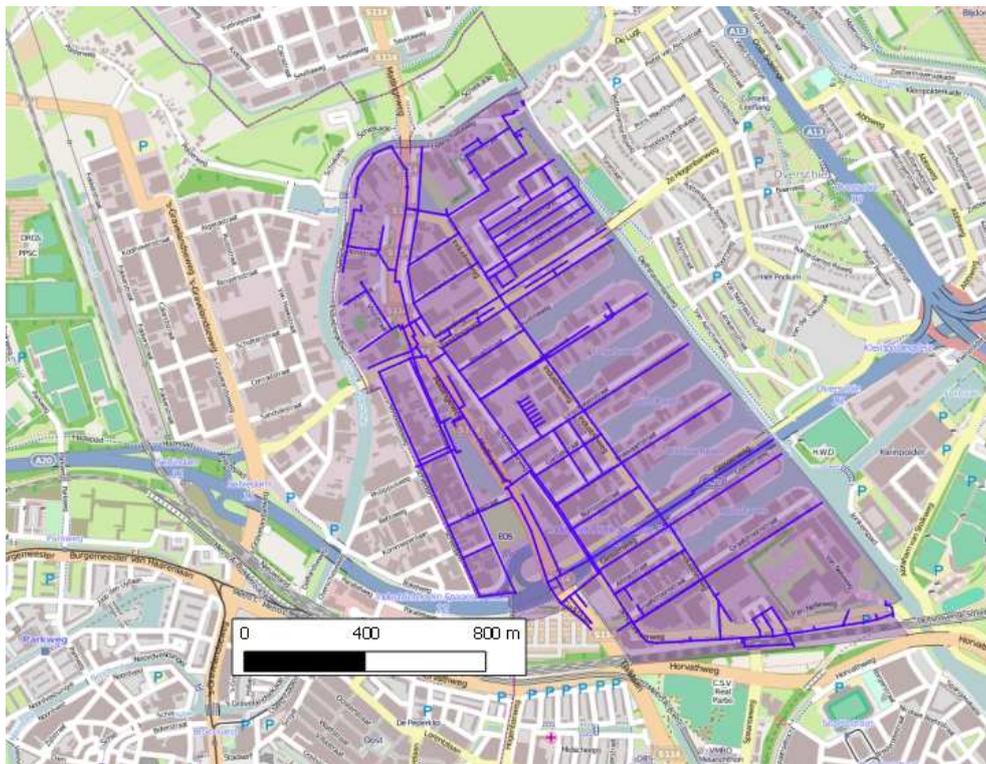


FIGURE 3.49 – Carte du réseau de drainage des eaux de ruissellement sur le cas d'étude de Spaanse Polder à Rotterdam.

Chapitre 4

Conclusion

Cette thèse porte de fait sur l'une des grandes questions socio-économiques de notre époque : assurer la transition à la résilience de nos systèmes urbains, qui sont présentement fortement vulnérables aux évènements extrêmes.

Au cours de projets portant sur cette transition, notamment GARP-3C¹ et SUCAs² s'est dessinée la question de pouvoir évaluer cette transition dans le cadre de *scénarios*, donc dans le cadre de modélisations hydrologiques de la ville. Or le CEREVER (prédécesseur du LEESU) n'avait à l'époque accès qu'à un modèle semi-distribué, utilisé essentiellement à des fins d'enseignement. Les autres modèles « sur étagères » ne répondraient pas non plus à une approche multi-échelle et à haute résolution nécessaire pour modéliser à la fois les techniques et le contexte climatologique.

D'autre part, la base physique des modélisations stochastiques, qui peuvent fournir facilement des simulations des grandes gammes d'échelles, notamment celles basées sur les symétries d'échelles, n'étaient pas directement adaptée au milieu urbain ou péri-urbain. Restait donc la nécessité de développer, avec des ressources très limitées, un système de modélisation apte à évoluer facilement, y compris dans le type même de modélisation utilisée, en particulier avec la perspective d'une modélisation hybride mêlant des modélisations de type déterministe et stochastique.

La question des scénarios s'est formalisée au cours du projet SMARTeST³, qui a mis une emphase particulière sur une approche systémique de la résilience. Ce projet, en conjonction avec le programme « Numériser la Ville » (PST Paris-Est) a donc grandement contribué à la maturation de Multi-Hydro.

1. Gestion de l'Assainissement en Région Parisienne dans le Contexte du Changement Climatique, dans le cadre du Réseau Régional de Recherche sur le Développement Sostenable (R2DS) d'Ile de France.

2. Small Urban Catchments, dans le cadre du programme Européen ERANET CRUE.

3. Smart Resilience Technology, Systems and Tools, dans le cadre du 7^{ème} programme cadre Européen.

4.1 Un outil puissant...

Ce manuscrit présente les différents développements en terme de modélisation hydrologique (péri-)urbaine appliqué à Multi-Hydro dans le contexte de l'amélioration de la résilience aux inondations. Ce contexte particulier a imposé un cahier des charges rigoureux, d'autant plus que les utilisateurs cibles de ce modèle sont d'horizons très variés. Ainsi, outre les contraintes physiques liées à la complexité des milieux modélisés, il a fallu tenir compte de la facilité d'accès et d'utilisation du modèle. Pour cette tâche, l'expérience acquise dans le cadre de projets européens (SUCAs, RainGain, SMARTeST, ...) et nationaux (Ville Numérique⁴) notamment à l'occasion d'ateliers de démonstration pour les partenaires s'est avérée très précieuse.

De nombreux modèles hydrologiques et hydrauliques existent, que ce soit dans le domaine propriétaire que dans le domaine du libre, avec des licences payantes ou gratuites. Ces modèles, qui bénéficient d'un développement soutenu par une large communauté d'utilisateurs, sont validés et approuvés pour leurs domaines d'applications. Chacun de ces modèles fonctionne bien pour une portion du cycle de l'eau et considère les autres parts de ce cycle comme des conditions aux limites. Le concept Multi-Hydro est donc de coupler certains de ces modèles pour que les uns combler les manques des autres. Pour faciliter la diffusion de Multi-Hydro, il a été choisi de focaliser les efforts sur des modèles qui soient open source et sans aucune licence. De plus, pour satisfaire la contrainte d'une modélisation fine pouvant prendre en compte des changements à petite échelle, les modèles choisis sont tous à base physiques et totalement distribués (du moins sur les parties de code utilisées dans Multi-Hydro). C'est dans cette optique que les modules de Multi-Hydro sont basés sur les modèles TREX pour les processus de surface, SWMM pour les processus dans le réseau de drainage des eaux de ruissellement et VS2DT pour les processus de la zone non saturée du sol. Le couplage de ces éléments s'est mis en place avec Scilab, outil de calcul matriciel permettant la gestion des nombreuses variables nécessaires aux calculs et lui aussi appartenant au domaine open source et gratuit. Un soin particulier a été apporté au couplage entre chacun de ces modules afin d'autoriser les utilisateurs à choisir la configuration de la chaîne de modélisation en fonction de leurs besoins et de leurs possibilités. Les interactions surface-sol et surface-réseau d'assainissement ont donc été mises en place de façon à pouvoir être prises en compte ou non. De même, le développement de Multi-Hydro a intégré la mise en place une première automatisation de post-processing, facilitant ainsi la visualisation et l'analyse des résultats.

Chacun des modules permet une modélisation distribuée de la partie du cycle de l'eau qu'il représente. Le choix d'une distribution complète exige la constitution d'une description assez fine des bassins d'études, et donc pose le problème de l'acquisition des données géographiques indispensables à cette tâche. Ces données n'étant pas toujours disponibles, ni dans le format, ni avec la résolution adéquats pour la modélisation, la mise en place de nouveau cas d'études peut s'avérer complexe, longue, fastidieuse voire même rédhibitoire pour l'utilisation de l'outil. C'est pourquoi un outil a été développé pour permettre l'automatisation de ces tâches. Via une interface graphique, l'utilisateur peut plus facilement définir les caractéristiques de la zone d'étude.

4. Voir annexe G pour le rapport technique et scientifique relatif à Multi-Hydro dans le cadre de ce projet.

Multi-Hydro a été appliqué sur cinq cas d'études où une approche systémique a été effectuée sur des scénarios à la fois en terme de conditions d'inondation mais aussi d'implémentation de différentes techniques de résilience (telles que les barrières individuelles et périmétriques et les noues).

Le premier cas d'étude est le petit bassin versant drainé par la canalisation départementale de collecte des eaux pluviales de la ville de Villecresnes (Val-de-Marne, France). Il s'agit de la zone utilisée pour l'évaluation des différentes améliorations de Multi-Hydro. Ainsi, les résultats obtenus sur ce bassin ont montré que les interactions surface-réseau d'assainissement et surface-sol ont un impact important non seulement sur les débits de surface et dans le réseau, mais aussi dans la répartition de l'eau sur la zone étudiée. D'autre part, la présence de bâtiments impliquant une modification artificielle de la topographie des zones (péri-)urbaines, l'information d'altitude initiale a été modifiée en fonction de celle de l'utilisation du sol. Une fois encore, ce type de variation locale a une forte influence sur les débits et les répartitions des hauteurs d'eau sur le bassin. Ces derniers résultats ont été confirmés grâce à une analyse multifractale qui a montré la modification du comportement global du bassin versant avec la modification de la conductivité hydraulique et avec la modification de la topographie selon l'utilisation du sol. Pour finir, ce cas a permis également de montrer les impacts potentiels de l'implémentation d'une barrière périmétrique puis d'une noue dans le cadre de la réduction des risques d'inondations pour un quartier donné.

Le second cas d'étude est également localisé dans le même département, à cheval entre les communes de Saint-Maur-des-Fossés et Chennevières-sur-Marne. Initialement prévu pour prendre en compte une section de la Marne, ce cas a permis de poser les difficultés de la modélisation des rivières lorsque celles-ci ont une largeur supérieure à la taille de la maille. Les simulations effectuées sur ce cas ont permis de montrer la capacité de Multi-Hydro à représenter une portion de fleuve assez facilement, bien qu'aucune sorte de validation n'ait pu être mise en place par manque de données. Cependant, la zone a récemment subi un audit de l'état du réseau d'assainissement. Cette étude s'accompagne d'une cartographie de ces derniers, ainsi que de campagnes de mesures dans le réseau. Ainsi, les délimitations de ce cas d'études ont pu être ré-évaluées dans le but de permettre une validation sur trois zones de tailles variables.

Le troisième cas d'étude est localisé sur la commune d'Heywood, dans la grande banlieue de Manchester (Royaume-Unis). Ce cas, mis en place dans le cadre du projet SMARTeST a eu pour but d'évaluer l'impact de la mise en place de scénarios de protection sur un quartier composé de deux rues principales, Wilton Grove avec une orientation grossièrement Nord-Sud, et Egerton Street qui est plutôt orientée Est-Ouest, sachant que la zone récemment inondée (2004 et 2006) se situe à l'intersection de ces deux rues. Ainsi, c'est quatre scénarios qui ont été implémentés :

1. deux barrières au Nord et au Sud de Wilton Grove,
2. une barrière au nord de Wilton Grove et une autre dans Egerton Street,
3. une noue d'1.5 mètres de profond au Nord-Ouest de l'intersection,
4. une combinaison des deux derniers scénarios (une barrière dans Wilton Grove, une autre dans Egerton Street et une noue de 0.5 mètre de profond).

L'analyse de ce cas d'étude a nécessité une résolution assez haute (1 à 2 mètres) permettant de représenter les détails du quartier et a permis de tester l'utilisation d'une résolution basse

(modélisation à grande échelle) pour évaluer les conditions aux limites de la résolution la plus haute (modélisation à petite échelle). La comparaison entre les observations des habitants et les résultats des simulations sur des événements similaires ont permis de démarrer une validation sommaire du modèle, ainsi que de définir que les scénarios 3 et 4 donnaient des résultats similaires en termes de réduction des hauteurs d'eau dans les rues et qu'à l'inverse le scénario 1 n'avait que très peu d'intérêt.

L'avant dernier cas d'étude de ce travail est situé en France, sur la commune de Villepinte (Seine-Saint-Denis) et correspond à la zone drainée par un bassin de rétention géré par la DEA 93 et équipé pour la mesure en temps réel des volumes stockés. Grâce à la modélisation de quatre événements de durée et d'intensités variables, il a été possible de mettre en avant les capacités de Multi-Hydro à représenter les volumes sortant du réseau de drainage pour des événements courants (c'est-à-dire ayant une période de retour de moins de cinq ans) mais aussi plus exceptionnels (période de retour entre dix et vingt ans).

Le dernier bassin versant de cette étude est quant à lui localisé dans le secteur de Spaanse Polder (Rotterdam, Pays-Bas). Il s'agit d'une zone très plane, avec un réseau de drainage beaucoup plus complexe que pour les autres cas d'étude et qui comporte des exutoires multiples ainsi que de nombreuses pompes. Ces dernières nécessitent quelques adaptations de la part de Multi-Hydro pour permettre leur représentation. Ainsi, ce cas d'étude n'a pas encore fourni de résultat mais permet de poser les limitations qui orientent les futurs développements de Multi-Hydro.

Dans la problématique de l'amélioration de la résilience des villes face aux inondations, ce travail a donc mis en avant les capacités de Multi-Hydro. Cet outil modulaire, basé sur des modèles hydrologiques et hydrauliques à base physique, permet la modélisation distribuée de zones urbaines et péri-urbaines. Sa liberté de licence, ainsi que son outil d'assimilation des données d'entrée (MH-AssimTool) et ses routines permettant de tracer aisément les principaux résultats, font que Multi-Hydro est facilement implémentable sur différentes zones et pour différentes résolutions, et ce par des utilisateurs aux profils variés. Ainsi, Multi-Hydro se place dorénavant comme un outil d'aide à la décision offrant la possibilité d'évaluer un grand nombre de scénarios montrant l'impact des modifications locales à différentes échelles.

4.2 ... qui n'a pas fini d'évoluer

Comme l'on montré les cinq cas d'études présentés dans ce manuscrit, Multi-Hydro a acquis au cours de ces trois années des qualités qui font déjà de lui un outil puissant. Du fait de sa structure, cet outil est pourtant destiné à une évolution permanente. En effet, le dernier cas d'étude à déjà montré quelques limitations avec la nécessité d'améliorer la prise en compte des ouvrages particuliers qui peuvent être installés dans les réseaux d'eaux pluviales.

De même, le cycle de l'eau en milieu (péri-)urbain n'est pas encore complet puisque certains processus et certaines interactions ne sont pas encore pris en compte. C'est notamment le cas des interactions entre le réseau d'assainissement et le sol et/ou la nappe phréatique. Ce dernier élément n'est pas encore modélisé par Multi-Hydro et nécessitera l'ajout d'un nouveau module à

la structure. Les interactions sol-réseau posent quelques difficultés malgré la présence des deux modules MHGM et MHDM. En effet, le module de sol fonctionnant sur la base de « tranches » 2D verticales, ce qui pose déjà des questions sur les incertitudes sur les transferts latéraux dans le sol et rend la connexion entre ces deux modules très hasardeuse. Il sera peut-être nécessaire de passer par un changement de base pour le module de sol, changement qui pourrait s'avérer d'autant plus utile que les écoulements préférentiels créés par les différents réseaux (gaz, électricité, télécommunication, ...) sont envisagés pour une représentation dans Multi-Hydro puisqu'ils pourraient avoir un impact important sur les flux d'eau.

Actuellement, Multi-Hydro est plutôt en mode événementiel, c'est-à-dire pour modéliser des événements isolés. Il apparaît alors les différents échanges avec les utilisateurs du modèle une volonté de ces derniers d'effectuer des simulations sur des durées plus longues. Ainsi, un certain nombre de processus jusque là considérés comme négligeables pourraient demander d'être ré-évalués et mieux pris en compte. C'est par exemple le cas de l'interception qui, sur des chroniques plus longues, joue un rôle dans l'établissement des bilans en eau (Muzyllo et al., 2009). De même, des phénomènes tels que l'évapo-transpiration et la fonte de la neige devront être mis en place dans la chaîne de modélisation. Cependant, ces modifications ne devraient pas être insurmontables puisqu'elles sont déjà plus ou moins intégrées dans les codes existants. En effet, pour faciliter l'utilisation de Multi-Hydro, il a été choisi de limiter certaines options qui n'avaient que peu d'impact dans le contexte des événements extrêmes. Il s'agirait donc seulement d'activer ces options en veillant bien sûr aux problématiques d'interactions avec les autres modules.

Un autre point qui sera peut-être plus limitant dans l'utilisation de Multi-Hydro sur de longues chroniques est le temps de calcul. En effet, chaque boucle de simulation dans Multi-Hydro est constituée de plusieurs simulations ce qui pourrait s'avérer chronophage. Il est cependant possible d'imaginer une adaptation de la durée des boucles de rétro-actions entre les modules, avec des pas plus courtes pour les périodes où il pleut que par temps sec. Une telle démarche semble assez facile à mettre en place pour les calculs, et un peu plus complexe pour les sorties de résultats qui sont directement dépendants des durées des boucles.

Il faut toutefois noter que ces remarques s'appliquent essentiellement pour des modélisations dont les calculs s'effectuent sur ordinateurs personnels. Les problèmes de temps de calculs se posent moins lorsque ces calculs sont lancés sur un serveur.

Dans un futur très proche, puisqu'il s'agit là du sujet d'une thèse qui vient de débiter, la qualité des eaux devrait prendre place au sein de Multi-Hydro. En effet, dans le cadre du projet Trafipollu, cette thèse vise à l'intégration des transferts de polluants à l'échelle du quartier et de valider le modèle. Il faut savoir que les différents modules actuellement en place dans Multi-Hydro comportent déjà l'aspect qualitatif avec des transports de sédiments et/ou de polluants. Ainsi, cette intégration de la qualité de l'eau portera sur la connexion des différentes parties de qualité de chacun des modules pour qu'elles puissent interagir les unes avec les autres. Une autre partie sera également de combler les manques éventuels de ces parties afin de compléter le cycle des polluants.

Comme il l'a été vu avec les cas d'études de Villecresnes et d'Heywood que des modifications locales peuvent avoir des impacts importants à l'échelle du bassin versant. C'est notamment le cas de la mise en place de noues qui permettent une gestion des eaux de ruissellement. Ainsi, il semble intéressant de pouvoir mettre en place les techniques alternatives de gestion de ces eaux, qui est souvent associée à un suivi de leur qualité (rejoignant ainsi le paragraphe précédent), au sein de Multi-Hydro.

Si les noues semblent déjà assez bien représentées dans le modèle, un grand nombre d'autres techniques (toitures végétalisées et stockages individuels des eaux de pluies pour ne citer qu'elles) doit aussi être pris en compte. La tâche est d'autant plus vaste qu'il existe une très grande variété de ces techniques toujours en perpétuel développement.

L'un des points qui a déjà été abordé dans ce travail porte sur la convivialité d'utilisation du modèle. Si elle a déjà été grandement améliorée au travers de la mise en place de fenêtres de configuration de la modélisation, ainsi que par la création de MH-AssimTool, il reste encore un certain nombre de manipulations peu ergonomiques. A terme, MH-AssimTool et Multi-Hydro devraient éventuellement fusionner au sein d'une même interface. Toute la difficulté de cette étape se situe dans le type de couplage à mettre en place parmi les quatre grands types qui existent communément dans la pratique ([Sui and Maggio, 1999](#)).

À l'autre bout de la chaîne de modélisation se trouve le post-processing. Il s'agit, d'une part d'augmenter la bibliothèque d'outils disponibles pour l'analyse des résultats. Cela peut passer, notamment, par la mise en place d'un module permettant les analyses multifractales. D'autre part, il s'agit d'améliorer les visualisations des résultats, en proposant l'automatisation des tracés de plus d'informations, ainsi que d'une visualisation en trois dimensions permettant de suivre l'évolution des hauteurs d'eau directement dans les rues de la zone modélisée et au fur et à mesure du calcul. Ce sujet est d'ailleurs l'objet d'une thèse qui a démarré l'an passé au sein du projet européen BlueGreenDream.

Plus généralement, se pose la question d'une évolution vers une modélisation hybride telle que prévue initialement, mêlant modélisations déterministes et stochastiques. Le module de désagrégations des précipitations en est un premier exemple appelé à se généraliser (comme par exemple avec la géologie). En effet, non seulement les incertitudes de mesure sur certains champs sont grandissimes, mais s'il est souvent commode de représenter de façon déterministe les interactions entre champs, ceux-ci ne sont représentés de façon explicite que sur une gamme réduite. Cela pose déjà le problème classique de la paramétrisation sous-maille de ces champs, c'est-à-dire la représentation des interactions entre échelles explicites et implicites du modèle. Les dernières décennies des modèles météorologiques et climatiques ont montré la nécessité de se diriger vers des paramétrisations stochastiques. Enfin, le stochastique est aussi un moyen puissant pour un autre type de paramétrisation : la représentation d'interactions avec différents champs qu'il n'est pas possible de représenter de façon explicite.

Ainsi, le socle même de Multi-Hydro est appelé à évoluer très rapidement.

Bibliographie

- (2013). Site web de l'ign, institut géographique national. <http://professionnels.ign.fr/catalogue>.
- (2013). Site web des nations unies. <http://www.un.org/en/development/desa/population/index.shtml>.
- Abbes, J.-B. (2013). Hydrological modelling of the loup catchment. Rapport de stage scientifique de l'Ecole des Ponts ParisTech.
- Alison (2005). *Notice de CANOE*.
- Ambroise, B. (1999). *La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant : processus, facteurs, modèles*. Ed. HGA.
- Arnaud, P., Bouvier, C., Cisneros, L., and Dominguez, R. (2002). Influence of rainfall spatial variability on flood prediction. *Journal of Hydrology*, 260 :216–230.
- Arrowsmith, D. K. (1990). *An introduction to dynamical systems*. Cambridge University Press.
- Bendjoudi, H. and Hubert, P. (1998). A propos de la distribution statistique des cumuls pluviométriques annuels. faut-il en finir avec la normalité ? *Revue Scientifique de l'Eau*, (4) :617–630.
- Bendjoudi, H., Hubert, P., Schertzer, D., and Lovejoy, S. (1997). Multifractal point of view on rainfall intensity-duration-frequency. *C. R. Acad. Sci*, 325 :323–326.
- Beven, K., Lamb, R., Quinn, P., Romanowicz, R., Freer, J., Singh, V., et al. (1995). Topmodel. *Computer models of watershed hydrology.*, pages 627–668.
- Blanchard, T. (2008). Les inondations de 1733 et 1740 à grenoble : L'évolution de la résilience dans l'après catastrophe. *Environnement Urbain/Urban Environment*, 2 :73–89.
- Boyington, T. M. (2010). *Water on the Floodplain : Frequency and Volume of Overbank Discharge*. PhD thesis, University of Wisconsin-Madison.
- Bubel, J. (2008). *GIS-Based Analysis of Flood Probability Reduction Measures in Small Urban Catchments. Case Study of Heywood, Greater Manchester*. PhD thesis, University of Manchester and Technische Universität Hamburg-Harburg.

- Carpenter, S., Walker, B., Anderies, J. M., and Abel, N. (2001). From metaphor to measurement : resilience of what to what ? *Ecosystems*, 4(8) :765–781.
- Collings, J. B. and Wollkind, D. J. (1990). A global analysis of a temperature-dependent model system for a mite predator-prey interaction. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 50(5) :1348–1372.
- Commission, E. et al. (2007). Directive 2007/60/ec of the european parliament and of the council of 23 october 2007 on the assessment and management of flood risks. *Off J Eur Communities 2007a*.
- DeAngelis, D. (1980). Energy flow, nutrient cycling, and ecosystem resilience. *Ecology*, pages 764–771.
- Deltares (2013). *SOBEK : Hydrodynamics, Rainfall Runoff and Real Time Control. User Manual*.
- Domingo, N. S., Refsgaard, A., Mark, O., and Paludan, B. (2010). Flood analysis in mixed-urban areas reflecting interactions with the complete water cycle through coupled hydrologic–hydraulic modelling. *Water Sci Technol*, 62(6) :1386–1392.
- El-Tabbakh, E., Tchiguirinskaia, I., Mahmoud, O., and Schertzer, D. (2009). *Multi-Hydro : a Spatially Distributed Numerical Model to Assess and Manage Runoff Processes in Peri-Urban Watershed*. Pascheet E., road map towards a flood resilient urban environment edition.
- England, J. F., Velleux, M. L., and Julien, P. Y. (2007). Two-dimensional simulations of extreme floods on a large watershed. *Journal of Hydrology*, 347 :229–241.
- Fletcher, T., Andrieu, H., and P., H. (2013). Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters : a state of the art. *Advances in Water Ressources*, 51 :261–79.
- Folke, C., Carpenter, S. R., Walker, B., Scheffer, M., Chapin, T., and Rockström, J. (2010). Resilience thinking : integrating resilience, adaptability and transformability. *Ecology and Society*, 15(4) :20.
- Garvin, S. and Salagnac, J.-L. E. (2013). Smartest policy statement. page 29. EU.
- Giangola-Murzyn, A., Gires, A., Richard, J., Hoang, C., Tchiguirinskaia, I., and Schertzer, D. (2012). Multi-component physically based model to assess systemic resilience in paris region.
- Gires, A. (2012). *Analyses et Simulations Multifractales pour une Meilleure Gestion des Eaux Pluviales en Milieu Peri-Urbain*. PhD thesis, Université Paris-Est.
- Gires, A., Tchiguirinskaia, I., Schertzer, D., and Lovejoy, S. (2011). Analyses multifractales et spatio-temporelles des précipitations du modèle méso-nh et des données radar. *Hydrological Sciences Journal–Journal des Sciences Hydrologiques*, 56(3) :380–396.

- Gires, A., Tchiguirinskaia, I., Schertzer, D., Schellart, A., Berne, A., and Lovejoy, S. (2013). Influence of small scale rainfall variability on standard comparison tools between radar and rain gauge data. *Atmospheric Research*, (0) :—.
- Graham, D. N. and Butts, M. B. (2005). *Watershed Models*, chapter Flexible, Integrated Watershed Modelling with MIKE SHE, pages 245–272. CRC Press.
- Harbaugh, A. W. (2005). *MODFLOW-2005, the US Geological Survey modular ground-water model : The ground-water flow process*. US Department of the Interior, US Geological Survey.
- Hingray, B., Picouet, C., and Musy, A. (2009). *Hydrologie 2-Une science pour l'ingénieur*, volume 2. PPUR presses polytechniques.
- Hoang, C. T. (2011). *Prise en Compte des Fluctuations Spatio-Temporelles Pluie-Débits pour une Meilleure Gestion de la ressource en Eau et une Meilleure Evaluation des Risques*. PhD thesis, Université Paris-Est.
- Holling, C. S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annual review of ecology and systematics*, 4 :1–23.
- Ichiba, I. (2012). Modélisation hydrologique des effets de résilience sur le bassin versant de chennevères-sur-marne par le modèle multi-hydro. Master's thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- IPCC (2013). Working group i contribution to the ipcc fifth report climate change 2013 : the physical science basis. summary for policymakers. Technical report, IPCC.
- Jankowfsky, S. (2011). *Understanding and modelling of hydrological processes in small periurban catchments using an object-oriented and modular distributed approach. Application to the Chaudanne and Mercier sub-catchments (Yzeron catchment, France)*. PhD thesis, Université de Grenoble.
- Khu, S.-T., di Pierre, F., Savic, D., Djordjevic, S., and Walters, G. A. (2006). Incorporating spatial and temporal information for urban drainage model calibration : an approach using preference ordering genetic algorithm. *Advances in Water Resources*, 29 :1168–1181.
- Kolmogorov, A. N. (1941). Dissipation of energy in locally isotropic turbulence. In *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, volume 32, pages 16–18.
- Lappala, E. G., Healy, R. G., and Weeks, E. P. (1987). *Documentation of Computer VS2D to Solve the Equations of Fluid Flow in Variably Saturation Porous Media*. Denver, Colorado.
- Lawson, N. (2011). The flood risk management glossary. incorporating floodsite glossary (flood-site), flood mapping manual editorial group glossary (fmmep), urban flood management glossary (ufm), and the smartest project glossary (smartest). Technical report, The University of Manchester.

- Le Quentrec, M., Ravars, J.-L., and Verdeaux, P. (2009). Le ruissellement urbain et les inondations soudaines. connaissance, prévention, prévision et alerte. Technical report, Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable.
- Lyapunov, A. (1907). Probleme général de la stabilité du mouvement. In *Annales de la Faculté des Sciences de Toulouse*, volume 9, pages 203–474. Université Paul Sabatier.
- Mah, D. Y., Putuhena, F. J., and Salim, S. (2007). Use of infoworks river simulation (rs) in sungai sarawak kanan modeling. *Journal of the Institution of Engineers, Malaysia (IEM)*, 68(1) :1–10.
- Maksimovic, C., Prodanovic, D., Boonya-Aroonnet, S., Leitao, J. P., Djordjevic, S., and Allitt, R. (2010). Overland flow and pathway analysis for modelling of urban pluvial flooding. *Journal of Hydraulic Research*, 47(4) :512–523.
- Martin, S., Deffuant, G., and Calabrese, J. M. (2011). Defining resilience mathematically : from attractors to viability. In *Viability and Resilience of Complex Systems*, pages 15–36. Springer.
- May, R. M. (1973). Qualitative stability in model ecosystems. *Ecology*, pages 638–641.
- Muzylo, A., Llorens, P., Valente, F., Keizer, J. J., Domingo, F., and Gash, J. H. C. (2009). A review of rainfall interception modelling. *Journal of Hydrology*, 370 :191–206.
- Obropta, C. C. and Kardos, J. S. (2008). Review of urban stormwater quality models : Deterministic, stochastic, and hybrid approaches. *Journal of the American Water Resources Association*, 43(6) :1508–1523.
- Ochoa Rodriguez, S. (2013). Inputs and components of urban pluvial flood models : Current theory and practice. Technical report, Raingain Project - Urban Water Research Group (Imperial College, London).
- Parliament, E. (2000). Directive 2000/60/ec of the european parliament and of the council of 23 october 2000 establishing a framework for community action in the field of water policy. Technical report, European Parliament.
- PIMM, S. and LAWTON, J. (1977). Number of trophic levels in ecological communities. *Nature*, 268(5618) :329–331.
- Pimm, S. L. (1984). The complexity and stability of ecosystems. *Nature*, 307(5949) :321–326.
- PITEL, W. (2011). Une expérience historique pour une résilience renforcée. l'exemple des villes du nord de la france (mi xvie-mi xixe siècle).
- Poincaré, H. (1892). Les nouvelles méthodes de la mécanique céleste. *Gauthier-Villars, Paris*.
- Richard, J., Giangola-Murzyn, A., Gires, A., Tchiguirinskaia, I., and Daniel, S. (2013). Gis data assimilation interface for distributed hydrological models. *HESS*.

- Rodriguez, F., Morena, F., and Andrieu, H. (2005). Developpement of a distributed hydrological model based on urban databank - production processes of urbs. Technical report, LCPC Division Eau.
- Rossman, L. A. (2010). *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.0*. Cincinnati, Ohio.
- Rossman, L. A. and Supply, W. (2006). *Storm Water Management Model, Quality Assurance Report : Dynamic Wave Flow Routing*. US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, National Research Management Research Laboratory.
- Royer, J.-F., Biauou, A., Chauvin, F., Schertzer, D., and Lovejoy, S. (2008). Multifractal analysis of the evolution of simulated precipitation over france in a climate scenario. *Comptes Rendus Geoscience*, 340(7) :431–440.
- Salagnac, J.-L., Diez, J., and Tourbier, J. (2012). From flood management systems to flood resilient systems : integration of flood resilient technologies. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*, volume 14, page 12526.
- Schertzer, D. and Lovejoy, S. (1987). Physical modeling and analysis of rain and clouds by anisotropic scaling multiplicative processes. *Journal of Geophysical Research*, 8(8) :9693–9714.
- Schertzer, D. and Lovejoy, S. (1991). *Nonlinear Variability in Geophysics : Scaling and Fractals*, chapter Nonlinear Geodynamical Variability : Multiple Singularities, Universality and Observables, pages 41–82. Kluwer Academic Publishers, Dordrech, Netherlands.
- Schertzer, D. and Lovejoy, S. (1993). Multifractal generation of self-organized criticality. In *Fractals In the natural and applied sciences*, pages 325–339.
- Schertzer, D. and Lovejoy, S. (2004). Uncertainty and predictability in geophysics : chaos and multifractal insights. *The State of the Planet : Frontiers and Challenges in Geophysics*, pages 317–334.
- Schertzer, D., Tchiguirinskaia, I., Lovejoy, S., and Hubert, P. (2010). No monsters, no miracles : in nonlinear sciences hydrology is not an outlier ! *Hydrological Sciences Journal–Journal des Sciences Hydrologiques*, 55(6) :965–979.
- Simoes, N., Ochoa, S., Leitao, J. P., Pina, R., Sa Marques, A., and Maksimovic, C. (2011). Urban drainage models for flood forecasting : 1d/1d, 1d/2d and hybrid models. *12th International Conference on Urban Drainage, Porto Alegre, Bresil, 11-16 September 2011*.
- Singh, V. P. et al. (1995). *Computer models of watershed hydrology*. Water Resources Publications.
- Soni, B., Singh, H., and Dwivedy, A. K. (1996-1997). Hydrological aspects of watershed development. Technical report, National Institute of Hydrology, Jalvigyan Bhawan, Roorkee.

- Sto Domingo, N. D., Refsgaard, A., Mark, O., and Paludan, B. (2010). Flood analysis in mixed-urban areas reflecting interactions with the complete water cycle through coupled hydrologic-hydraulic modelling. *Water Sciences and Technology*, 62(6) :1386–92.
- Sui, D. Z. and Maggio, R. C. (1999). Integrating gis with hydrological modeling : Practices, problems and prospect. *Computers, Environnement and Urban Systems*, 23 :33–51.
- Tchiguirinskaia, I., Schertzer, D., Hoang, T., and Lovejoy, S. (2011). Multifractal study of three storms with different dynamics over the paris region. In *Proceedings of Weather radar and hydrology symposium, Exeter, UK*.
- Thompson, J. R., Refstrup Sorenson, H., Gavin, H., and Refsgaard, A. (2004). Application of the coupled mike she/mike11 modelling system to a lowland wet grassland in southeast england. *Journal of Hydrology*, 293 :151–179.
- Van Collier, L. (1997). Automated techniques for the qualitative analysis of ecological models : continuous models. *Conservation Ecology*, 1(1) :5.
- van Heeringen, K.-J., Verwey, A., and Melger, E. (2002). Dutch approach to high speed urban drainage modeling with sobek. In *Proc. 9 th Int. Conf. Urban Drainage–Global Solutions for Urban Drainage*.
- Velleux, M., England, J., and P.Y., J. (2011). *TREX Watershed Modeling Framework User's Manual : Model Theory and Description*. Fort Collins, Colorado.
- Velleux, M. L., England, J. F., and Julien, P. Y. (2008). Trex : Spatially distributed model to assess watershed contaminant transport and fate. *Sciences of the Total Environment*, (404) :113–128.
- Waalkens, H. and Wiggins, S. (2010). Geometrical models of the phase space structures governing reaction dynamics. *Regular and Chaotic Dynamics*, 15(1) :1–39.
- Water Initiative, E.-U. (2003). International cooperation - from knowledge to action. Technical report, European Commission.
- Zevenbergen, C., Cashman, A., Evelpidou, N., Pasche, E., Garvin, S., Ashley, R., et al. (2010). *Urban flood management*. CRC Press Inc.

Annexes

Annexe A

« Multi-Hydro modelling to assess flood resilience across scales, case study in the Paris region » (proceedings pour la 9^{ème} édition de la conférence « Urban Drainage Modeling »)



Multi-Hydro modelling to assess flood resilience across scales, case study in the Paris region

A. Giangola-Murzyn¹, A. Gires¹, C.T. Hoang^{1,2}, I. Tchiguirinskaia¹, D. Schertzer¹

¹ Université Paris Est, Ecole des Ponts ParisTech, LEESU, 6-8 avenue B. Pascal, Cité Descartes, 77455 Marne-la-Vallée cedex 02, France

² Faculty of Energy Engineering, Vietnam Water Resources University, 175 Str Tay Son, Dong Da, Ha noi, VietNam

Abstract

Nowadays there already exists a large variety of hydrologic modelling tools. However in the context of a climate change, the management of urban areas requires an even deeper understanding of the multi-scale dynamics and complex interactions between the processes of urban water cycle. This paper discusses some new results obtained during the European project SMARTesT that promotes Smart Resilient Technology, System and Tools to help stakeholders in improving the resilience of their cities to floods.

In this way, Multi-Hydro has been developed at Ecole des Ponts ParisTech (El-Tabach et al., 2009; Giangola-Murzyn et al., 2011). This multi-module physically based model estimates for a given rainfall scenario, possibly downscaled to very high resolutions, the space-time distributions of surface water, in particular by taking into account small-scale changes in the land use. This model is based on an interactive coupling of several modules that simulate the main hydrologic and hydraulic processes. The core of Multi-Hydro manages the feedbacks from one modelling component to others. Multi-Hydro was tested on a case study in Val-de-Marne county (south-east part of Paris region, France).

Keywords

Fully distributed model, GIS data, hydrological modelling, hydrological-hydraulic modelling, multifractal analysis

1 Introduction

Due to ongoing growth of population and increasing exposure to climatic changes, urban storm water and wastewater management has become a major concern nowadays. To help engineers and managers in making everyday decisions there is a variety of modelling and planning tools that also remain very fragmented and still require a deeper understanding of the multi-scale dynamics and complex interactions of urban water cycle processes (watershed hydrology, urban ground water infrastructure and additional flood resilient elements (FRE)). With this prospective, Multi-Hydro, a fully distributed model, is currently developed at Ecole des Ponts ParisTech (see El Tabbach et al., 2009, for a description of the first version). It interactively couples several components that simulate the various hydrologic and hydraulic processes involved in a peri-urban watershed. Each component relies on existing and widely validated models available in public domain software packages. The processes modelled are rainfall, runoff, infiltration in heterogeneous soils, and drainage into sewer systems.

In this paper, a 72 ha area located in the west side of the city of Villecresnes (South of Paris) is modelled with the help of Multi-Hydro. This area corresponds to the catchment of a simplified portion of the sewer system. First, the available data is described. Second, each component of the Multi-Hydro model is presented and the interactions between them are then explained. Finally, the results of the implementation of this model on the case



study of Villecresnes enable us to discuss the importance of taking into account the impact of the land use on the elevation in a peri-urban area.

2 Case study

The raw data available for this catchment exhibit different spatial resolution. In order to be used by Multi-Hydro, the data needs to be formatted and put to same resolution. A conversion module was developed at Ecole des Ponts ParisTech (Richard et al., 2012) to facilitate the generation of the inputs of new case study from available GIS data. This module, called MH-AssimTool, runs on MapInfo software (Pitney Bowes software), enables to convert the vector data into raster data with the desired resolution. In the case of Villecresnes, we used a 10 m spatial resolution .

2.1 Surface data

The surface data is the GIS raster file of the elevation (with a resolution of 25m) and GIS vector files of the land use and soil type distribution. These data are input from a GIS database to Multi-Hydro as a series of grid whose size corresponds to the modelled area.

For this case study, eight classes (forest, grass, houses, roads, tennis court, swimming pool, greenhouses, gullies) of land use and soil are considered (Figure 1). Each class is fully characterized by its physical properties : Manning coefficient and interception depth for the land use; hydraulic conductivity, capillary suction and moisture deficit for the soil. It should be mentioned that roads, greenhouses, and tennis court are considered to have similar properties. Concerning the land use, it is essential to have a high resolution and to locate precisely the gullies. Indeed, they are key elements for the coupling between the surface and the sewer processes.

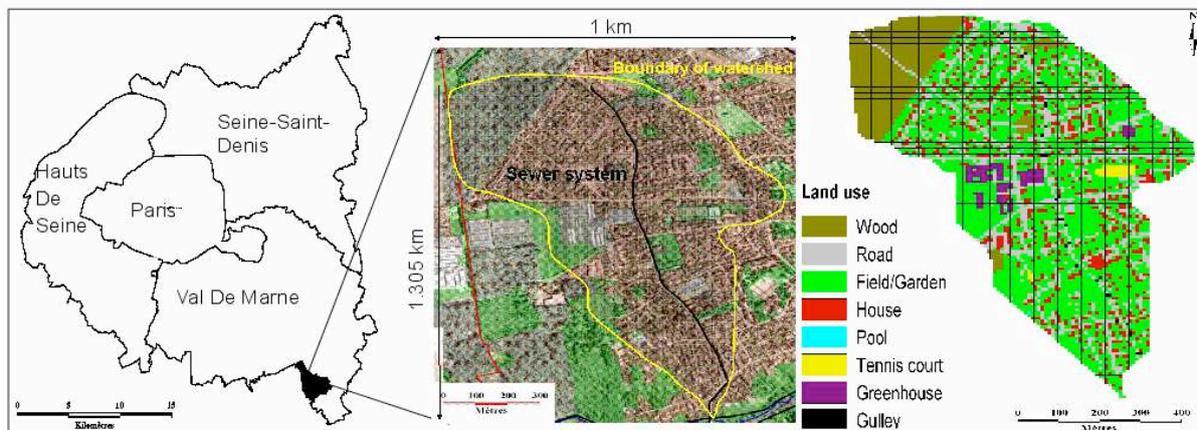


Figure 1: Location of modeling domain (Realized by Richard J.) and the land use input data

The elevation file (Figure 2) contains the elevation for each cell of the area. In our case study it ranges from 120m in the North to 50 m in the South with a rather constant gradient slope (near 7%). The collected data of elevation doesn't take into account the effect of the urbanization. To tackle this issue Multi-hydro is implemented with either the raw elevation file or a modified one, where the elevation of pixels corresponding to a house and roads land use are respectively increased by 5m and decreased by 15cm.

The initial overland water depth, infiltration depth and/or depth of the wetting front in soils are input to Mutli-Hydro on the same grid.

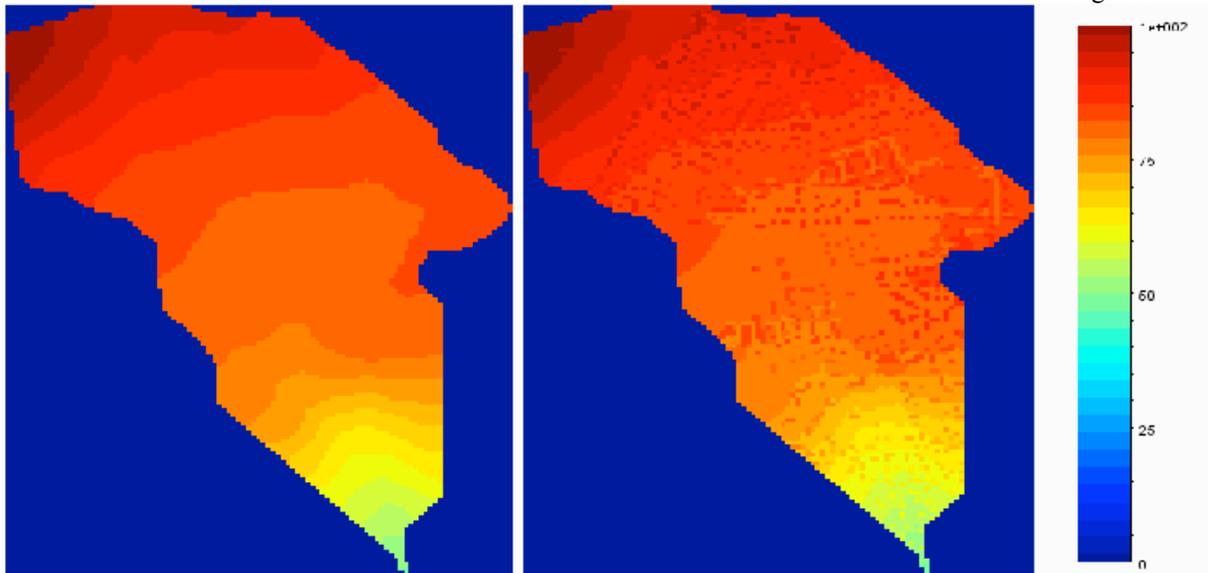


Figure 2: Example of raw elevation input data (left) and the modified elevation (right) for the Villescresnes study. The colour scale is given in meter

2.2 Sewer system input data

Concerning the sewer system, a precise description is needed to properly model its behaviour. Multi-Hydro requires the precise location of the pipes, nodes and outlets. Each conduit of the sewer system must be described by its slope, diameter, depth, capacity and shape.

In the case study of Villescresnes, the sewer system is represented by a simplified network consisting of a single linear conduit.

2.3 Subsurface input data

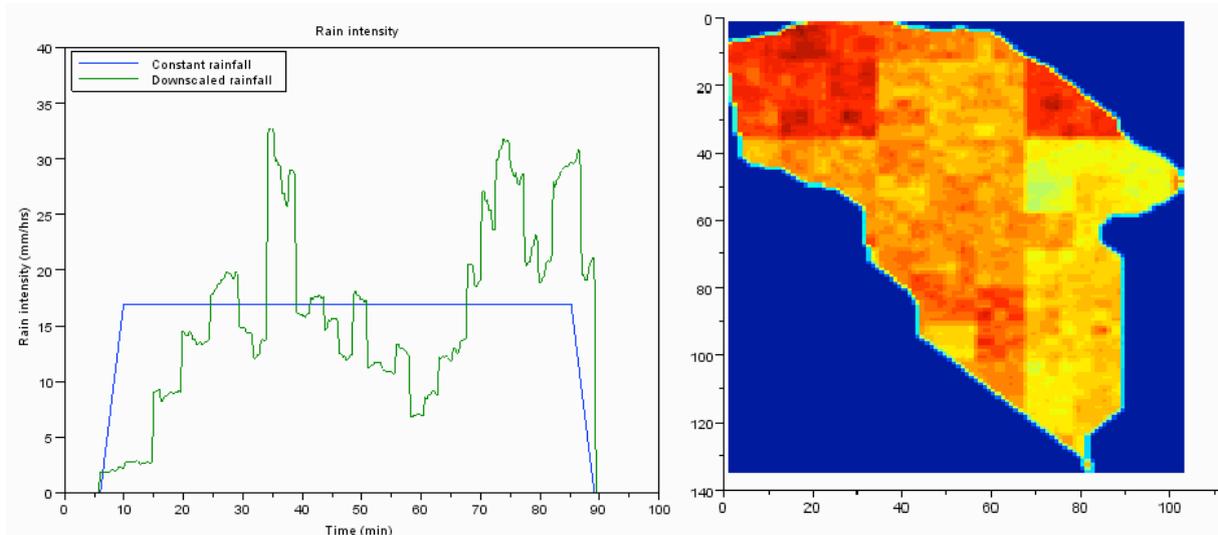
Concerning the simulation of sub-surface processes, the model needs some detailed data especially about the soils characteristic parameters. The saturated hydraulic conductivity, the specific storage, the porosity and the initial conditions (pressure head, moisture content, and relative hydraulic conductivity corresponding to the pressure head) should be defined for each textural classes of soil. To obtain better results, it is really essential to have the most detailed data available on the watershed soil. Nevertheless obtaining precise data is not easy and involves expensive and time consuming field measurement campaigns for each modelled catchment to be valid. As a consequence, in a first step the values are estimated by the values commonly found in literature. Future developments are scheduled to implement a new component to Multi-Hydro that would enable taking into account the variability of the soil.

2.4 Rainfall input data

The Multi-Hydro Rainfall Component (MHRC) enables to downscale rainfall data. Indeed the usual C-band radar resolution of $1\text{km} \times 1\text{km} \times 5\text{min}$ does not enable to fully take advantage of the high resolution distributed hydrological model (10m). The space-time downscaling is performed with the help of universal multifractals cascades (Shertzer and Lovejoy, 1987). The rainfall event studied in this paper occurred in the Paris area on February 9th, 2009. The data, whose resolution is $1\text{km} \times 1\text{km} \times 5\text{min}$, comes from the C-band radar of Trappes (East of Paris) which is operated by Météo-France. A square area of size 256 km^2 centred on the radar during about 13 hours is analysed to retrieve the relevant parameters that are necessary for the downscaling. Only 87 minutes of these downscaled data were used at first. More details about the multifractal analysis and downscaling of this process can be found in Gires et al. (2011). The results are compared with a constant (in space and time) rainfall. The hyetograph of the two type of rainfall are displayed in Figure 3. In both of case, the



total rainfall amount during the event is almost 23 mm, which roughly corresponds to a 5-year return period



rainfall in the Paris area.

Figure 3 : (left) Constant rainfall in blue and space-averaged downscaled rainfall is in green. Intensity is given in mm/hrs. (right) Map of the total rainfall in the case of the downscaled rainfall. The heaviest rainfall during the event is located in the North.

3 Description of the Multi-Hydro model

3.1 Description of each component

The Multi-Hydro Surface Component (MHSC) models the surface runoff and relies on TREX, which was developed by HydroQual Incorporate and the Colorado State University (Velleux et al., 2011). It uses spatially distributed data (hydrological network, land use, type of soil, elevation, overland storage depth and the initial conditions) to model the behaviour of the catchment.

The Multi-Hydro Ground Component (MHGC) models sub-surface processes and relies on the VS2DT model, which was developed by the U.S. Geological Survey (Lappala et al., 1987). It uses finite differences to compute the pressure head, the total head, the moisture contents and/or the saturation and the mass balance, with the help of the law of conservation of fluid mass and a non-linear form of the Darcy equation. It takes into account the structure and the composition of the soil, the amount of water entering in the system, the temperature and the initial conditions.

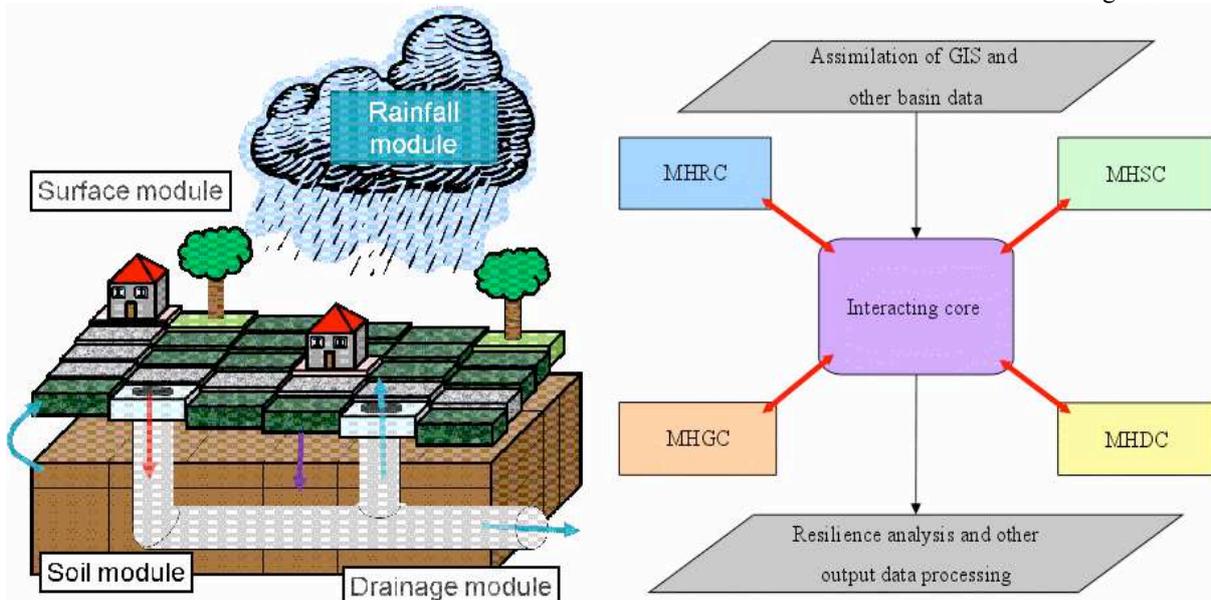


Figure 4 : multi-hydro model description and organisation of the interaction between each component of the Multi-Hydro model

The Multi-Hydro Drainage Component (MHDC) models flows in sewer systems and relies on SWMM, which is developed by the United States Environmental Protection Agency and the Camp Dresser & McKee incorporation (Rossman, 2010). The model basically relies on 1D Saint-Venant equations, which are used to dynamically simulate sewer flow. The sewer system is described in details (pipe, node, shape, length, slope, initial head, Manning's coefficient, etc).

The Multi-Hydro Rainfall Component (MHRC) was recently included and is described in SecT. 2.4.

3.2 Interactions between components

Multi-Hydro is basically a coupling core which makes all its components interact as illustrated in Figure 4. An interaction basically consists in inputting to a component the relevant outputs of another one. Indeed the outputs of MHSC are naturally used as inputs in MHGC and MHDC, and furthermore retroaction processes are modelled. Indeed the hydraulic conductivity (output of MHGC) and the state of the gullies (output of MHDC) are regularly (each 3 min the case study of Villecresnes) upgraded in MHSC. More precisely MHGC computes the effective soil saturation with the help of the amount of infiltrated water given by MHSC. A new (unsaturated) hydraulic conductivity, which enables estimating a new infiltration rate, is then computed, and the current value uploaded in MHSC. The state of the gullies controls the interaction between MHSC and MHDC. Indeed MHDC uses the amount of water entering the sewers through gullies, which is an output of MHSC, to compute discharge in the sewer system. In case of sewer overflow, the gullies cannot receive incoming water from MHSC, and furthermore become a source of water. The amount of water exiting the sewer (output of MHDC) is then input in MHSC. This interaction needs to be taken into account especially during floods when it plays a crucial role. Thus, when an overflow is produced by a gully, this one is modified in the way to stop the water to enter in the system.

Finally it should be mentioned that no feedbacks are implemented during the first 15 minutes after the beginning of the rainfall. Indeed this duration enables the interception process to take place. After these 15 minutes, the simulation continues with the implementation of the feedbacks and considering there is no longer any interception.

4 Results

Time series of numerous space-distributed outputs are generated by Multi-Hydro. For instance, concerning the surface and sub-surface hydrological processes, the surface water depth, the variation of the flows, the



infiltration rate and the cumulative infiltration depth can be retrieved for each time step and each cell of the modelled area. Hence maps of these fields can be drawn for any time step, or time evolution of these fields can be plotted for each pixel. To illustrate this, the Figure 5 displays maps of the overland water depth at the end of the constant rainfall, in the case of the “raw” elevation (right side) and in the case of the “modified” elevation (left side). The location of the water in both cases is significantly different. In the case of “raw” elevation, the water follows the thalweg and the outlet is located in the grid on the pixel row 135, column 82. With a modified elevation, the water cannot run through houses and is therefore located mainly on roads and garden. Because there are few pixels with a house land use near the topographic outlet, the water exits from the catchment through a new outlet located on pixel line 124, column 80, i.e. approximately 40m northeast from his previous location. The surface discharge at the outlet of the catchment, displayed in the Figure 6, is strongly impacted by the modification of the elevation, which confirms that the water leaves the catchment by another way. The use of the downscaled rainfall does not modify strongly the peak flow, but, the increase of the discharge during the beginning of the event is more complex than when using an homogeneous rainfall.

Figure 7 displays the discharge at the outlet of the sewer system for both raw and modified elevation and with either constant or downscaled rainfall. It appears that, with a modified elevation, the discharge is slightly greater (12 to 15% of the peak flow depending of the used rainfall). This is likely to be due to the fact that with the modified elevation, the water is drained by the roads directly to the sewer system through the gullies.

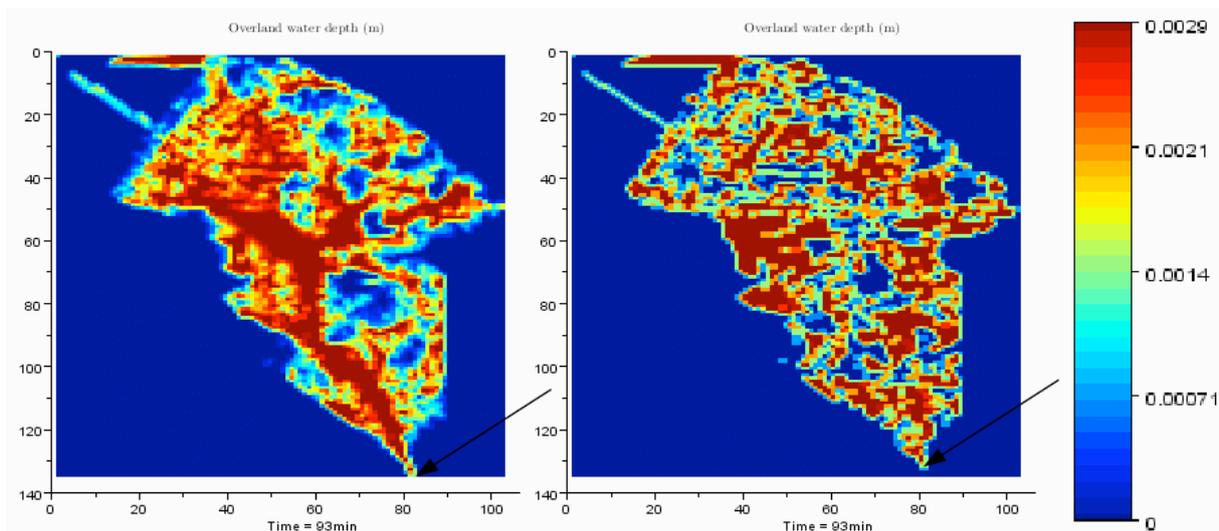


Figure 5: Maps of the overland water depth at the end of the constant rainfall event, in the case of the raw elevation (right) and in the case of the modified elevation (left) where house pixels are up by 5m and road's pixels are down by 15 cm. the black arrows shown the location of the outlet of the catchment which is different in both cases.



9th International Conference on Urban Drainage Modelling
Belgrade 2012

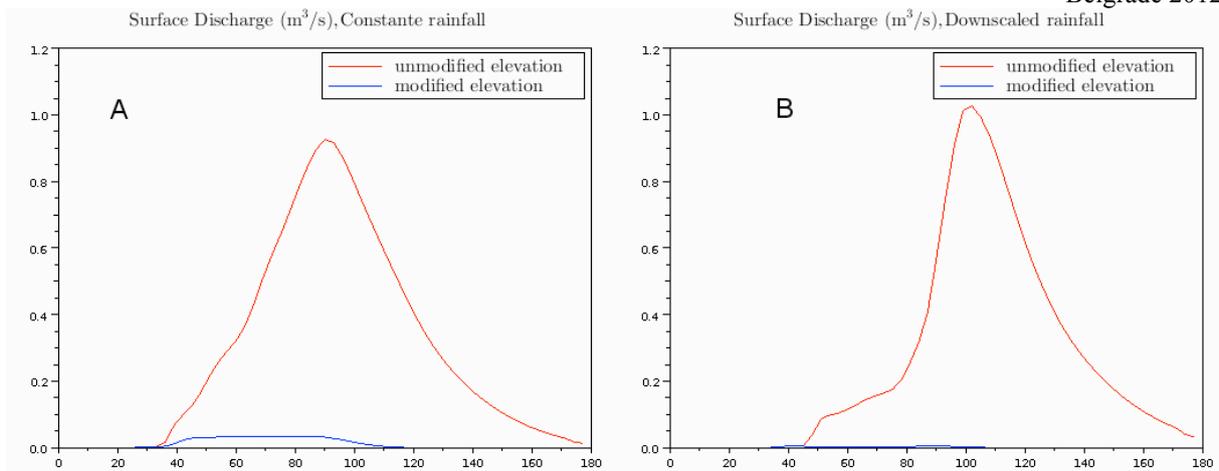


Figure 6: Overland water discharge at the outlet with the uniform rainfall (A) and with the downscaled rainfall (B). The blue curves are the discharge computed at the outlet define by the “raw” elevation and the red curves are the discharge computed at the outlet define by the modified elevation.

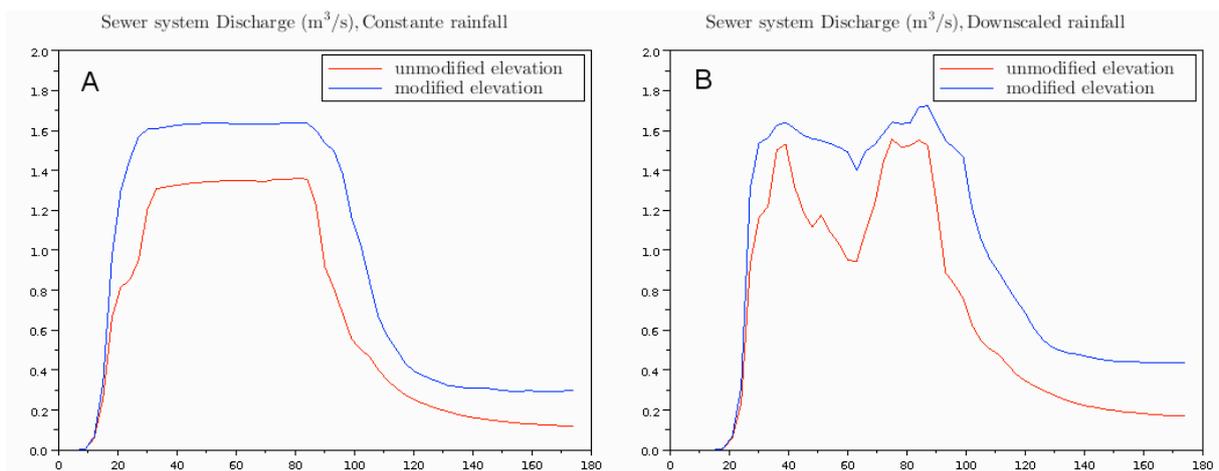


Figure 7 : Discharge in the sewer system in case of the uniform rainfall (A) and in case of the downscaled rainfall (B)

It appears that the overland water depth exhibits a strong variability which can be analyzed with the help of Universal Multifractals (Schertzer and Lovejoy, 1987). In this framework which has been extensively used on geophysical fields extremely variable over wide range of scales a field is characterized with the help of only two parameters: C_1 the mean intermittency (which measures the clustering of the (average) intensity at smaller and smaller scales. $C_1=0$ for a homogeneous field), and α the multifractality index ($0 \leq \alpha \leq 2$), which measures the clustering variability with regards to intensity level.

In the case of Villecresnes, a spatial multifractal analysis is performed on the water depth map for each time steps. The two types of rainfall inputs (uniform in space and time and downscaled) are tested in the two case of elevation. The temporal evolution of the UM parameters C_1 and α are for all the cases are displayed Figure 8. The analysis of these parameters enables to grasp the overall behaviour of the field without focusing on specific points. First it appears that these parameters do not strongly depend on the type of rainfall. On the contrary there is a strong dependence on the condition of the elevation. Indeed, with the use of the modified elevation for the house and road's pixels, the α parameter is lower than with the use of the unmodified elevation. The C_1 parameter, on the other hand, is higher during the event but is lower after it. This means, that the multifractality of the overland water depth decreases with the modified elevation and that the water depth is more



inhomogeneous during the event. This result can be explained by the fact that the water is drained by the roads and follows also the anthropic network.

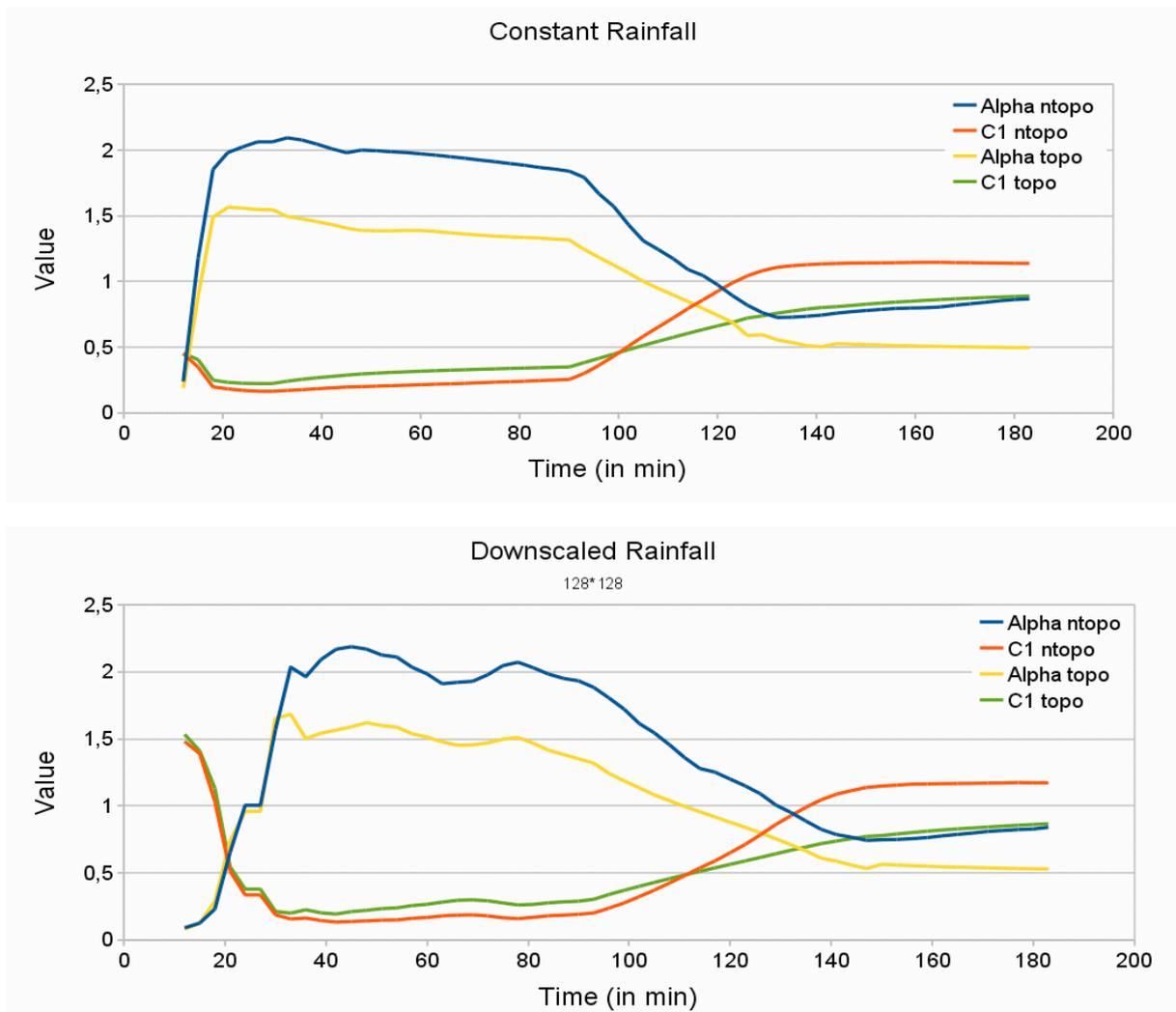


Figure 8: Evolution of the UM parameters C_1 and α . The blue and red curves are the evolution of the UM parameters in the case of the unmodified elevation, and the yellow and green curves are their evolution in the case of the modified elevation according to the land use.

5 Conclusion

The Multi-Hydro model enables modelling the interactions of urban water cycle processes. It is based on several open source software packages, each of them representing a process of the water cycle in urban areas. Each of these components, widely validated on hydrological data, interacts with others in order to compute the hydrological response of a given watershed. It is designed for being easily transposable to any peri-urban catchment. The Multi-Hydro model requires high-resolution spatially distributed data (mainly GIS data) and provides detailed information about surface runoff, subsurface flow, and sewer discharge.

In this paper the influence of two parameters was analysed on the 72 ha case study of Villecresnes (Paris region): the rainfall input (uniform in space and time or distributed) and the modification or not of the elevation regarding the land use. Both of these parameters have a significant impact on the response of the catchment. Firstly, the modification of the elevation implies a change in the location of the surface outlet of the catchment, and an important change in the discharge in the sewer system. Secondly, the use of a downscaled rainfall does not significantly modify the overall peaks of the runoff and in the sewer discharge but yield increased loads at different locations. This shows the need to take into account small scale phenomena in urban hydrology.



9th International Conference on Urban Drainage Modelling
Belgrade 2012

As shown in this paper, Multi-Hydro is able to reproduce the effects of small changes in the land use of the considered catchment which means that it can be used to analyse the impact of the implementation of a measure of resilience. Indeed, at small-scale (with a resolution of 1m for example), a barrier could be represented as a group of pixels whose elevation is increased by the height of the barrier. For instance the increase of the elevation of the house pixels corresponds to successful, individual protection measures, (e.g. door and window barriers). However, a more detailed analysis of these measure would require a more refined modelling of the house's pixel.

The Multi-Hydro model is currently tested on other case studies, in the Paris area and in countries of the SMARTeST project partners. This is done in association with a social analysis of the decision process during a flood. The output of the Multi-Hydro model can be used as input data for the cost-benefit models developed by the other partners of the project, providing therefore an economical dimension of the flood modelling.

6 Acknowledgement

The authors acknowledge financial support from the EU FP7 SMARTeST project.

7 REFERENCES

- El-Tabach, E., I. Tchiguirinskaia, O. Mahmood and D. Schertzer (2009). Multi-Hydro: a spatially distributed numerical model to assess and manage runoff processes in peri-urban watersheds. Road Map Towards a Flood Resilient Urban Environment. E. Pascheet al. Hamburg, Hamburger Wasserbau-Schriften.
- Gires, A., et al., Impact of unmeasured rainfall variability on urban discharge: a case study in a multifractal framework. *Houille Blanche-Revue Internationale De L Eau*, 2011(4): p. 37-42.
- Lappala E.G., Healy R.W., Weeks E.P. (1987), Documentation of Computer Program VS2D to Solve the Equation of Fluid Flow in Variably Saturated Porous Media. U.S. Geological Survey, Denver, 184p.
- Richard J., Tchiguirinskaia I. And Schertzer D. (2012), GIS data assimilation interface for distributed hydrological models. Hydro-Informatics Conference, Hamburg 14-18 July 2012, Germany.
- Rossman L.A. (2010), Storm Water Management Model, User's Manual. Version 5.0. U.S. Environmental Protection Agency, EPA/600/R-05/040.
- Schertzer, D. and S. Lovejoy (1987). "Physical modeling and Analysis of Rain and Clouds by Anisotropic Scaling Multiplicative Processes." Journal of Geophysical Research D 8(8): 9693-9714.
- Van Genuchten M.Th. (1980). A closed-form equation for the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 44, 892-898.
- Velleux M.L., England J.F., Julien P.Y. (2011), TREX Watershed Modelling Framework User's Manual: Model Theory and Description. Department of civil engineering, Colorado State University, Fort Collins, January, 106p.

8 questionnaire

1. Name of the author that will present the paper: Giangola-Murzyn Agathe

(please note that one author can have only one oral and one poster presentation at the Conference)

2. Is the first author an young researcher (according to IWA, under the age of 35): ~~Yes~~/No

3. Have you submitted the extended abstract yet: Yes/~~No~~

If **Yes**, give the file name of extended abstract: EA230-GiangolaMurzynAgathe-MultiHydro.doc

4. Have you previously published this paper at another conference or Journal: ~~Yes~~/No

5. Do you want to have the full paper offered for the Journal:



9th International Conference on Urban Drainage Modelling
Belgrade 2012

Water Science and Technology: Yes/~~No~~

Journal of Hydraulic Research: Yes/~~No~~

Other Journal: _____

6. Have you checked your paper for style, formatting and English language: **Yes**/~~No~~

Annexe B

« Impacts of small scale rainfall variability in urban areas : a case study with 1D and 1D/2D hydrological models in a multifractal framework » (soumis Urban Water Journal)

Impacts of small scale rainfall variability in urban areas: a case study with 1D and 1D/2D hydrological models in a multifractal framework

Auguste Gires¹, Agathe Giangola-Murzyn¹, Jean-Baptiste Abbes¹, Ioulia Tchiguirinskaia¹, Daniel Schertzer¹, and Shaun Lovejoy²

¹Université Paris Est, École des Ponts ParisTech, Leesu, 6-8 Avenue Blaise Pascal, 77455 Marne La Vallée

²McGill U., Physics dept., Montreal, PQ, Canada

Abstract

In this paper the sensitivity to small scale unmeasured rainfall variability (i.e. at scales smaller than $1\text{km} \times 1\text{km} \times 5\text{min}$ in time, which are usually available with C-band radars) of a 1D/2D model with a 10 m resolution and a semi-distributed 1D model of the same 1.47 km^2 urban area is analyzed. The 1D/2D model is the open source numerical platform Multi-Hydro, which couples (open source) distributed models of involved hydrological/hydraulic. The methodology implemented to evaluate the uncertainties consists in generating an ensemble of realistic rainfall fields downscaled to a resolution of 12.3 m in space and 18.75 s in time with the help of a stochastic universal multifractal model. The corresponding ensemble of hydrographs is then simulated. It appears that the uncertainty is significant and that Multi-Hydro unveils much more uncertainty than the simpler 1D model. This points out a need to develop high resolution distributed modelling in urban areas.

Keywords: Rainfall variability, 1D/2D modelling, multifractals, space-time downscaling

1 Introduction

Rainfall variability has a significant impact on river discharges (see Singh, 1997, for a review). This impact is enhanced in urban areas where the response times of catchments are shorter and the coefficient of imperviousness are larger meaning that a significant fraction of the rainfall is immediately active (Aronica and Cannarozzo, 2000; Segond et al., 2007). The under-representation of rainfall variability in input data of models affects the confidence one should have in its predictions. A better understanding of rainfall variability in urban areas and its impact on simulated flow is needed both theoretically and operationally. Indeed Real Time Control (RTC, see Schütze et al., 2004, for a review of its rapid development over the last decades) of sewer networks, which aims at reducing urban flooding and pollution, relies on the use of such models.

In recent papers Gires et al. (2012a, 2012b) quantified the impact of small scale unmeasured rainfall variability (i.e. at scales smaller than the C-band radar resolution of $1\text{ km} \times 1\text{ km} \times 5\text{ min}$, which is usually provided by national meteorological services of Western Europe countries) on urban discharges simulated with the help of semi-distributed urban hydrological / hydraulic 1D models. Two urban areas were studied: a 3400 ha one located near Paris and a 900 ha one located in the North of London. The methodology implemented relies on the generation and analysis of realistic ensembles: (i) generation of an ensemble of realistic rainfall fields through a stochastic multifractal downscaling of the radar data, (ii) Simulation of the corresponding ensemble of hydrographs with a semi-distributed 1D model, (iii) Quantification of the variability among these ensembles. A limitation of these works was that the size of the sub-catchments (roughly 17 ha on average), which are considered as homogenous objects, did not enable to fully

grasp the actual rainfall spatial variability. In this paper we implement the same methodology on a portion of size 144 ha of the previous Paris area case study (see Figure 1). Two types of models are used: the same semi-distributed operational one and a 1D/2D fully distributed one called Multi-Hydro. It is a numerical platform currently being developed at Ecole des Ponts ParisTech and validated in the framework of FP 7 SMARTeST European Project (v1 El Tabach et al., 2009; v2 Giangola-Murzyn et al., 2012). The aim of the paper is mainly to develop a methodology to take into account small scale unmeasured rainfall variability, and test how two different models quantify the associated uncertainty on a single rainfall event.

The rainfall event and data are described in section 2.1. Section 2.2 briefly presents of Multi-Hydro. The 144 ha studied urban area denoted Kodak catchment and its representation with the two models is presented in section 2.3. Section 2.4 describes the implemented methodology. Results are discussed in section 3.

2 Data and methods

2.1 Rainfall data

The three rainfall events studied in this paper occurred over the Paris area on February 9th, 2009, August 15th 2010 and December 15th 2011. In the following they will simply be denoted 2009, 2010 and 2011 event. The rainfall data is the Météo-France radar mosaic whose resolution is 1 km in space and 5 min in time. The rainfall rate R is basically computed from the radar reflectivity Z with the help of a standard $Z = aRb$ relationship with $a=200$ and $b=1.6$ (Z in $\text{mm}^6.\text{m}^{-3}$ and R in $\text{mm}.\text{h}^{-1}$). Details about the additional corrections which are implemented can be found in Tabary (2007). The studied catchment is located at approximately 45 km of the C-band radar of Trappes (West of Paris) meaning that the rainfall estimates are still reliable (Tabary, 2007). The temporal evolutions of the average rain rate over the Kodak catchment are displayed Fig. 2. The total rainfall depths for the 2009, 2010 and 2011 event are respectively 8.3 mm, 56.5 mm and 23.8 mm for durations of approximately 6 h, 30 h and 12 h. These events are significant especially the last two, but over a duration of 1 or 4 hour, none has a return period greater than 1 year (data from a rain gauge located in the Paris area that was available to the authors was used to confirm that).

2.2 Short presentation of Multi-Hydro

There is a growing interest for taking into account more precisely the interactions between surface and sewer flow in the field of urban hydrology (Hsu et al., 2000; Jankowsky, 2011; Leandro et al., 2009; Maksimović et al., 2009; Rodriguez et al., 2008). In that context, Multi-hydro is a numerical platform currently under development that makes interact several open source software packages each of them representing a portion of the water cycle in urban environment. The second version that is used in this paper consists in an interactive coupling between a 2D model representing surface runoff and infiltration (TRES, Two dimensional Runoff, Erosion and eXport model, Velleux et al., 2011) and a 1D model of sewer networks (SWMM, Storm Water Management Model, Rossman, 2010). Only the hydraulic part of SWMM is used to model water flow in pipes, and not the hydrologic one. The main input data is a precise description of the sewer network, the topography, and the land use distribution. In this case study six different classes of land use are used (wood, grass, water, roads, building and gullies), each being fully characterized by its hydraulic conductivity (m/s), capillary suction (m), moisture deficit (no unit, ranging from 0 to 1), Manning coefficient ($\text{s}.\text{m}^{-1/3}$) and depth of interception (mm). With regards to the land use distribution only one class can be affected to each pixel. Therefore, as a pixel usually contains several types of land use, an order of priority must be set to determine the land use of a pixel actually containing several ones (in the vector GIS data). The order set here is gully, road, buildings, water, wood and grass. The influence of this feature will be discussed in the following. Concerning the topography the digital terrain model used was provided by the Institut National de l'Information Géographique et Forestière (<http://professionnels.ign.fr/>), and does not take into account anthropogenic elevation modification (buildings are removed from the raw data coming from field measurements). The

elevation used in Multi-Hydro is an interpolation of this data whose initial spatial resolution is 25 m with a vertical resolution of 1 m. As a consequence, the raw elevation of the road pixels is decreased by 15 cm and the building pixels one is increased by 5 m to prevent water from running through these pixels. The rainfall collected by the building pixels is directly routed to the nearest gully. The interactions between the sewer system and surface flow are handled through the gullies where water can circulate in both ways, i.e. from surface to sewer in standard situation, and the other way in case of sewer overload. More details about Multi-Hydro can be found in Giangola-Murzyn et al. (2012). The data is formatted for Multi-Hydro from commonly available GIS data with the help of an in-house developed tool called MH AssimTool (Richard et al., 2012). This enables to (rather) easily implement the model on a new catchment.

2.3 Studied catchments and their representation with the help of two models

The catchment (denoted Kodak catchment after) which is mainly studied i.e. where the impact of small scale rainfall variability is tested, is a roughly 1.4-1.5 km² urban area located in the city of Sevran (Seine-Saint-Denis county, North-East of Paris). The area is rather flat with an elevation difference of only 11 m between the highest point and the outlet. This area is known for regular sewer flooding and there is a project to build a storm water storage basin to limit them. The basin will also enable to reduce water transfer during heavy rainfall to the downstream area just north of it which suffers frequent pluvial flooding. There is a flow gauge in the conduit above the park which corresponds to a former Kodak factory (see Fig. 1). It drains all the East part of the catchment (about 2/3 of the total area). The operators of the gauge told us that the accuracy of the flow measured by this gauge is not very good because it is located just downstream a screen. It was actually initially installed to study the flow features just downstream this screen. There is unfortunately no data available to assess the uncertainty associated with this measurement. Figure 2.b displays the land use distribution for pixels of size 10 m x 10 m for which most of the study will be carried out.

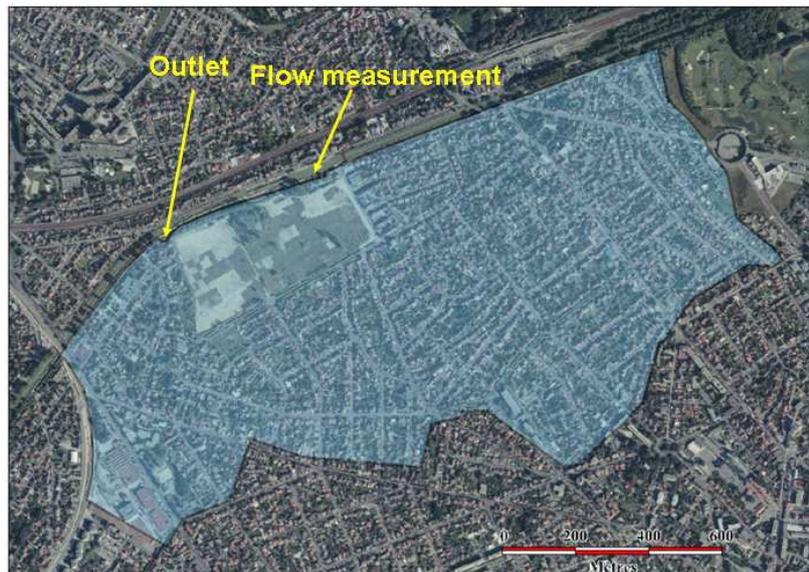


Figure 1: Picture of the 144 ha Kodak catchment, located in the city of Sevran (North-East of Paris).

The Direction Eau et Assainissement of Seine-Saint-Denis (DEA 93, the local authority in charge of urban drainage) calibrated and runs operationally the semi-distributed 1D model Canoe (Alison, 2005) on this area. In Canoe the hydrologic response of each sub-catchment is modelled with the help of a lumped model (a linear reservoir) and the flow in the pipes is modelled with the help of a numerical solution of Saint-Venant equations. The studied area (see

Figure 2.d) is divided into 16 sub-catchments whose size is ranging from 4 to 14.5 ha. The total area studied with the 1D model is 1.39 km² (the difference with Multi-Hydro come from side effects), and the average coefficient of imperviousness is equal to 53%.

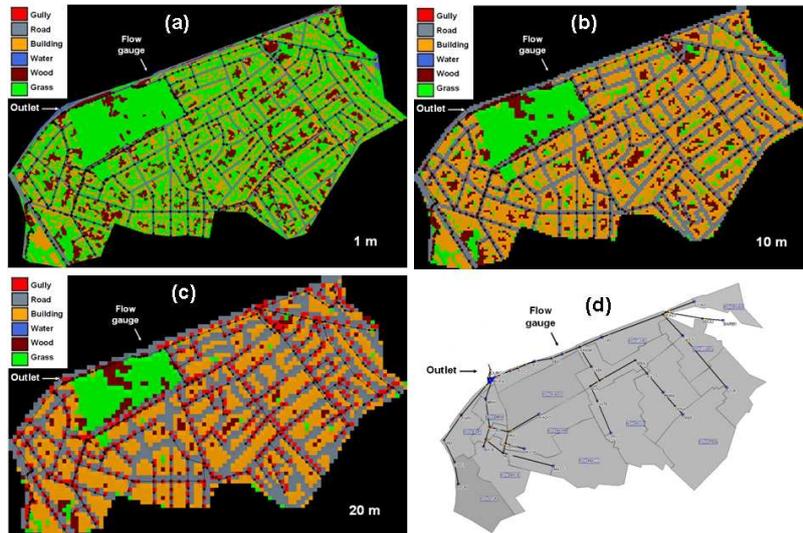


Figure 2: (a) Map of the land use distribution inputted in Multi-Hydro for the Kodak catchment with pixels of size 1 m x 1 m. The sewer network modelled with SWMM is superposed to this map (the nodes and conduits are visible along most of the roads). (b) As is (a) with pixels of size 10 m x 10 m. (c) As is (a) with pixels of size 20 m x 20 m. (d) Snapshot of the representation of this area with the 1D model Canoe. The sub-catchments and the modelled sewer network are visible.

Another catchment called “Loup catchment” is studied in this paper to validate the Multi-Hydro model. It is a 0.5 km² area also located in Seine-Saint-Denis County few kilometres North-East of the Kodak catchment. It is mainly an industrial area with a small portion of housing estate. The area is rather flat with an elevation difference of only 12.5 m between the highest point and the outlet. Figure 3 displays its representation in Multi-Hydro with pixels of size 10 m x 10 m, and the sewer network. The outlet of the catchment is the roundabout visible in the South-West portion of the catchment. It is actually a storm water storage basin managed by the DEA 93, which receives water only from this catchment. At the beginning of an event, the outlet gate of the basin is closed, which means that the water volume contained in the basin (measured with the help of water level gauge coupled with a precise geometrical description of the basin) corresponds to the one generated by the Loup catchment. The temporal evolution of this volume will be compared to the cumulated flow simulated with the help of Multi-Hydro at the outlet of the Loup catchment.

2.4 Methodology

In order to quantify the uncertainty associated with small scale unmeasured rainfall variability, the following methodology is implemented for each event: (i) An ensemble of 100 realistic downscaled rainfall fields with a resolution of 12.3 m in space and 18.75 s in time is generated. For the semi-distributed model, given the size of the homogeneous sub-catchments, the rainfall was only downscaled only to 111 m in space and 1.25 min in time. (ii) The corresponding ensemble of hydrographs is then simulated for each model. (iii) The variability among the hydrographs is characterized with the help of the envelop curves $Q_{0.1}$, $Q_{0.25}$, $Q_{0.75}$ and $Q_{0.9}$, which are respectively made of the 10, 25, 75 and 90% quantiles (in m³/s) estimated for each time step. Finally we compute for the peak flow a pseudo coefficient of variation defined as:

$$CV' = \frac{Q_{0.9}(t_{PF,radar}) - Q_{0.1}(t_{PF,radar})}{2 * PF_{radar}} \quad (1)$$



Figure 3: Map of the land use distribution inputted in Multi-Hydro for the Loup catchment with pixels of size 10 m x 10 m. The sewer network modelled with SWMM is superposed to this map (the nodes and conduits are visible along most of the roads). Satellite image the catchment (lower right)

where PF_{radar} is the peak flow simulated with the raw radar data and $t_{PF,radar}$ is its time of occurrence. This is a quantitative indicator of the uncertainty associated with small scale rainfall variability for the peak flow which is of prime importance for urban hydrologists.

The downscaling technique relies on the framework of Universal Multifractals (Schertzer and Lovejoy, 1987), which has been extensively used (Schertzer and Lovejoy, 2011, for a recent reviews; Lima and Lima, 2009; Verrier et al., 2010, for applications in hydrology) to analyse and simulate geophysical fields extremely variable over wide range of scales. In this framework it is assumed that rainfall is generated through a space-time multiplicative cascade process characterized with the help of only two parameters; C_1 the mean intermittency (which measures the average sparseness of the field) and α the multifractality index (which measures the variability of the intermittency when considering intensities slightly different from the average field). The downscaling implemented in this paper simply consists in stochastically continuing the cascade process that is assessed over the available data. No data on these events was available to confirm the validity of the multifractal framework down to scale of 12.3 m and 18.75 s. However Mandapaka et al. (2009) showed with the help of Lidar data that rainfall exhibited a scaling behaviour down to 1 m in space and 1 s in time. Discrete cascades are used. The UM parameters used here are $\alpha = 1.8$ and $C_1=0.1$ which corresponds to the ones usually found focusing the analysis on the rainy portion of the rainfall field (De Montera et al., 2009; Mandapaka et al., 2009; Verrier et al., 2010; Gires et al., 2013a). More details on the downscaling process can be found in Gires et al. (2012b). A validation of the downscaling model with the help of two dense networks of 16 disdrometers or rain gauges deployed over a 1 km² area in respectively Switzerland and United Kingdom is suggested in Gires et al. (2013b)(submitted). More details on the simulation of Universal Multifractal fields can be found in Pecknold et al. (1993) and Lovejoy and Schertzer (2010).

3 Results and discussion

3.1 Models validation

Before discussing the issue of the validation of the models, it is required to address the question of the resolution of Multi-Hydro, i.e. the size of its pixels. Indeed as mentioned before, Multi-Hydro is developed so that a single land use class is affected to each pixel, and therefore an order

of priority is set to determine the class of a pixel. An illustration of this feature is given Fig. 2 which displays the land use distribution for various sizes of the pixels. Significant differences are visible. For example the gardens attending the houses are almost not visible with pixels of size 20 m x 20 m whereas they are with pixels of size 1 m x 1 m. These differences result in hydrological consequences. An illustration is the percentage of impervious area (pixels gully, road and buildings), which reflects the portion of storm water rapidly active. It is equal to 87, 83, 77, 63, 53, 47, 40 % respectively for pixels of size 20, 15, 10, 5, 3, 2, 1 m. The size of the modelled area ranges from 1.49 km² with a 20 m pixels to 1.42 km² with 1 m pixels. It is interesting to note that such behaviour is rather standard of a fractal set. Such set is characterized by a fractal dimension DF defined with the help of the following equation:

$$N_\lambda \approx \lambda^{D_F} \quad (2)$$

Where N_λ is the number of boxes of size l needed to completely cover it and λ is the resolution ($\lambda = \frac{L}{l}$, with L the outer scale of the set). Here N_λ was computed on the impervious pixels of a 1024 m x 1024 m area of the 1 m grid (Figure 2.a). The straight line (R^2 greater than 0.99) reflects that it is a fractal set, and the slope equal to 1.85 corresponds to the fractal dimension (Fig. 4). The fact that the impervious areas exhibit a fractal behaviour suggests that such tool should be used more frequently in order to first characterize urban environment and then model it. This is nevertheless not the scope of this paper which focuses on the rainfall input to investigate more in-depth this issue.

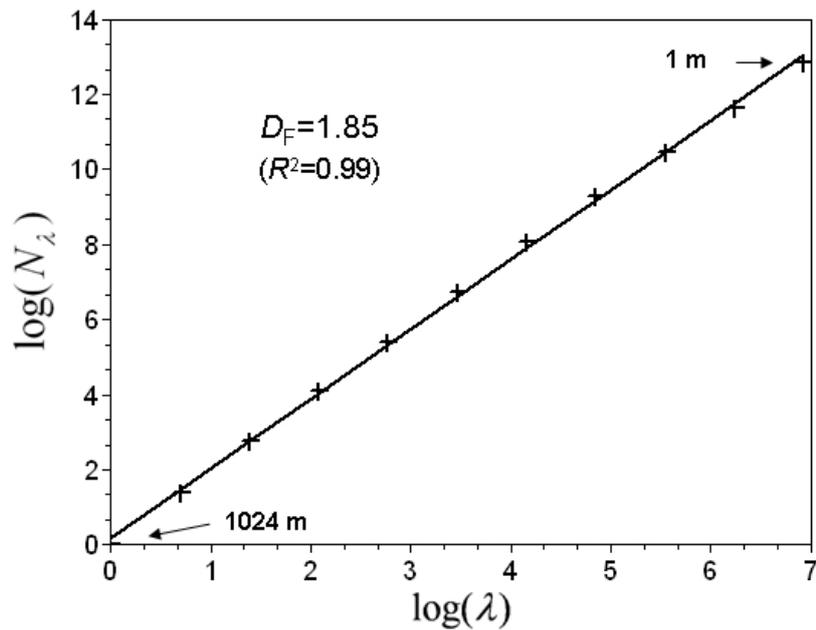


Figure 4: Estimation of the fractal dimension (Eq. 2 in a log-log plot) of the impervious portion of the Kodak catchment.

This feature of one single land use class per pixel is a limit of Multi-Hydro, but also a strength since this simple rule enables to develop an automatic process to generate input data from available GIS data which make the model easily transportable. The selected resolution of Multi-Hydro results from a trade off between the computation time (with increases non-linearly with decreasing pixel size), the quality of the available land use distribution (a non-obvious issue at high resolution in urban areas!) and the desired accuracy according to the application. In this paper Multi-Hydro is used with pixels of size 10 m x 10 m and 5 m x 5 m for the Kodak catchment, and only 10 m x 10 m for the Loup catchment. Multi-Hydro is implemented without any calibration, i.e. standard values for the 5 parameters describing a land use class are used (Giangola-Murzyn et al., 2012). For the Kodak catchment the resolution of Canoe corresponds roughly to pixels of size 300 m (obtained simply by taking the square root of the catchment area

divided by the number of sub-catchments). The average coefficient of imperviousness is equal to 53% which roughly corresponds to the value found with pixels of size 3 m in Multi-Hydro.

Let us first compare the temporal evolution of the flow simulated with the different models (Multi-Hydro 10 m and 5 m, and Canoe) and the flow measurements (see Figure 2 for the location of the flow gauge) for the Kodak catchment and the 2009 event (the only one for which flow measurements are available). Hydrographs are displayed in Figure 6. It should be emphasised that this rainfall event does not generate any sewer overflow. The curves for the different models exhibit rather comparable patterns. The differences in terms of numerical values are essentially due to the variations of the percentage of impervious area. There is no significant time shift between these curves. Concerning the comparison with the measurements, the Nash-Sutcliffe coefficient is equal to 0.40 for MH 10m, 0.68 for MH 5m, and 0.78 for Canoe. The three models react too quickly at the beginning of the rainfall which is likely to be due to a misrepresentation of the initial losses. The three models also miss the first measured peak (slightly before 5h of simulations). There is no clear explanation for this, but it could be due to errors in the rainfall measurements (possible for this event, see comments on next paragraph) or the flow measurements which are known to be not very accurate here. Anyway more events should be tested to properly validate these models.

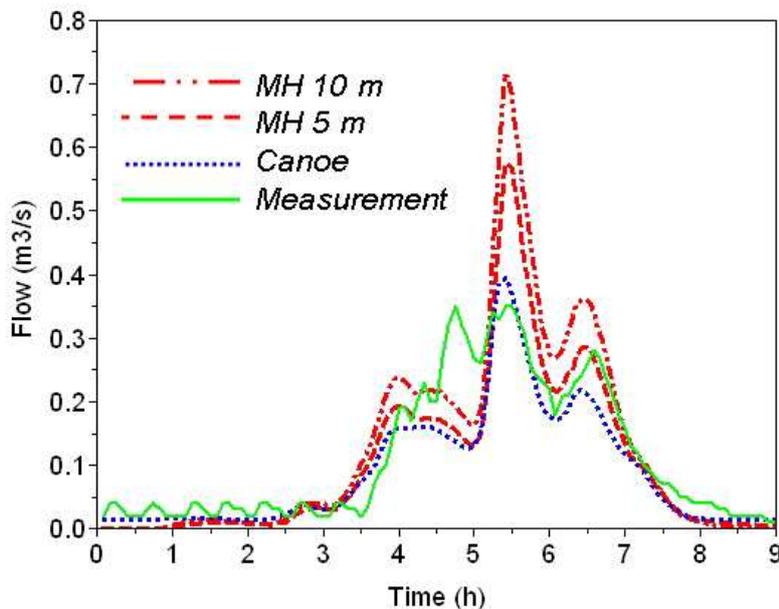


Figure 5: Comparison of measured flow and the simulated one by the different models for the Kodak catchment (see Fig. 1 for the location of the flow gauge where roughly 2/3 of runoff water of the catchment is routed)

Multi-Hydro was also tested with pixels of size 10 m x 10 m on the Loup catchment. With this resolution, the percentage of impervious areas is of roughly 90%. No additional calibration was done on Multi-Hydro and the same parameter set as for the Kodak catchment was used. Figure 6 displays the volume measured in the storage tank, and the simulated one for the three events with raw radar data and also with the data from a rain gauge located 1 km away from the catchment. The simulated volume is the cumulative flow at the outlet. For the 2011 event, the agreement is good. The 2010 event lasted 30 h, hence water was released from the storage tank during that time, which is why three portions had to be selected to compare measurements and simulations. The overall agreement is acceptable. During the first portion, Multi-Hydro overestimates volumes. During the second one, measurements are between simulations with radar and rain gauge data. For the third one Multi-Hydro tends to slightly overestimate volume. For the 2009 discrepancies between radar and rain gauge measurements are the greatest and the measurements (until water is released from the tank after 8 h) are between the two simulations. This suggests that there might be some issues with regards to the rainfall estimation for the

2009 event which might explain partially the discrepancies of Fig. 5.

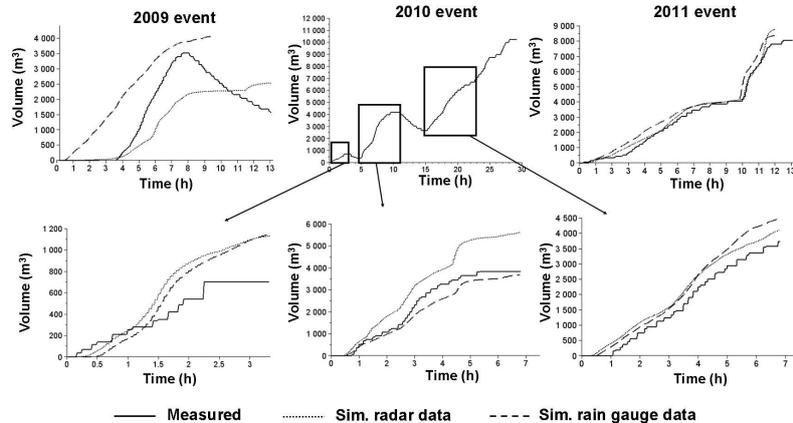


Figure 6: Comparison of the cumulated flow simulated with Multi-Hydro and observed for the Loup catchment.

The aim of the paper is not to reach the perfect model, but only to have enough confidence in the models so that it makes sense to analyse their sensitivity to the rainfall input resolution. The results of the previous paragraphs show that the models are roughly consistent and that it is therefore legitimate to use them for the purpose of the paper.

3.2 Uncertainty associated with small scale rainfall variability for various rainfall events and the Multi-Hydro model

Figure 7 displays the flow simulated with raw radar data ($Q_{r,adar}$) and the uncertainty intervals ($Q_{0.1}$, $Q_{0.25}$, $Q_{0.75}$ and $Q_{0.9}$) for five conduits obtained for the 2009 event with Multi-Hydro 10 m. The analysis was performed with pixels of size 10 m x 10 m even though the simulated flow might be less accurate than with smaller pixels like 5 m x 5 m because the computation time for each sample is much smaller (roughly 1h versus 4h on standard laptop). Before going on, it should be mentioned that the observed differences between the hydrographs are not due to variations in the total rainfall amount, but to variations in the spatio-temporal distribution of rainfall. Indeed for the 2009 event the raw radar total rainfall amount is of 8.2 mm, whereas it is of 8.3 mm on average with a CV' (defined as the difference between the 95% and 5% quantile divided by twice the radar total volume) equal to 3.4% for the generated downscaled rainfall fields. For the 2010 event the corresponding values are respectively 56.5 mm, 56.5 mm, and 1.6%. For the 2011 event the corresponding values are respectively 23.8 mm, 23.9 mm and 3.5%. These disparities are much smaller than the ones observed on the simulated discharges even at the outlet (the smallest computed CV' is equal to 15 %). Figure 8 enables to analyse the uncertainty according to the position (i.e. upstream or downstream) of the conduit in the sewer network. As expected the uncertainty increases with upstream conduits. For the February event the computed CV' ranges from 15 % for the outlet to 38 % for the most upstream selected conduit. These values are rather elevated, and suggest that a better rainfall input would result in a significant decrease on the uncertainty of the simulated flow. It means that a better rainfall input would help local authorities better cope with real time management of sewer flooding. Moreover it should be noted that these significant levels of uncertainties are observed for a moderate rainfall event, which was not necessarily expected. It suggests that higher resolution rainfall would also be needed to improve real time management of water quality.

With regards to the other events, Figure 8 displays the flow simulated with raw radar data ($Q_{r,adar}$) and the uncertainty intervals ($Q_{0.1}$, $Q_{0.25}$, $Q_{0.75}$ and $Q_{0.9}$) for the outlet for the three selected events. For the 2011 event CV' ranges from 21 % for the outlet to 61 % for the most upstream selected conduits (same as in Fig. 7). The values are respectively 18 % and 43 % for the 2011 event. These results are qualitatively similar to the ones obtained for the

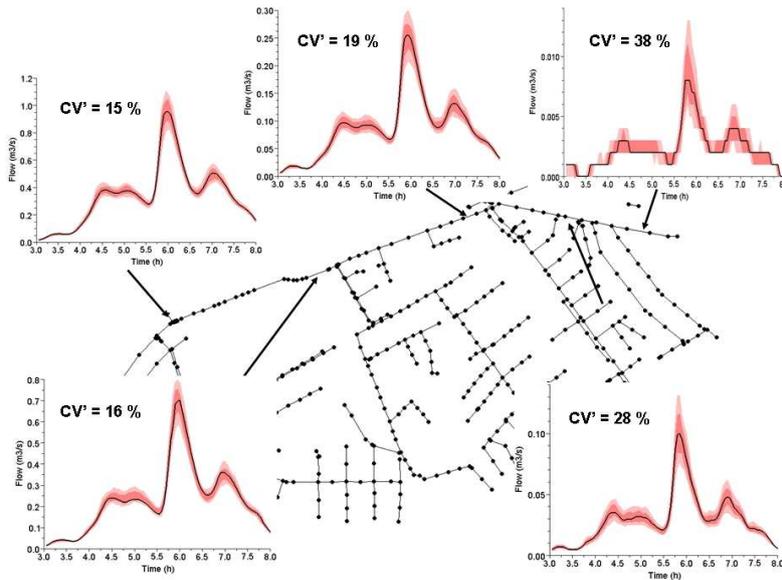


Figure 7: Simulated flow with the raw radar data (black), $Q_{0.25}$ and $Q_{0.75}$ (dark colour), $Q_{0.1}$ and $Q_{0.9}$ (light colour) for 5 conduits of the Kodak catchment with the help of the Multi-Hydro 10 m model for the 2009 rainfall event.

2009 event which confirms the conclusions of the previous paragraph. It even appears that the uncertainty associated with small scale rainfall variability tends to be greater for heavier event.

3.3 Comparison of uncertainty computed by the two models

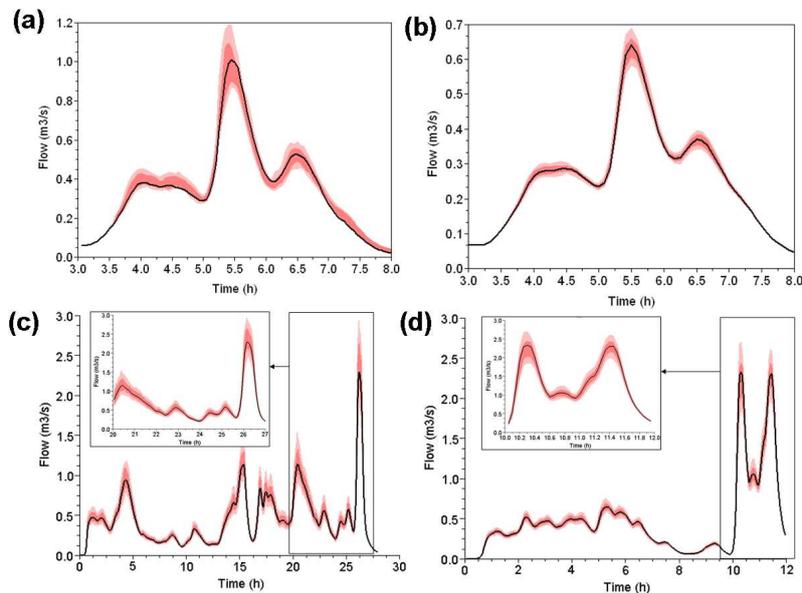


Figure 8: Simulated flow with the raw radar data (black), $Q_{0.25}$ and $Q_{0.75}$ (dark colour), $Q_{0.1}$ and $Q_{0.9}$ (light colour) for the outlet of the Kodak catchment. (a) Multi-Hydro 10 m, 2009 event; (b) 1D model, 2009 event; (c) Multi-Hydro 10 m, 2010 event; (d) Multi-Hydro 10 m, 2011 event;

	$\alpha = 1.8, C_1 = 0.1$ ($\gamma_s = 0.5$)	$\alpha = 1.8, C_1 = 0.05$ ($\gamma_s = 0.36$)	$\alpha = 1.4, C_1 = 0.1$ ($\gamma_s = 0.43$)	$\alpha = 0.6, C_1 = 0.1$ ($\gamma_s = 0.22$)
Up-stream conduit	42.9	30.3	46.4	39.3
Middle conduit	16.7	13.5	15.7	14.3
Outlet	18.2	9.7	14.0	12.4

Table 1: Values of computed CV' for three links (the links are the two extreme ones and the middle one that are selected for Fig. 8) for various UM parameters set.

The flow and its uncertainty simulated with the help of the 1D semi-distributed model at the outlet of the Kodak catchment for the 2009 event is visible Fig. 8(b). It appears that the uncertainty intervals are much larger with Multi-Hydro than for the 1D model, and this during the whole event and not only the peak flow. This is confirmed by CV' which is equal to 15% for the Multi-Hydro 10 m and to 8% for the semi-distributed model. It means that a 1D model is not able to fully take into account the small scale rainfall variability which has been shown to have a significant impact on the simulated flow. This suggests that to actually benefit from the higher resolution rainfall data which is becoming increasingly available in urban areas, there is a need to develop the use of fully distributed model.

3.4 Sensitivity of the results to the UM parameters

In this paper, the same UM parameters ($\alpha=1.8, C_1=0.1$) have been used for the three events. They corresponds to estimates commonly obtained in the literature when focusing the analysis on the rainy portions of the rainfall fields. In this section, we suggest to test the sensitivity of the results to the values of the UM parameters. To achieve this, the same methodology has been implemented for the 2011 event with various UM parameters set. Results are summarized in Table 1. The value of the maximum probable singularity γ_s for each parameter set was added. It is a scale invariant estimate of the maximum probable value observable on a unique sample of the phenomenon, and has commonly been used to assess the extremes in the multifractal framework.

It appears that the values of the UM parameters have indeed an influence on the computed uncertainty. For example CV' for the outlet is almost twice decreased when $C_1 = 0.05$ rather than $C_1=0.1$ while α is kept equal to 1.8. One can note that the uncertainty are lower for $\alpha=1.8, C_1=0.05$ which corresponds to $\gamma_s=0.36$ than for $\alpha=0.6, C_1=0.1$ which corresponds to $\gamma_s=0.22$. This result is not expected if only the notion of maximum singularity is used to assess the extremes of the rainfall fields. It simply means both UM parameters are needed to properly characterize the rainfall field and assess the uncertainty associated with small scale rainfall variability. From Table 1, it can be seen that C_1 has a stronger influence than α on the estimated uncertainty, suggesting that efforts should be focused on its correct estimation.

4 Conclusion

Universal multifractals are used to quantify the uncertainty associated with small scale unmeasured (i.e. occurring at scales smaller than 1 km in space and 5 min in time) rainfall variability on the outputs of Multi-Hydro, a newly developed fully distributed urban hydrologic/hydraulic numerical platform, and a standard semi-distributed 1D model implemented on the same 1.44 km² urban area located in Sevran, near Paris (France). Three rainfall events with return periods smaller than 1 year for durations of 1 h and 4 h are tested. First the model is roughly validated. Then the methodology basically consists in generating an ensemble of realistic downscaled rainfall fields and simulating the corresponding ensemble of hydrographs. This enables to quantify the uncertainty. It appears for the three rainfall events that the uncertainty is significant and cannot be neglected. For example CV' it ranges between to 15 and 21 % at the outlet and between 37 and 61 % for upstream conduits according to the event. Furthermore the uncertainty computed with the help of the fully distributed Multi-Hydro is much greater than the one obtained with the 1D semi-distributed model, which means that fully distributed models would

be needed to fully benefit from improved rainfall data. The sensitivity of the results to the two parameters used to downscale the rainfall field was tested and showed that a special care should be dedicated to estimating them for applications. In this paper, only the sensitivity to rainfall resolution was tested. More generally similar work should be carried out on other common input fields such as the land use distribution, or the soil properties (especially the infiltration capacities). If obtained conclusions are similar, this would confirm that small scale phenomenon should be taken into account much more carefully in urban hydrology. This points out that in terms of modelling the use of fully distributed models should be developed especially for applications dedicated RTC of sewer networks. The use of the notion of fractal dimension to characterize some features of the inputs of the model also suggests that the implementation of such tools, which are rather common in geophysics, should be developed in urban hydrology. In terms of rainfall, there is a need for higher resolution data in urban areas. To achieve this, the use of X-band radars which provide hectometric resolution would be highly beneficial. Further investigations with heavier rainfall events that generate urban pluvial flooding should also be performed to confirm this need for high resolution modelling.

Acknowledgements

The authors acknowledge Julien Richard (LEESU) for his help in facilitating and reworking the terrain and sewer network data. The authors acknowledge Météo-France for providing the radar rainfall estimates in an easily exploitable format, and especially Pierre Tabary and Valérie Vogt, and the “Direction Eau et Assainissement” of Seine-Saint-Denis for providing the 1D calibrated hydrological-hydraulic model of the Kodak catchment, flow measurements and helpful comments on the results. The authors greatly acknowledge partial financial support from the Chair “Hydrology for Resilient Cities” (sponsored by Veolia) of Ecole des Ponts ParisTech, EU FP7 SMARTesT project, and EU INTERREG RainGain Project.

References

- Alison (2005). *Notice de CANOE*.
- Aronica, G. and Cannarozzo, M. (2000). Studying the hydrological response of urban catchments using a semi-distributed linear non-linear model. *Journal of Hydrology*, 238(1):35–43.
- De Montera, L., Barthès, L., Mallet, C., and Golé, P. (2009). The effect of rain-no rain intermittency on the estimation of the universal multifractals model parameters. *Journal of Hydrometeorology*, 10(2):493–506.
- El Tabach, E., Tchiguirinskaia, I., Mahmood, O., and Schertzer, D. (2009). Multi-hydro: a spatially distributed numerical model to assess and manage runoff processes in peri-urban watersheds. In *Proc. Final conference of the COST Action C22 Urban Flood Management, Paris 26/27.11. 2009, France*.
- Giangola-Murzyn, A., Gires, A., Hoang, C., Tchiguirinskaia, I., and Schertzer, D. (2012). Multi-hydro: physically based modelling to assess flood resilience across scales, case studies in paris region. In *Proceedings of 10 th Urban Dranaige conference, Belgrade*, pages 3–7.
- Gires, A., Onof, C., Maksimovic, C., Schertzer, D., Tchiguirinskaia, I., and Simoes, N. (2012a). Quantifying the impact of small scale unmeasured rainfall variability on urban runoff through multifractal downscaling: A case study. *Journal of Hydrology*, 442:117–128.
- Gires, A., Tchiguirinskaia, I., Schertzer, D., and Lovejoy, S. (2012b). Multifractal analysis of an urban hydrological model on a seine-saint-denis study case. *Urban Water Journal*.
- Gires, A., Tchiguirinskaia, I., Schertzer, D., and Lovejoy, S. (2013a). Development and analysis of a simple model to represent the zero rainfall in a universal multifractal framework. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 20(3):343–356.

- Gires, A., Tchiguirinskaia, I., Schertzer, D., Schellart, A., Berne, A., and Lovejoy, S. (2013b). Influence of small scale rainfall variability on standard comparison tools between radar and rain gauge data. *Atmospheric Research*.
- Hsu, M., Chen, S., and Chang, T. (2000). Inundation simulation for urban drainage basin with storm sewer system. *Journal of Hydrology*, 234(1):21–37.
- Jankowsky, S. (2011). Understanding and modelling of hydrological processes in small periurban catchments using an object-oriented and modular distributed approach. application to the chaudanne and mercier sub-catchments (yzeron catchment, france). *Application to the Chaudanne and Mercier sub-catchments (Yzeron catchment, France)*. PhD thesis, Université de Grenoble, page 321.
- Leandro, J., Chen, A. S., Djordjević, S., and Savić, D. A. (2009). Comparison of 1d/1d and 1d/2d coupled (sewer/surface) hydraulic models for urban flood simulation. *Journal of hydraulic engineering*, 135(6):495–504.
- Lima, M. d. and Lima, J. d. (2009). Investigating the multifractality of point precipitation in the madeira archipelago. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 16(2):299–311.
- Lovejoy, S. and Schertzer, D. (2010). On the simulation of continuous in scale universal multifractals, part i: spatially continuous processes. *Computers & Geosciences*, 36(11):1393–1403.
- Maksimović, Č., Prodanović, D., Boonya-Aroonnet, S., Leitão, J. P., Djordjević, S., and Allitt, R. (2009). Overland flow and pathway analysis for modelling of urban pluvial flooding. *Journal of Hydraulic Research*, 47(4):512–523.
- Mandapaka, P. V., Lewandowski, P., Eichinger, W., and Krajewski, W. F. (2009). Multiscaling analysis of high resolution space-time lidar-rainfall. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 16(5):579–586.
- Pecknold, S., Lovejoy, S., Schertzer, D., Hooge, C., and Malouin, J. (1993). The simulation of universal multifractals. In *Cellular Automata*, volume 1, pages 228–267.
- Richard, J., Tchiguirinskaia, I., and Schertzer, D. (2012). Gis data assimilation interface for distributed hydrological model. *10th HydroInformatics Conference, Hambourg, Germany, 14-18 July 2012*.
- Rodriguez, F., Andrieu, H., and Morena, F. (2008). A distributed hydrological model for urbanized areas—model development and application to case studies. *Journal of Hydrology*, 351(3):268–287.
- Rossman, L. A. (2010). *Storm water management model user’s manual, version 5.0*. National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency.
- Schertzer, D. and Lovejoy, S. (1987). Physical modeling and analysis of rain and clouds by anisotropic scaling multiplicative processes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)*, 92(D8):9693–9714.
- Schertzer, D. and Lovejoy, S. (2011). Multifractals, generalized scale invariance and complexity in geophysics. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 21(12):3417–3456.
- Schütze, M., Campisano, A., Colas, H., Schilling, W., and Vanrolleghem, P. A. (2004). Real time control of urban wastewater systems—where do we stand today? *Journal of hydrology*, 299(3):335–348.
- Segond, M.-L., Wheeler, H. S., and Onof, C. (2007). The significance of spatial rainfall representation for flood runoff estimation: A numerical evaluation based on the lee catchment, uk. *Journal of Hydrology*, 347(1):116–131.
- Singh, V. (1997). Effect of spatial and temporal variability in rainfall and watershed characteristics on stream flow hydrograph. *Hydrological Processes*, 11(12):1649–1669.

- Tabary, P. (2007). The new french operational radar rainfall product. part i: Methodology. *Weather and forecasting*, 22(3):393–408.
- Velleux, M., England, J., and P.Y., J. (2011). *TREX Watershed Modeling Framework User's Manual: Model Theory and Description*. Fort Collins, Colorado.
- Verrier, S., De Montera, L., Barthès, L., and Mallet, C. (2010). Multifractal analysis of african monsoon rain fields, taking into account the zero rain-rate problem. *Journal of Hydrology*, 389(1):111–120.

Annexe C

**« Guidance for Flood Resilience Systems »
(Extrait du livrable 3.3 du projet
SMARTeST)**



SMARTeST



Guidance for Flood
Resilience Systems

SMARTeST Project Team

Building Research Establishment (BRE)	UK	Dr Stephen Garvin Dr David Kelly, Katy Hunter
Technical University of Harburg and Hamburg (TUHH)	Germany	Prof. Peter Frohle Natasa Manojlovic, Vincent Gabalda, Karl Friedrich Daemrich, Baerbel Koppe
Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)	France	Jean-Luc Salagnac Dr Dorothee Marchand, Dr Aurelie Tricoire, Dr Celine Florence, François Boutin
University of Manchester (UNIMAN)	UK	Dr Iain White Adam Barker, Dr Paul O'Hare, Nigel Lawson, Dr Angela Connelly, Joanne Tippett
National and Kapodistrian University of Athens (NKUA)	Greece	Prof. Niki Evelpidou Konstantia Chartidou, Andreas Vassilopoulos, Niki Bouziotopoulou
Dion Toumazis & Associates (TOUM)	Cyprus	Dr Antonis Toumazis Demetra Toumazi-Hadjiloizi
Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC)	France	Dr Daniel Schertzer, Dr Ioulia Tchiguirinskaia Jose Frederic Deroubaix, Elodie Moulin, Agathe Giangola–Murzyn, Emilie Rioust, Bruno Barocca, Auguste Gires, Julien Richard
Technical University of Delft (TUD)	Netherlands	Dr Marie-Claire ten Veldhuis Loes Janssen, Matthieu Spekkers
Universidad Politécnica de Madrid (UPM)	Spain	Prof. Javier Diez Ass. Prof. José Santos López Gutiérrez, Dr Dolores Esteban, Ass. Prof. Enrique Calderon, Ass. Prof. Rosa M. Paz, Julien Victor Monnot
Leibniz Institute of Ecological, Urban and Regional Development (IOER)	Germany	Dr Thomas Naumann Sebastian Golz, Dr Reinhard Schinke, Prof. Joachim Tourbier, Prof. Jochen Schanze



Contents

The SMARTeST Project	iii
SMARTeST Project Team	iv
Authors	iv
With contributions from	v
Editors	v
Other SMARTeST reports	v
Executive Summary	vi
Contents	viii
List of Figures	xi
List of Tables	xii
1 Introduction	1
1.1 The SMARTeST Project	2
1.2 About the report	3
2 Flood resilience	5
2.1 Why is flood resilience required?	5
2.2 Contents	5
2.2.1 The scope and concept of flood resilience	5
2.2.2 Current flood management practice and resilience	7
2.2.3 On the road to resilience	8
2.3 Outcomes	9
3 Flood resilient system approach	10
3.1 Introduction	10
3.1.1 Choice of a generic situation	10
3.1.2 Representation of territories	11
3.1.3 Representation of the FReS design process	13
3.2 Prerequisite	14
3.3 Generic approach	15
3.3.1 Context	15
3.3.2 Exploring alternatives schemes	16
3.3.3 Assessing alternative schemes	18
3.3.4 Implementing FReS	20
4 Illustrations of the FReS approach	21
4.1 Case studies	21
4.1.1 Jouy-en-Josas (France)	21

4.1.1.1	Description of context	21
4.1.1.2	Alternative schemes	22
4.1.1.3	Assessment of alternative schemes	22
4.1.1.4	Implementation	23
4.1.2	Villecresnes (France)	24
4.1.2.1	Description of context	24
4.1.2.2	Alternative schemes	24
4.1.2.3	Assessment of alternative schemes	25
4.1.2.4	Implementation	26
4.1.3	Heywood, Greater Manchester (UK)	27
4.1.3.1	Description of context	27
4.1.3.2	Alternative schemes	27
4.1.3.3	Assessment of alternative schemes	28
4.1.3.4	Implementation	28
4.2	Example FRe systems elements at the building scale	28
4.2.1	Controlled flooding of a basement (P-RS1)	29
4.2.1.1	Description	29
4.2.1.2	Resilience characteristics	29
4.2.2	Sealing of basement (P-RS2)	30
4.2.2.1	Description	30
4.2.2.2	Resilience characteristics	30
4.2.3	Controlled flooding and sealing of the ground floor (P-RS3)	31
4.2.3.1	Description	31
4.2.3.2	Resilience characteristics	31
4.2.4	Controlled flooding and shielding of the ground floor (P-RS4)	32
4.2.4.1	Description	32
4.2.4.2	Resilience characteristics	32
4.2.5	Controlled flooding (basement) and wet-proofing (ground floor) (P-RS5)	33
4.2.5.1	Description	33
4.2.5.2	Resilience characteristics	33
4.2.6	Wet proofing (basement) (P-RS6)	33
4.2.6.1	Description	33
4.2.6.2	Resilience characteristics	33
4.2.7	Shielding of the building (P-RS7)	34
4.2.7.1	Description	34
4.2.7.2	Resilience characteristics	34
4.2.8	Sealing of the ground floor (PR-S8)	35
4.2.8.1	Description	35
4.2.8.2	Resilience characteristics	35
4.2.9	Controlled flooding of above ground floor(s) (P-RS9)	35
4.2.9.1	Description	35
4.2.9.2	Resilience characteristics	35

4.2.10	Wet proofing above ground floor(s) (P-RS10)	36
4.2.10.1	Description	36
4.2.10.2	Resilience characteristics	36
4.2.11	Relocation (P-RS11)	37
4.2.11.1	Description	37
4.2.11.2	Resilience characteristics	37
5	Guidance for FReS design	38
5.1	Diagnostic of the situation	39
5.1.1	Why is a diagnostic section required?	39
5.1.2	Contents	39
5.1.3	Outcomes	41
5.2	Define objectives and priorities	42
5.2.1	Why define objectives and priorities?	42
5.2.2	Contents	42
5.2.3	Outcomes	43
5.3	Define compensation mechanisms	44
5.3.1	Why define compensation mechanisms?	44
5.3.2	Contents	44
5.3.3	Outcomes	45
5.4	Defining alert solutions	45
5.4.1	Why defining alert solutions?	45
5.4.2	Contents	45
5.4.3	Outcomes	46
5.5	Defining protection measures	46
5.5.1	Why define protection measures?	46
5.5.2	Contents	47
5.5.3	Outcomes	48
5.6	Defining implementation conditions of FReS	48
5.6.1	Why define implementation conditions of FReS?	48
5.6.2	Contents	48
5.6.3	Outcomes	48
5.7	Economic issues of FReS	49
6	Conclusion	50
	References	53

List of Figures

Figure 1: target groups of the FReS guidance	4
Figure 2: raised kerb	8
Figure 3: simplified representation of a river basin	12
Figure 4: embedded scales	13
Figure 5: representation of the “steps” of the generic approach	14
Figure 6: examples of actions at different scales of the domain	16
Figure 7: examples of alternatives FReS	18
Figure 8: MULTI-HYDRO	19
Figure 9: FLOReTO	19
Figure 10: HOWAD – PREVENT	19
Figure 11: administrative limit crossing a flood-prone area	20
Figure 12: Jouy-en-Josas case-study area	21
Figure 13: changes in land use proposed as a solution	22
Figure 14: flow at the outlet during a rainfall event of 100mm within 4 hours	23
Figure 15: differences in maximum water depth of the alternative schemes	23
Figure 16: location of Villecresnes	24
Figure 17: location of the area proposed to be protected (at 10 m resolution)	25
Figure 18: example of perimeter barrier	25
Figure 19: influence of building protection on the overland water depth	26
Figure 20: influence of a perimeter barrier on the overland water depth	26
Figure 21: Heywood catchment areas	27
Figure 22: MULTI-HYDRO assessment results	28
Figure 23: redesign possibilities for the system P-RS3	32
Figure 24: timeline to present the results of the diagnostic phase	39
Figure 25: flood alert signs	46
Figure 26: raised metro entrances	47

List of Tables

Table 1: list of SMARTeST case studies	9
Table 2: correspondences between SRC scheme and flood types	10
Table 3: SMARTeST tools in relation with the flood resilient system approach	38
Table 4: examples of measures and associated scales	40
Table 5: some issues to be addressed at different spatial scales	41
Table 6: Flood resilience technology (barriers) choice criteria	47

3 Flood resilient system approach

3.1 Introduction

3.1.1 Choice of a generic situation

The main goals of a FReS do not fundamentally differ from the goals of a traditional flood management system. They both aim to limit damages to people, property and possessions as well as to create conditions for the recovery of flooded areas as fast as possible.

The main difference lies in the approach of the situation. FReS development tries to encompass a multi-scale territory and to create favourable conditions for a co-production of acceptable decisions for the concerned stakeholders.

By principle, such an approach rejects “not in my back-yard (NIMBY)” attitudes that could lead to decisions having negative consequences to neighbouring areas (e.g. a protection installed to protect a building or an area could divert water to neighbouring buildings/areas that were not previously inundated).

On the contrary a flood resilient approach tries to anticipate the consequences on other areas of decisions aiming to protect urban areas. The prerequisite for such an approach that are needed are presented in the following sections.

A particular flood type (i.e. fluvial type) has been chosen to present the proposed approach. This choice does not restrict the view of the SMARTeST project to this type of flood. The reader interested in other flood situations should easily transpose proposed developments to other contexts using the “source/pathway/receptor” (SRC) scheme.

For instance, pluvial flood, that has particular importance in urban areas, can be easily addressed using the proposed generic approach. In this case, the source is precipitation, streets and drainage networks are respectively surface and underground pathways and the built environment is the receptor.

Table 2 summarises the connections between the chosen generic situation and other current flood situations.

Type of flood	Source	Pathway	Receptor
Fluvial	<i>Precipitation</i>	River course	Urban areas District Buildings
Pluvial		Streets drainage network	
Flash			
Coastal	Sea water level	Sea shore	

Table 2: correspondences between SRC scheme and flood types

3.1.2 Representation of territories

Figure 3 is a simplified representation of a river basin territory. It includes different spatial territories along the water course, as follows:

- the river basin,
- expansion zones that are generally non- constructed areas,
- the urban area with sub-scales: districts and buildings. Buildings include any kind of construction hosting any kind of activity (e.g. industry, hospital, school, shops, offices, housing). Water can flow above and under the ground surface.

The boundaries between territories are convenient for presentation purpose. Flood prevention/protection measures that are elements of the flood resilience system covering the river basin, can be clearly located on such a figure. In reality, concrete situations are much more complex than the representation might suggest.

A system is not just a matter of spatial scales. The connectivity between the elements of a system is not limited to the boundaries between spatial areas, but also includes relations between stakeholders, institutions, administrations acting in the concerned territory.

This complexity is not explicitly shown on Figure 3 but will be addressed in the following sections.

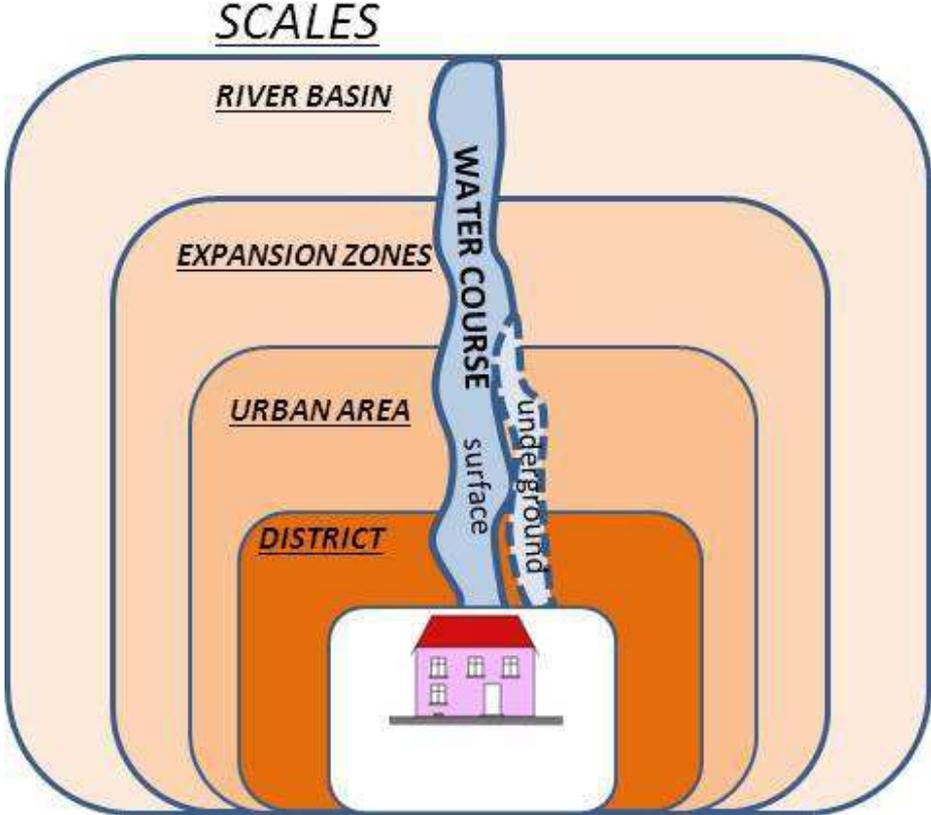


Figure 3: simplified representation of a river basin

Source SMARTeST

Of course, it must not be forgotten that the concerned territory is a tiny part of wider domains in which it is embedded (Figure 4). This means that the design and implementation of FReS has to be considered in the long term perspective linked with climate change issues.

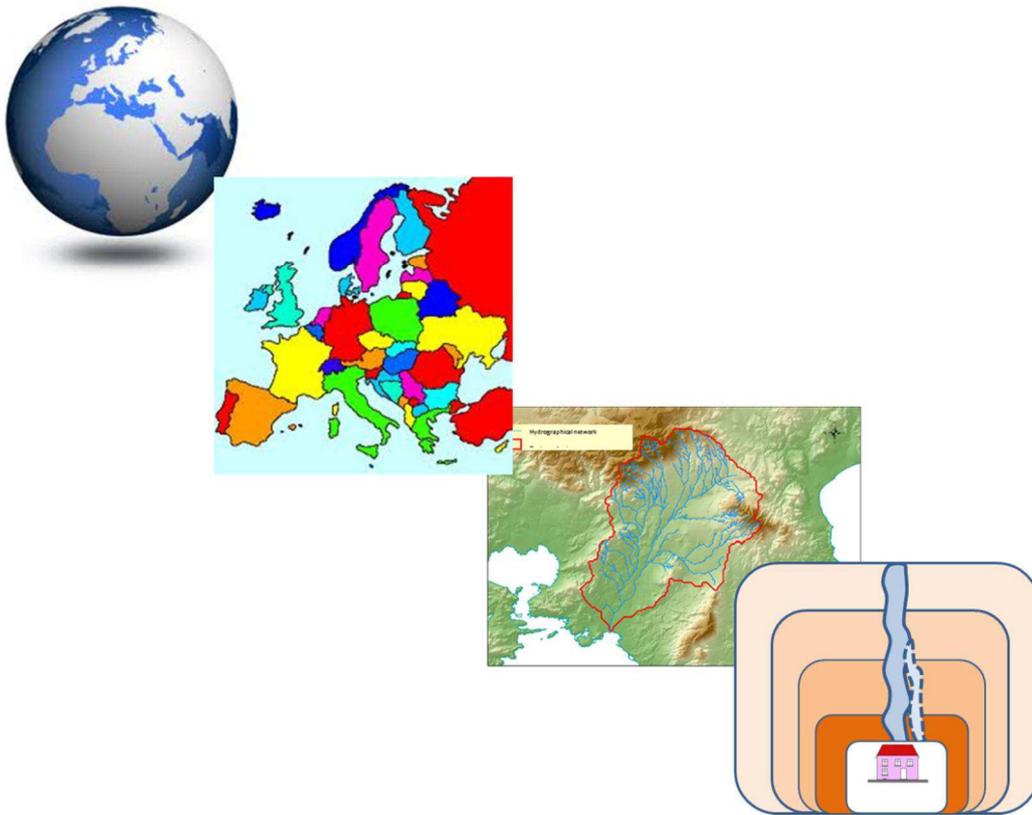


Figure 4: embedded scales

3.1.3 Representation of the FReS design process

For presentation purposes, the generic approach presented in 3.3 is divided into four sections that correspond to four “steps” as shown in Figure 5. This presentation might suggest that the proposed method is linear, starting from step 1 and ending at step 4.

In reality, the process that ends by the implementation of a FReS is all but linear. Constant feedbacks between “steps” are essential. They depend on each particular situation so that it is not possible to show them once and for all.

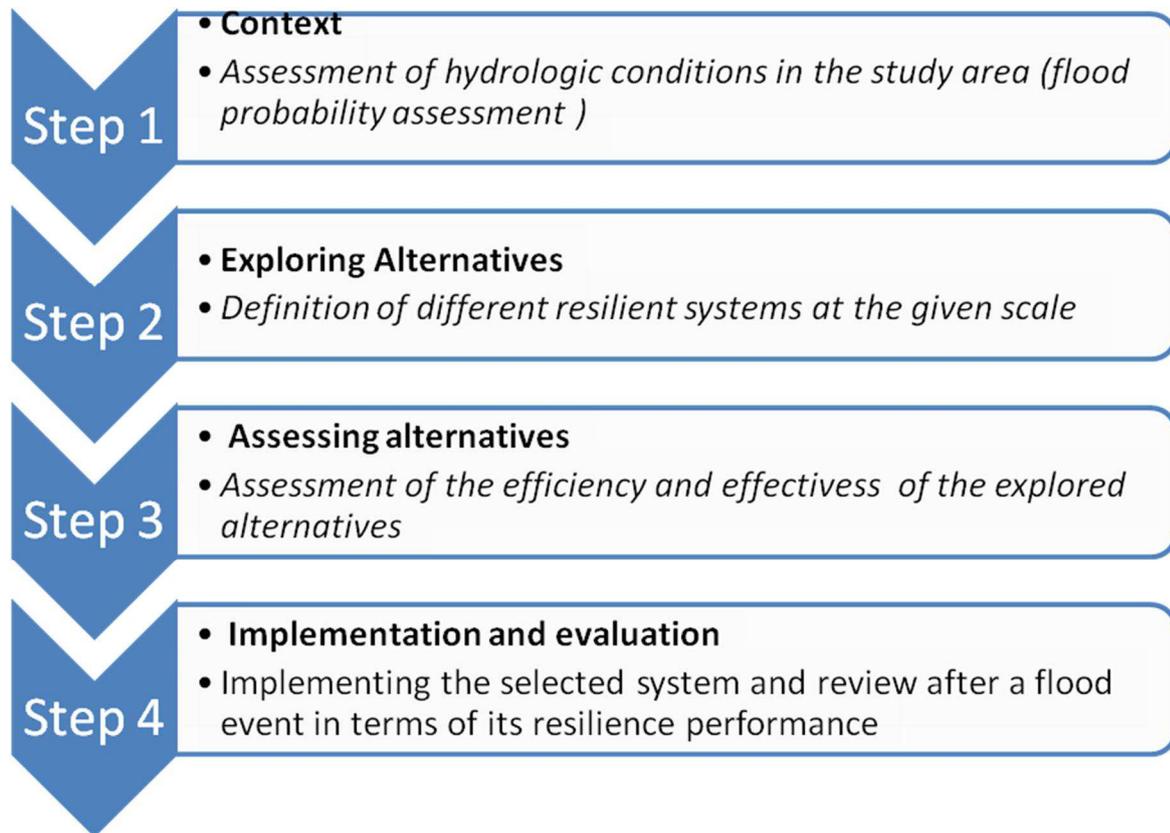


Figure 5: representation of the “steps” of the generic approach (feedbacks between steps not represented)

3.2 Prerequisite

In the context of SMARTeST, a “system” is an assembly of element. The interconnections between them covering urban flood under various flood type scenarios (riverine, pluvial, flash, coastal, groundwater, etc.) and embracing all flood management elements (warning appliances, emergency services organisation, drainage networks, flood risk models, protection equipment, etc.). It includes various scales from house to street to neighbourhood to city to conurbation to region to country (Lawson N. et al., 2011).

An urban area is a man-made complex system that is designed, built, transformed and maintained by many different loosely coordinated stakeholders over a long period of time. During this period the “environment” of the urban area is highly variable. It may change because of many factors, e.g. general economy, increase/loss of local attractiveness, exploitation of local natural resources and abundance or scarcity of fundamental resources such as water.

The time horizon of local authorities and of city-dwellers is up to one, maybe two decades and the emergence of one of the above mentioned factors and their interactions is difficult to anticipate.

Decisions concerning natural risk management have to take an uncertain future into consideration. All information that can guide such a future is necessary to start thinking of a flood resilient urban system. The following list is not exhaustive but contains relevant items:

- long term (decades ahead) vision on the local development (strategic planning),
- consider flood as one among other hazards according to the local situation,
- strong commitment of local authorities and other decision makers to keep an open vision of the urban area development,
- coordination between private/public decision makers to avoid silo-thinking,
- reflexion on priorities according to the local situation,
- permanent concern to inform, educate, raise awareness of the concerned population,
- assessment of FRe technology to provide sound information to different groups (designers, contractors, facility managers, individuals) on the performance of these technology as well as on the conditions to obtain these performances (design rules, implementation, maintenance),
- update plans (alert, evacuation, rescue, recovery),
- Climate change and its potential impacts.

Many of these items should be addressed when designing a flood management system or when planning the development of an urban area. Thinking in terms of resilience may be favourable to effectively address these items from a global point of view.

3.3 Generic approach

3.3.1 Context

According to local contexts, different kinds of actions and measures can be implemented at the different scales of the domain. Figure 6, based on the spatial representation of Figure 3, gives examples of such measures. Such measures aim to mitigate the impact of flood by delaying water flow along the water course, limiting run-off or limiting direct water ingress in buildings. At the building scale, an alternative strategy (i.e. wet proofing) is to allow water in the building. The use of appropriate construction materials is likely to limit damages. FReT at the building scale was extensively developed in the project.

The flood warning and alert system is also represented on figure 6. Messages can be transferred to the most appropriate scales according to context.

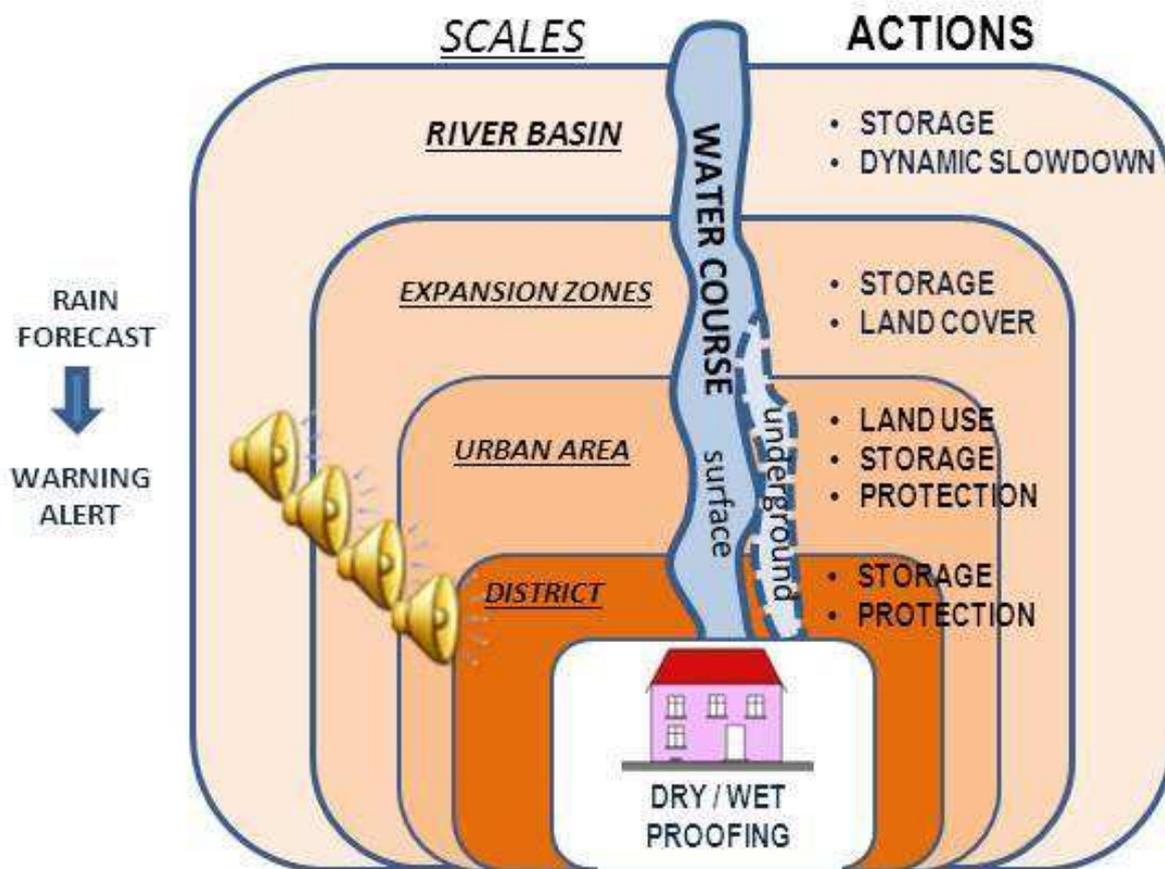


Figure 6: examples of actions at different scales of the domain

Source: SMARTeST

3.3.2 Exploring alternatives schemes

The expectations from FMS are as follows:

- To limit damages to persons, built assets and goods,
- To anticipate the crisis management,
- To recover quickly after flood.

Combining different possible measures at different scales gives many possibilities to be considered when addressing flood management in a specific area.

The added value of FReS comes from the association of measures and corresponding actions that are selected according to the following rules:

Coordinated actions: the consequences of actions at a given scale have to be analysed both upstream and downstream in order to assess their impact on the whole concerned area. The SMARTeST project developed tools that help assessing such consequences. Tools developed in the SMARTeST project (FRe technology implementation tools) allow the assessment on both the hydraulic pattern (MULTI-HYDRO tool) and the buildings damage (FLOReTO, HOWAD-PREVENT tools) for a given set of prevention/protection measures.

- **Consistency:** there is for instance no need to design for aperture barriers at the building scale if the water level is likely to be more than a meter in depth. More generally there is a need on the whole concerned area to check prevention/protection measures are consistent at different scales. No measure should hamper or even cancel the expected effects of other measures at a different location. Resources spent to check consistency are useful to avoid misleading decisions. Checking consistency is not a decision process in itself but it participates in the decision. The implementation of consistency checking actions has to take the institutional, administrative and organisational complexity of a territory into account as highlighted by investigations of WP5 (Integration and practice for FRe technology).
- **Co-production** should be organised by all stakeholders belonging to different institutions, geographical or administrative areas. This would create favourable conditions for full acceptance of the consequences of measures. Both positive and negative consequences must be exposed and debated. If necessary, compensation mechanisms must be defined to balance the acceptance by some members of a temporary burden for the benefit of the community.
- **People resilience:** FReT can contribute to limit damages but a FReS cannot just rely on technology. For long, information dissemination, awareness raising or training actions have been identified as key issues in addition to technology implementation (the flood guides developed within the SMARTeST project are examples of awareness raising documents for the public). These actions contribute to capacity building of the exposed population in order to better cope with flood situations. They have to be organised in a long term perspective, for a constantly renewing population. People resilience is essential for a successful operation of a FReS. The way the exposed population anticipates, reacts and behaves before, during and after flood creates the conditions for an effective use of FReT. These points were addressed through integration of good practice in FRe technology within the project.
- **Built environment resilience:** the intrinsic capacity of buildings to withstand physical and chemical impacts of (polluted) water can be improved by means of FReT measures. The work carried out in SMARTeST confirmed that the scope and limitations of such measures must be acknowledged. Ordinary buildings (e.g. individual housing, warehouses) cannot be waterproof for any water depth. Moreover, waterproof buildings would support static pressure and buoyancy forces that are not compatible with the mechanical resistance of ordinary buildings. This fact must be understood by all stakeholders in flood-prone areas. Unless the water depth is less than a meter at the building level, wet proofing is the only alternative to be considered. As flood water will penetrate buildings, measures have to be anticipated to limit damages (e.g. raising equipment and furniture, use low vulnerable construction materials). This latter measure must be considered with precautions as a construction work results from the assembly of materials: the use of “flood-resilient” materials does not guarantee that the building will suffer no damage.

- Smart technologies:** where and when automatic actions are pertinent (e.g. continuous surveillance, assistance to alert, possible absence of operator, necessity to move heavy equipment), smart technologies can provide smart solutions. This is particularly true for precipitation near-casting: the reliability of the alert depends on accurate information that can be produced by e.g. X-band radars (appendix 5). Whatever smart technology is implemented, maintenance of the concerned equipment must be carefully planned. The reliability of these technologies is essential. Some of them are likely to be activated rather frequently such as rain radars but some others will be activated only from time to time (once/twice per decades). In this latter case, frequent training will ensure that instructions are transferred to operators.

According to each context, the identification of possible measures and of their pertinent combination allows setting alternative schemes as illustrated on Figure 7.

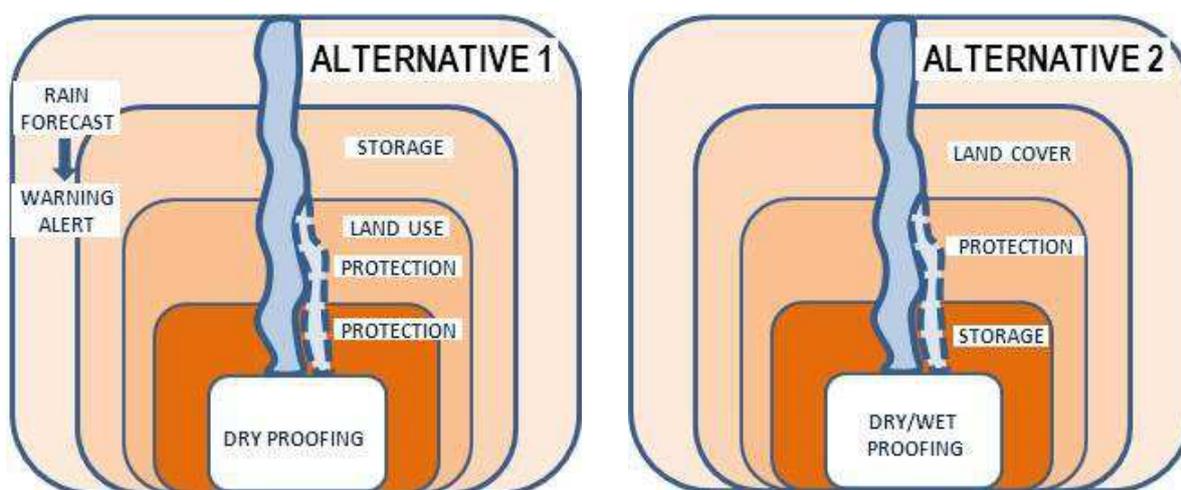


Figure 7: examples of alternatives FReS

Source: SMARTeST

3.3.3 Assessing alternative schemes

The SMARTeST project has developed tools that allow the assessment of the following aspects for each identified scheme:

Surface and underground water-flow patterns: the MULTI-HYDRO model (Figure 8) can simulate the flow of water in a drainage network as well as around buildings. It takes into account any measure (e.g. barrier, reservoir) that could be implemented in the simulation area. Calculations are made for any virtual precipitation pattern.

Building damages: the FLOReTO tool (Figure 9) developed by TUHH and the HOWAD tool (Figure 10) developed by IOER provides damage assessment according to the characteristics of buildings and to the type of FReT used.

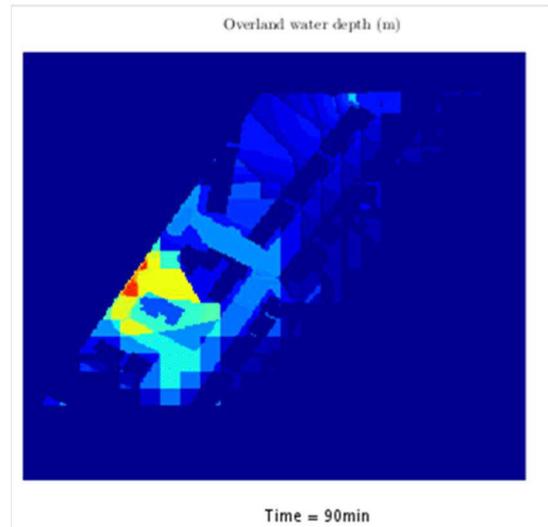
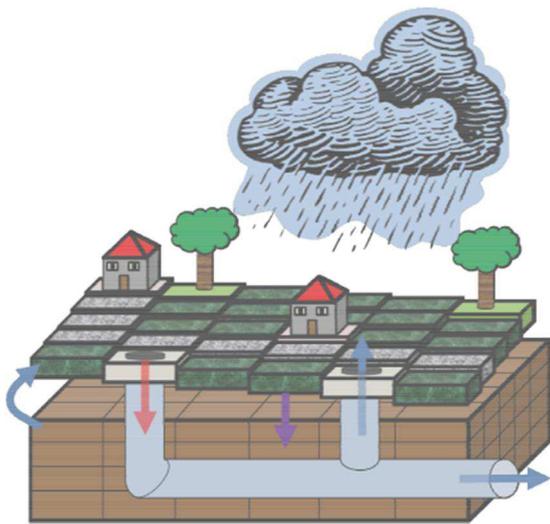


Figure 8: MULTI-HYDRO principle (left) – water depth simulation (right) Source : ENPC

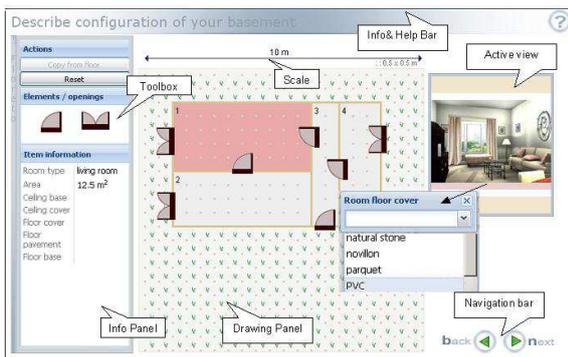


Figure 9: FLOReTO building description (left) – damage output curves (right) Source: TUHH

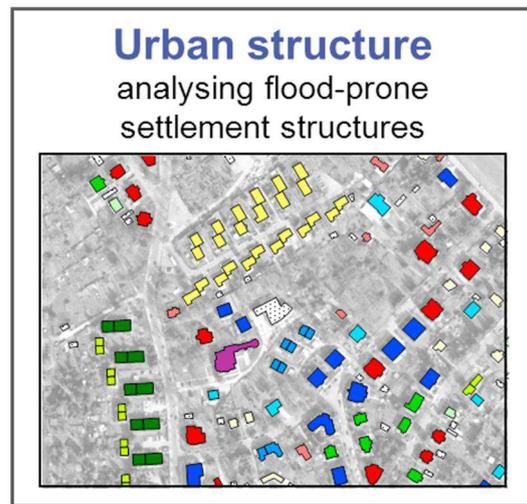
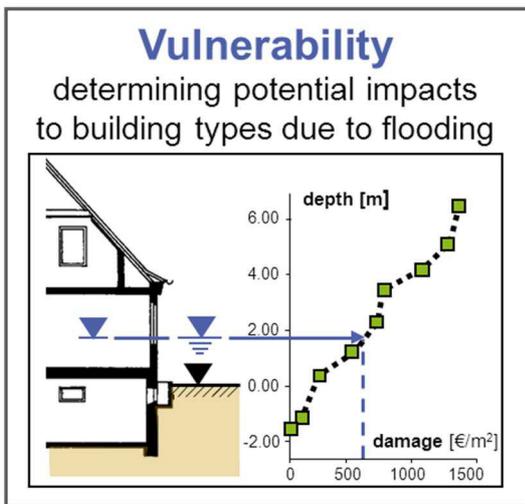


Figure 10: HOWAD – PREVENT principle (left) – district damage analysis (right) Source: IOER

3.3.4 Implementing FReS

It is clear that the process leading to the implementation of a FReS is all but linear. Strong interactions do exist between the definition of measures, their selection and association with each other.

In this last sequence, the actions to be carried out to consolidate decisions are described.

A water basin (or a coastal area) is rarely a standalone territory. There are generally many administrations and institutions that influence different parts of this territory. They all have their own prerogatives (e.g. on natural resources, on water management, on urban planning).

This situation is illustrated on Figure 11 with an administrative limit representing a simple case. If land use is for instance a key element of a FReS to be implemented in the area, corresponding decisions have to be coordinated by the two administrative entities.

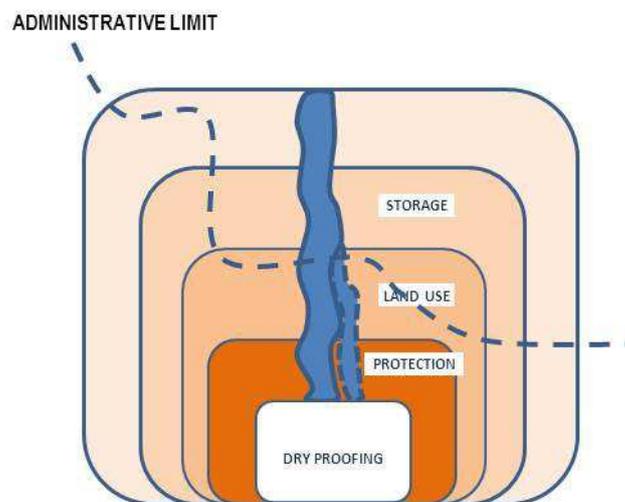


Figure 11: administrative limit crossing a flood-prone area

Source: SMARTeST

An overall evaluation of many issues (e.g. technical, economic, financial, administrative, Institutional, organisational) has to be processed to come to a decision of coordinated and coherent actions.

A key element of this process is the participation of all stakeholders in order for them to share and accept final decisions.

Time is a key consideration of FReS design and implementation and can be closer to decades than years. This will be illustrated by an example in chapter 5 where thirty years were necessary to come to the implementation of a full system accepted by stakeholders.

4 Illustrations of the FReS approach

The four phase approach (description of context, alternative schemes, assessment of alternative schemes and implementation) presented in chapter 3 is illustrated in section 4.1 by three SMARTeST case studies, as follows:

- Jouy-en Josas (France)
- Villecresnes (France)
- Heywood, Manchester (UK)

In these case study examples, potential FRe systems are proposed, which include the implementation of a variety of FRe technologies and diversion, conveyance and storage measures.

4.1 Case studies

4.1.1 Jouy-en-Josas (France)

4.1.1.1 Description of context

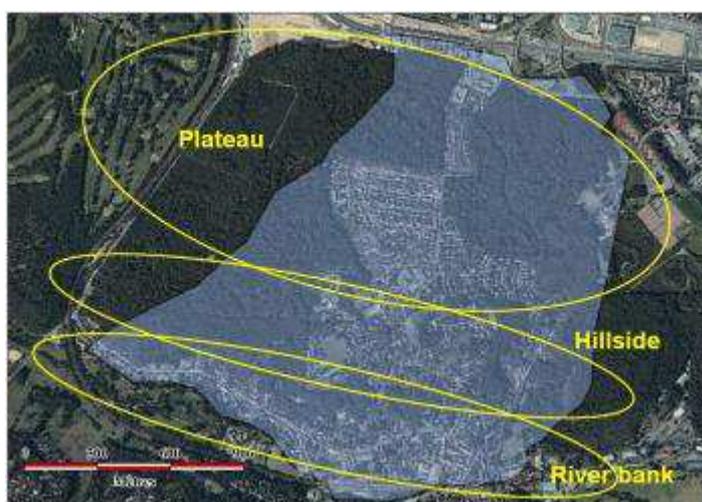


Figure 12: Jouy-en-Josas case-study area

Source: ENPC

The city is located along the Bièvre River, a tributary of the Seine River in the South of Paris. This case study concerns a 2.5 km² area of the city located on the left bank of the river (Figure 12).

This area can be subdivided into:

- The river bank: a flat area where most of the public facilities are located and where the river is mainly culverted in underground pipes or in an artificial channel;
- Hillside: steep area, not highly urbanised;
- Plateau: an urbanised area, its impervious surfaces generate additional run-off to the river bank.

The last major flood experienced by Jouy-en-Josas was on July 21, 1982, where 96.2 mm of rainfall fell within one hour; causing a 20 cm deep rapid flow of water.

4.1.1.2 Alternative schemes

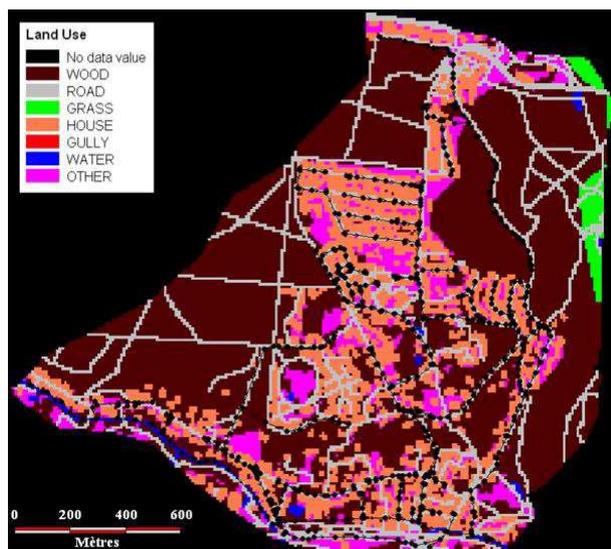


Figure 13: changes in land use proposed as a solution

Source: ENPC

The city proposed plans to develop flood-resilient buildings and sport facilities near the river. The stakeholders investigated possibilities to implement a FRe system. Public discussions were held to help determine which FRe system should be tested. Two alternative scenarios were assessed by modelling a change in land use cover in the tool MULTI-HYDRO with a 10 m resolution. MULTI-HYDRO is further discussed in Appendix 4.

4.1.1.3 Assessment of alternative schemes

MULTI-HYDRO was adopted to assess the proposed alternative schemes.

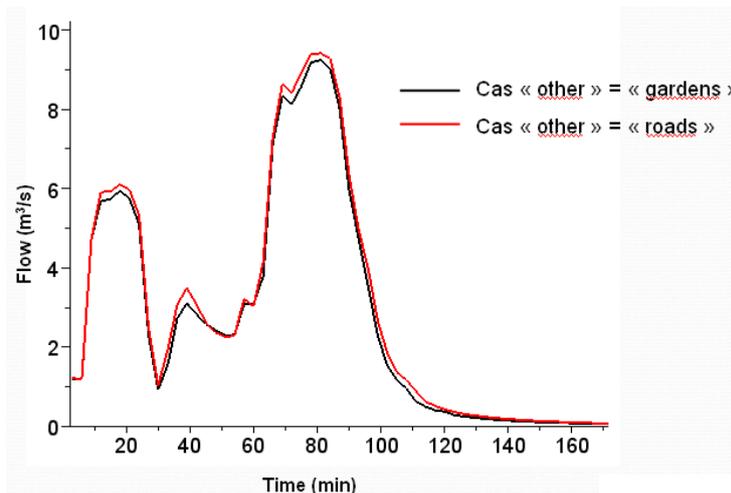


Figure 14: flow at the outlet during a rainfall event of 100mm within 4 hours

Source: ENPC

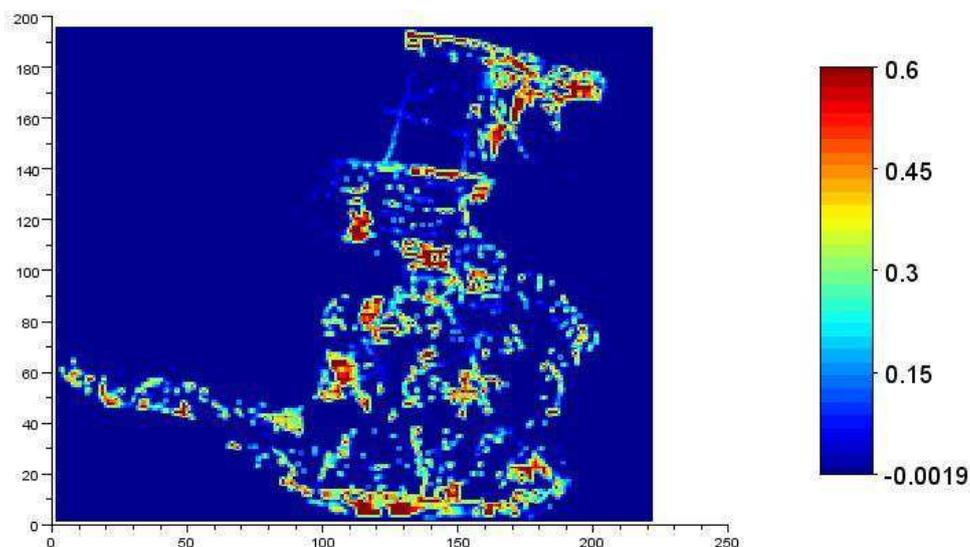


Figure 15: differences in maximum water depth of the alternative schemes

Source: ENPC

4.1.1.4 Implementation

SMARTeST project partners met with the majority of the stakeholders involved in the urban planning of Jouy-en-Josas. The stakeholders explained that the main objective of a local FRe system would be to enable building in potentially flood-prone areas. The stakeholders would prefer a simple FRe system, whose functioning would be mainly automatic.

4.1.2 Villecresnes (France)

4.1.2.1 Description of context



Figure 16: location of Villecresnes

Source: ENPC

Villecresnes, a city of 10,000 citizens is located in the south east of the Paris region. The city has been involved in the national strategy for sustainable development and its Local Plan of Urbanisation promotes collective housing in an aim to protect green areas from development. The last major flood in Villecresnes was on July 22, 2009. It was classed as a ‘natural catastrophe’, in French law. After the flood, the city adopted a Policy of Flood Protection and Risk Management.

4.1.2.2 Alternative schemes

The area is 7200 m², with a drop in elevation from 120 to 50 meters. Four FRe systems were proposed to investigate whether or not the gymnasium at the location shown in Figure 17 could be prevented from flooding. These systems are as follows:

Protection at building level;

- Adapting the adjacent tennis court for temporary retention;
- Channelling roof-collected rainwater;
- Implementing a perimeter barrier (Figure 17 and Figure 18)

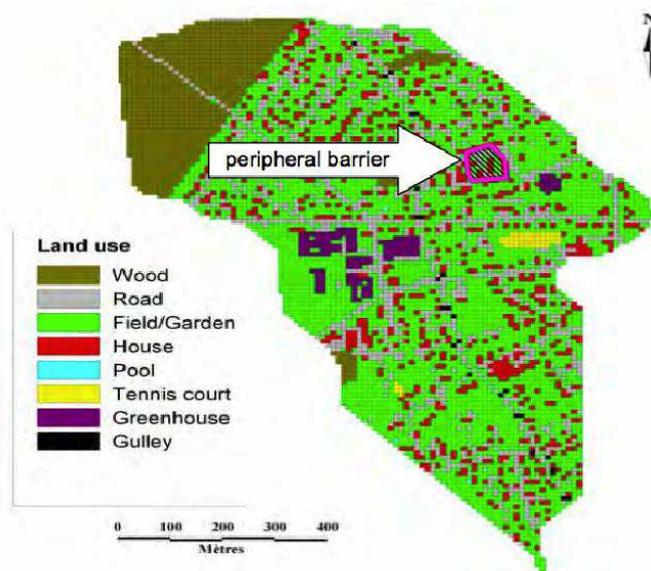


Figure 17: location of the area proposed to be protected (at 10 m resolution)

Source: ENPC

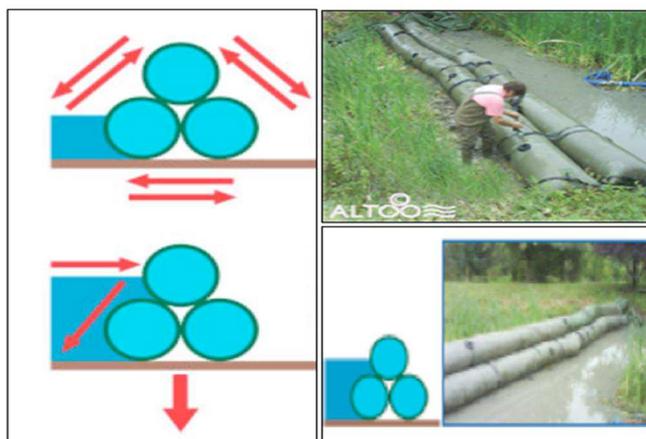


Figure 18: example of perimeter barrier

Source: ALTOO

4.1.2.3 Assessment of alternative schemes

An assessment of the building protection system and the perimeter barrier system were undertaken using the MULTI-HYDRO tool. Results of this analysis are shown in Figure 19 and Figure 20.

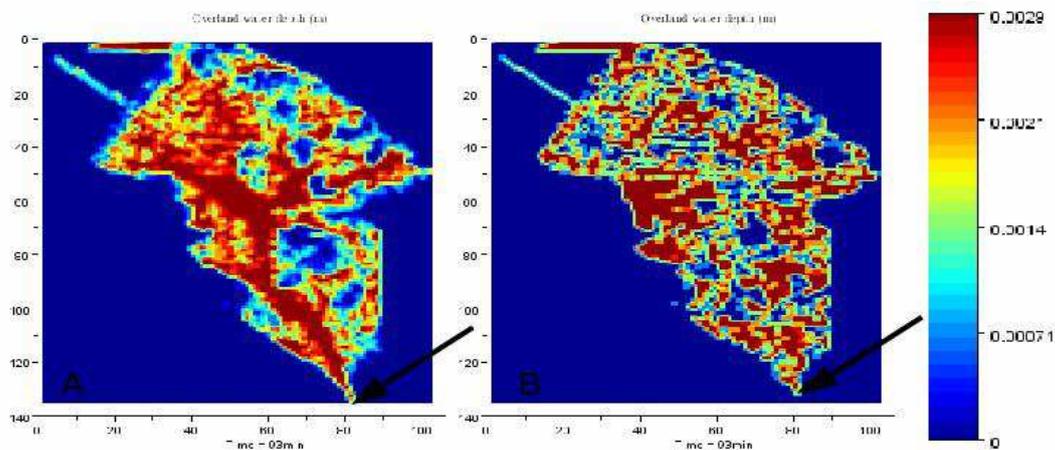


Figure 19: influence of building protection on the overland water depth

Source: ENPC

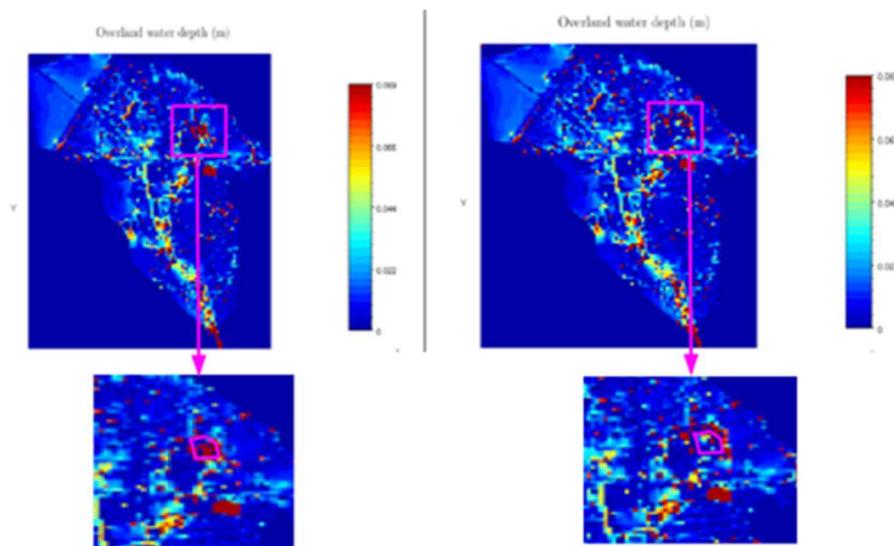


Figure 20: influence of a perimeter barrier on the overland water depth

Source: ENPC

4.1.2.4 Implementation

The MULTI-HYDRO results demonstrate that the gymnasium could be appropriately protected and relocating it was not necessary. The analysis also posed many questions regarding the efficiency, cost and management of different FRe systems which must be considered across different scales.

4.1.3 Heywood, Greater Manchester (UK)

4.1.3.1 Description of context

The Heywood (Greater Manchester) has a catchment of about 8 km² which experienced serious pluvial flooding in 2004 and again in 2006 (Figure 21). There is no recorded history of previous flood events in the area. Since 1960, many open areas and brownfield sites have been occupied by new housing and new low-rise large warehouses on a new distribution centre. Typical of the edges of many British towns, this urban infill process adds to problems of effective surface water management.

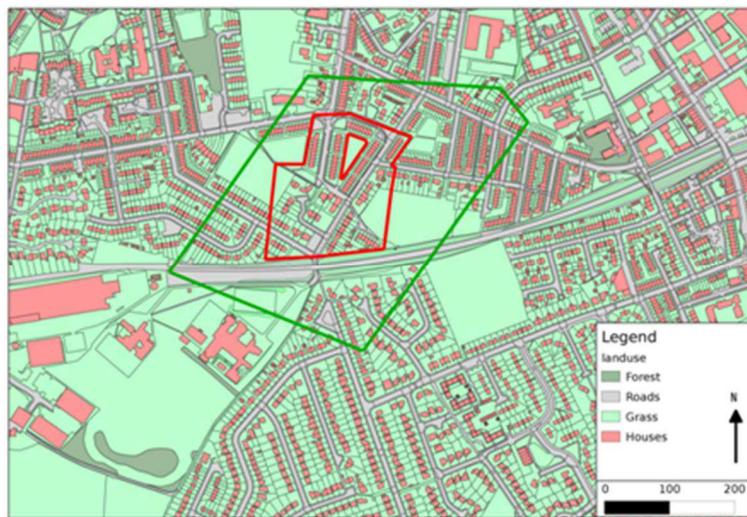


Figure 21: Heywood catchment areas

The larger catchment (green) will be used to evaluate the lateral inflow to the smaller catchment (red)
(source: ENPC-UNIMAN)

The assessment area is focused on Egerton Street and the surrounding green spaces.

4.1.3.2 Alternative schemes

It is proposed to assess three FRe systems:

- Barriers of 1 m height
- Swale of 1.5 m depth
- Barriers of 1 m height and swale of 0.5 m depth

It is planned that implementation costs can be reduced by combined FRe measures and technologies.

4.1.3.3 Assessment of alternative schemes

MULTI-HYDRO was used to model the initial situation before any intervention and the water depth was found to be 0.6 metres in Egerton Street and the surrounding areas. It was also used to assess the three different FRe system solutions proposed in 4.1.3.2. Figure 22 shows the results:

The first image shows the results from the first scheme proposed; the use of a 1 m high barrier. This resulted in flood water depths of 0.2 metres are identified in Egerton Street, and 0.6 metres in the surrounding green spaces.

The middle image shows the results from the second proposed solution; the implementation of a swale. This resulted in 0.2 metres depth of flood water in Egerton Street and the adjacent green areas.

The third image shows the results from the final proposed solution; the implementation of flood barriers and a swale system. This resulted in a 0.2 m flood water depth in Egerton Street and the surrounding green spaces.

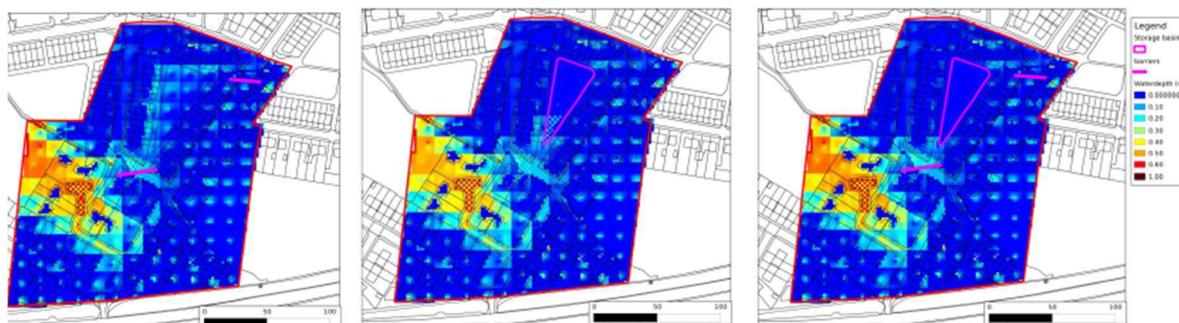


Figure 22: MULTI-HYDRO assessment results

Source: IOER

The water depths identified in the MULTI-HYDRO assessments were used by FLOReTO and HOWAD-PREVENT to undertake a damage mitigation assessment.

4.1.3.4 Implementation

It is identified that a more economical yet equally efficient FRe system would be the implementation of a smaller swale of 0.5 m deep and two barriers of 1 m height which would be located across Egerton Street and the adjacent Wilton Grove. The two barriers alone would not be sufficient to improve the situation and reduce flooding. However, the implementation of a swale has not been considered by the relevant stakeholders.

4.2 Example FRe systems elements at the building scale

This section will describe resilient systems elements and the resilient characteristics they possess in terms of their restorative capacity, their coping capacity and their adaptive capacity.

These resilient systems elements are to be considered at the building scale, as follows:

- Controlled flooding of a basement;
- Sealing of a basement;

Appendix 4: Description of MULTI-HYDRO

MULTI-HYDRO is a fully distributed physically based model developed at the Ecole des Ponts ParisTech during the SMARTeST project (Giangola-Murzyn et al., 2012). It is built on the four open source software developed separately and widely used in the scientific world. Multi-Hydro is the core that makes them interact (Figure. A).

The MULTI-HYDRO Surface Component (MHSC) models the surface runoff and relies on TRES, which was developed by HydroQual Incorporate and the Colorado State University (Velleux et al., 2011). It uses spatially distributed data (hydrological network, land use, type of soil, elevation, overland storage depth and the initial conditions) to model the behaviour of the catchment.

The MULTI-HYDRO Ground Component (MHGC) models sub-surface processes and relies on the VS2DT model, which was developed by the U.S. Geological Survey (Lappala et al., 1987). It uses finite differences to compute the pressure head, the total head, the moisture contents and/or the saturation and the mass balance, with the help of the law of conservation of fluid mass and a non-linear form of the Darcy equation. It takes into account the structure and the composition of the soil, the amount of water entering in the system, the temperature and the initial conditions.

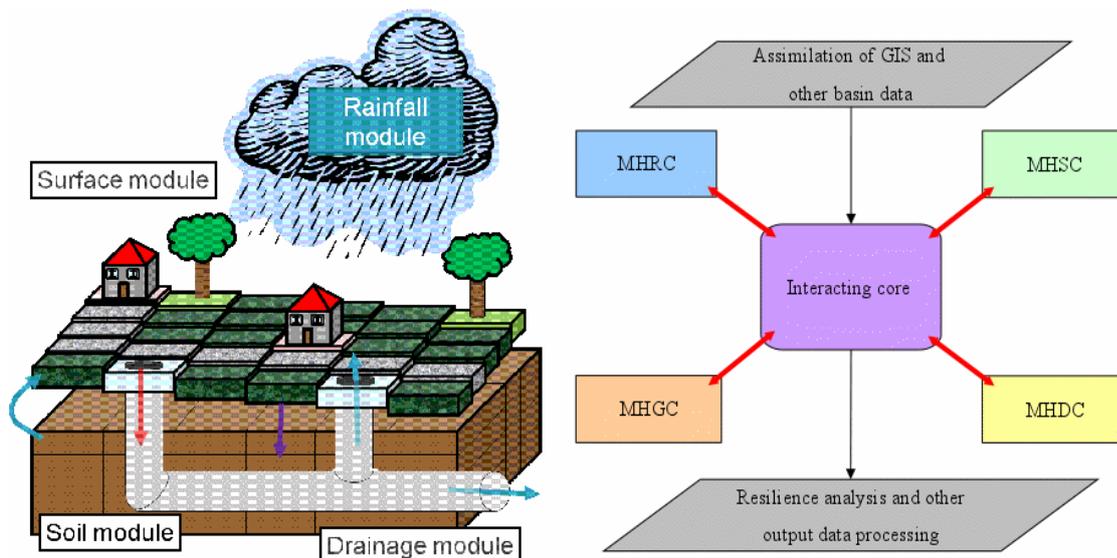


Figure A: MULTI-HYDRO model description and organisation of the interaction between each component of the MULTI-HYDRO model

The MULTI-HYDRO Drainage Component (MHDC) models flows in sewer systems and relies on SWMM, which is developed by the United States Environmental Protection Agency and the Camp Dresser & McKee incorporation (Rossman, 2010). The model basically relies on 1D Saint-Venant equations, which are used

to dynamically simulate sewer flow. The sewer system is described in details (pipe, node, shape, length, slope, initial head, Manning’s coefficient, etc.).

The MULTI-HYDRO Rainfall Component (MHRC) enables to downscale rainfall data. Indeed the usual C-band radar resolution of 1km*1km*5min does not enable to fully take advantage of the high resolution distributed hydrological model (10m). The space-time downscaling is performed with the help of universal multi-fractals cascades (Schertzer and Lovejoy, 1987). More details about the multi-fractal analysis and downscaling of this process can be found in Gires et al. (2011).

With its modular structure, MULTI-HYDRO can be easily adapted to the need of each case study. As it is GIS based and it don't need to be calibrated, MULTI-HYDRO is easily transportable to a case study to another one. The GIS data are quickly assimilated with the help of MH-AssimTool, an open source software developed at the Ecole des Ponts ParisTech during the SMARTeST project.

MH-AssimTool

MULTI-HYDRO requires GIS data pre-processed in a specific format. Nearly all data pre-processing could be done in ArcGIS or QGIS (or any GIS software). With these generic tools, the step of pre-formatting of the data is very repetitive and data transformation may easily be time consuming. Therefore an advanced and dedicated GIS data assimilation interface is a requisite to complete a distributed hydrological model that is both transportable from catchment to catchment and is easily adaptable to the data resolution. This is achieved both for the cartographic data and the linked information data (Richard et al., 2012). The MH-AssimTool (MULTI-HYDRO Assimilation Tool) software allows MULTI-HYDRO users to easily change the case study and/or to format the input files with new, better adapted grid size data.

MH-AssimTool provides a user-friendly interface (Figure B) to create easily the set of data required for the computation and facilitate the possibility to multiply the scenarios and the case studies.

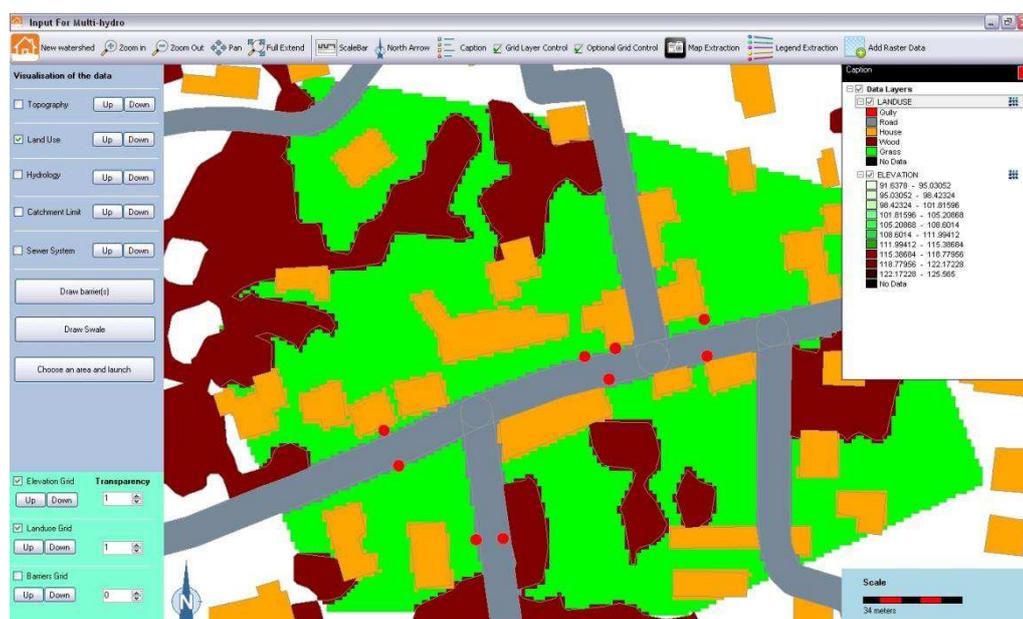


Figure B: MH-AssimTool main window

Implementation of the FRe technologies in MULTI-HYDRO

MULTI-HYDRO is developed in the aim to evaluate the impact of the small scale changes on the overall behaviour of an urban catchment. In the context of the SMARTeST project, MULTI-HYDRO can take into account the implementation of FRe technologies, simply defined as a particular category of land use at the appropriated (small) scales. Through the dedicated GIS based software, MH-AssimTool, it's really easy to implement different types of FRe technologies, as the perimetric barriers, individual barriers or alternative methods as swales (i.e., surface defined as a soil depression where the infiltration parameters are modified to facilitate the process). Moreover, as MULTI-HYDRO works on the base of time loops, it is possible to simulate the temporal variation of these devices, i.e. the progressive implementation of the barriers.

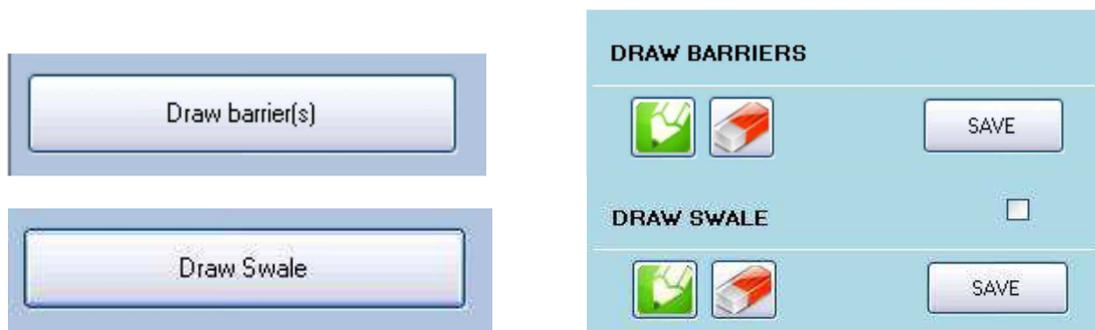


Figure C: screenshot of the part to draw FRe devices in MH-AssimTool.

MULTI-HYDRO can be used by a large panel of user, including people without particular competence in terms of computer experience. Indeed, this tool is developed to be more and more user-friendly, i.e. the parameters needed by the model are requested through several pop-up windows (Figures C-D). This easiness of use was demonstrated in February 2012, during a training event organised at Ecole des Ponts ParisTech and during which the SMARTeST project partners spend two days to use the model. During this event, each participant was able to create a catchment and test on it different scenarios. If this event was useful to people to discover the tool, it was also useful for the development of MULTI-HYDRO which benefited from the user feedbacks for further improvements.



Figure D: screenshot of a pop-up window in MULTI-HYDRO

MULTI-HYDRO opens quick and easy evaluation of the hydrological impact from FRe measures. An example of their implementation is given below for Heywood (UK) for a rainfall event of 58.5mm in 2 hours. Figure E illustrates the original situation when no FRe measures have been employed. This situation results in more than 60 cm of water in Egerton street and its surrounding green areas.

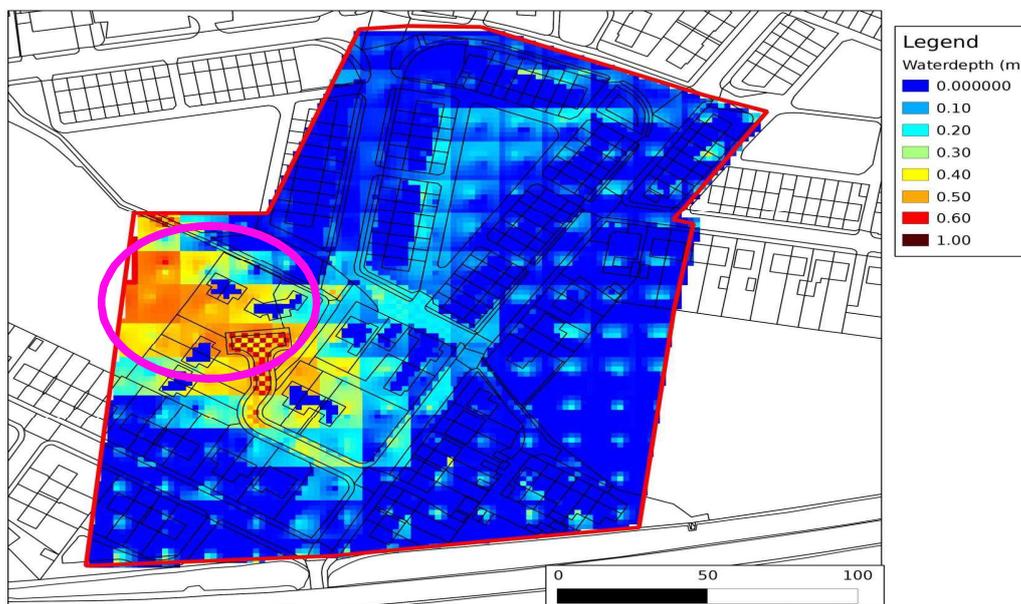


Figure E: the place circled by the pink shape is flooded by roughly 60 cm.

Then to improve the situation, three alternatives for the FRe measures have been considered: the implementation of perimetric barriers of 1 m height at two locations in the street, the implementation of a swale of 1.5 m depth and the implementation of the both (barrier of 1m height and a swale of 0.5m depth). With a numerous scenarios, MULTI-HYDRO can assess the global impact from the local implementations of FRe technologies.

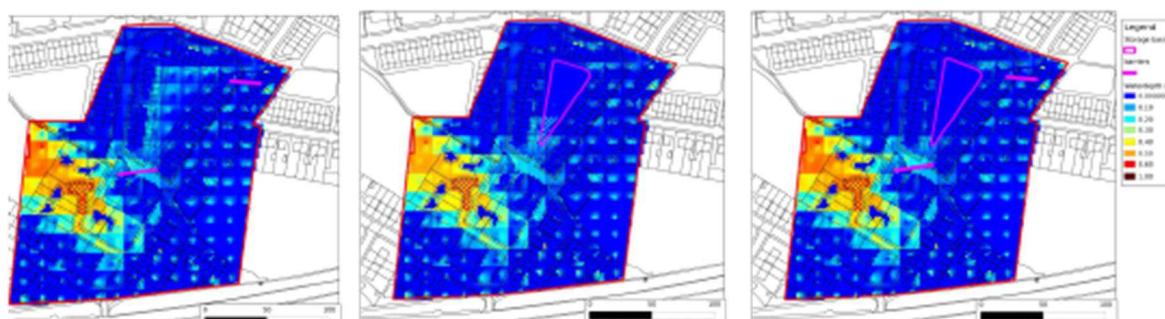


Figure F: from left to right, the results given after implementation of perimetric barrier of 1m, after implementation of a swale of 1.5 m and after implementation of perimetric barriers of 1m and swale of 0.5m depth. The FRe measure localisations are indicated by pink lines. The water depth ranges from 0 to 1m.

The obtained results (Figure F) suggest that in the case of Heywood, the most adapted solution seems to be given by the last option, i.e. associating a barrier with a swale of smaller depth. This option allows not only to reduce the implementation costs, but also to improve the visual perception by the inhabitants.

References

Giangola-Murzyn A., Gires A., Hoang C.T., Tchiguirinskaia I. and Schertzer D. (2012). MULTI-HYDRO: physically based modelling to assess flood resilience across scales, case studies in Paris region. Proceedings of 10th Urban Drainage conference, Belgrade 3-7 Sept. 2012, Serbia.

Gires A., Schertzer D., Tchiguirinskaia I., Lovejoy S., Maksimovic C., Onof C. and Simoes N. (2011b). Impact de la variabilité non-mesurée des précipitations en hydrologie urbaine: un cas d'étude dans le cadre multifractal. *La houille Blanche*, 2011 (4), 37-42

Lappala E.G., Healy R.W., Weeks E.P. (1987), Documentation of Computer Program VS2D to Solve the Equation of Fluid Flow in Variably Saturated Porous Media. U.S. Geological Survey, Denver, 184p

Richard J., Tchiguirinskaia I. And Schertzer D. (2012), GIS data assimilation interface for distributed hydrological models. Hydro-Informatics Conference, Hamburg 14-18 July 2012, Germany.

Rossman L.A. (2010). Storm Water Management Model, User's Manual. Version 5.0. U.S. Environmental Protection Agency, EPA/600/R-05/040.

Schertzer D. and Lovejoy S. (1987). Physical modelling and analysis of rain and clouds by anisotropic scaling and multiplicative processes. *J. Geophys. Res.*, 92(D8), 9693-9714.

Velleux M.L., England J.F. and Julien P.Y. (2011), TREX Watershed Modelling Framework User's Manual: Model Theory and Description. Department of civil engineering, Colorado State University, Fort Collins, January, 106p

Annexe D

« Guideline for implementation of flood resilience construction, technology and systems » (Extrait du livrable 4.3 du projet SMARTeST)



SMARTeST



Guideline for implementation of
flood resilience construction,
technology and systems

SMARTeST Project Team

Building Research Establishment (BRE)	UK	Dr Stephen Garvin Dr David Kelly, Katy Hunter
Technical University of Harburg and Hamburg (TUHH)	Germany	Prof. Peter Frohle Natasa Manojlovic, Vincent Gabalda, Karl Friedrich Daemrich, Baerbel Koppe
Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)	France	Jean-Luc Salagnac Dr Dorothee Marchand, Dr Aurelie Tricoire, Dr Celine Florence, François Boutin
University of Manchester (UNIMAN)	UK	Dr Iain White Adam Barker, Dr Paul O'Hare, Nigel Lawson, Dr Angela Connelly, Joanne Tippett
National and Kapodistrian University of Athens (NKUA)	Greece	Prof. Niki Evelpidou Konstantia Chartidou, Andreas Vassilopoulos, Niki Bouziotopoulou
Dion Toumazis & Associates (TOUM)	Cyprus	Dr Antonis Toumazis Demetra Toumazi-Hadjiloizi
Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC)	France	Dr Daniel Schertzer, Dr Ioulia Tchiguirinskaia Jose Frederic Deroubaix, Elodie Moulin, Agathe Giangola–Murzyn, Emilie Rioust, Bruno Barocca, Auguste Gires, Julien Richard
Technical University of Delft (TUD)	Netherlands	Dr Marie-Claire ten Veldhuis Loes Janssen, Matthieu Spekkers
Universidad Politécnica de Madrid (UPM)	Spain	Prof. Javier Diez Ass. Prof. José Santos López Gutiérrez, Dr Dolores Esteban, Ass. Prof. Enrique Calderon, Ass. Prof. Rosa M. Paz, Julien Victor Monnot
Leibniz Institute of Ecological, Urban and Regional Development (IOER)	Germany	Dr Thomas Naumann Sebastian Golz, Dr Reinhard Schinke, Prof. Joachim Tourbier, Prof. Jochen Schanze



Contents

The SMARTeST Project	iii
SMARTeST Project Team	iv
Authors	v
With contributions from	v
Editors	v
Other SMARTeST reports	v
Executive Summary	Error! Bookmark not defined.
Contents	viii
List of Figures	xi
List of Tables	xiv
1 Introduction	1
1.1 Background and objective of the guideline	1
1.2 Users of the guideline	1
1.3 Contributions of partners to the guidelines	1
Part I: Fundamentals of FRe Measures Implementation	3
I-1 Implementation strategies for FRe management	3
I-1.1 Fundamental considerations for implementation strategies	3
I-1.2 Indicators of success	6
I-1.3 Decision support for Public Authorities	11
I-1.4 Development opportunities for Capacity Building – a case study example	14
I-1.4.1 Description of case study areas	15
I-1.4.2 Capacities and performance in case study areas	15
I-1.4.3 Implementation strategies	34
I-1.5 Contribution to project objectives	36
I-1.6 Appendix: Summary – documentation of case studies in Capacity Building for stakeholders	38
I-2 Models and tools for the implementation of FRe constructions and technologies	52
I-2.1 Introduction	52
I-2.2 Integration of current technologies in flood risk modelling	52
I-2.2.1 Current state of research in flood damage assessment	52
I-2.2.2 SMARTeST Toolkit	54
I-2.2.3 Coupling of SMARTeST models and tools	58
I-2.2.4 Considered categories of FRe T	59
I-2.2.5 Selected results from case study analyses	60
I-2.3 Capacity Building on SMARTeST models and tools	63
I-2.4 References	64

Part II: Findings and documentation of SMARTeST case study results	68
II-1 Case study – Villecresnes (France)	69
II-1.1 Description of the case study: Villecresnes	69
II-1.2 Background	71
II-1.3 Research approaches/methodology	72
II-1.4 Implementation strategies	73
II-1.5 Results	76
II-1.6 Short summary	81
II-1.7 References	81
II-2 Case Study – Paphos (Cyprus)	82
II-2.1 Introduction	82
II-2.2 The case study area	82
II-2.3 Background of the coastal flooding problem	86
II-2.4 Damage assessment	87
II-2.4.1 Building construction type	87
II-2.4.2 FloReTo modelling	87
II-2.5 FRe application	91
II-2.6 References	94
II-3 Case Study – Pendrecht, Rotterdam (The Netherlands)	95
II-3.1 Background	95
II-3.2 Research approaches/methodology	98
II-3.3 Sensitivity analysis	101
II-3.4 Results/findings	101
II-3.5 Conclusions	104
II-3.6 References	104
II-4 Case Study – Kephisos Basin, Municipality of Nea Philidelphia (Greece)	105
II-4.1 Introduction	105
II-4.2 Background	107
II-4.3 Research approaches/methodology	108
II-4.4 Results/findings	111
II-4.5 Summary	113
II-4.6 References	113
II-5 Case Study – Heywood, Greater Manchester (United Kingdom)	114
II-5.1 Background	114
II-5.2 Research approaches/methodology	116
II-5.3 Results/findings	117
II-5.4 Summary	125
II-5.5 References	125
II-5.6 Appendix: Overview of relevant building types in Heywood	126
II-6 Case Study – Valencia (Spain)	139
II-6.1 Introduction	139
II-6.2 Research approach/methodology	141
II-6.3 Results of the investigation	141

II-6.3.1	Assessment of the water level	141
II-6.3.2	Building typology for the case study, Valencia	141
II-6.3.3	Building vulnerability and the effects of object related FRe technologies	144
II-6.4	Damage modelling	148
II-6.5	Short summary	153
II-6.6	Acknowledgements	153
II-6.7	References	154
Part III:	Constraints and opportunities for Capacity Building on the national level	156
III-1	Capacity Building related to the Paphos Case Study (Cyprus)	158
III-2	Capacity Building related to the Dresden – Kleinzschachwitz Case Study (Germany)	162
III-3	Capacity Building related to the Valencia Case Study (Spain)	171
III-4	Capacity Building related to the Heywood Case Study (United Kingdom)	181
III-5	Capacity Building related to the Kephisos Basin Case Study (Greece)	192
III-6	Capacity Building related to the Washington DC Case Study (USA)	197

List of Figures

Part I

Figure I.1-1: Agencies of influence for the horizontal and vertical integration of flood resilience	5
Figure I.1-2: Functions of the DSS FLORETO and HOWAD	13
Figure I.1-3: The “performance meter” used on the Website for the Anacostia Project.	32
Figure I.2-1: Components of the SMARTeST toolkit. (Source: Manojlovic, 2013)	54
Figure I.2-2: Assignment of SMARTeST models and tools to the SPRC-concept.	57
Figure I.2-3: Coupling models and tools for flood probability assessment and flood damage assessment to assess flood risk	58
Figure I.2-4: Modelling the effects of selected FRe T regarding vulnerability mitigation considering different flood scenarios and various levels of FRe implementation using the case study Heywood/Greater Manchester (UK).	59

Part II

Figure II.1-1: Location of the Villecresnes city	69
Figure II.1-2: Land use (A), sewer system (B) and elevation (C) maps for the modelling domain. The red circle indicates the location of the outlet of the sewer system on picture B and the outlet of the surface run-off on picture C	70
Figure II.1-3: Rainfall event used in this study	71
Figure II.1-4: User interface of the MH-AssimTool software	71
Figure II.1-5: Multi-hydro model description and organisation of the interaction between each component of the Multi-Hydro model	72
Figure II.1-6: Example of techniques used in Val-de-Marne to protect installations (Source: Snapshots from the video: 'Ohval! 18 Spécial crue centennale' http://www.cg94.fr/webtv/term/1061#19442)	74
Figure II.1-7: Location of the tennis court in the studied watershed.	75
Figure II.1-8: System of barrier used in this case study. (source: www.altoo-protec-flood.fr)	75
Figure II.1-9: Location of the area being 'virtually' protected by a peripheral barrier	76
Figure II.1-10: The impact of connecting houses to the sewer system: (A) on the surface run-off (B) on sewer system discharge (m^3/s)	77
Figure II.1-11: The overland water depth before (A) and after (B) protecting houses at the end of the rainfall event (80min of rainfall, 22mm)	78
Figure II.1-12: Effect of a retention basin on the surface discharge at the outlet of the catchment	79
Figure II.1-13: Effect of a peripheral on the overland water depth before (left) and after (right) protecting the area	79
Figure II.1-14: Effect of a peripheral on the overland water depth before (A) and after (B) protecting the area	80
Figure II.1-15: Sewer system discharge before (A) and after (B) protecting the area	80

Figure II.2-1: Location of island Cyprus in the Mediterranean Sea	83
Figure II.2-2: Map of Cyprus – Location of Paphos, the case study area.	83
Figure II.2-3: Satellite map (Google Earth) of the study area (Poseidon Avenue is indicated within the red line).	84
Figure II.2-4: Profiles across Poseidonos Avenue.	84
Figure II.2-5: Satellite (Google Earth) image of the study area.	85
Figure II.2-6: Photographs of the shops at Poseidonos Avenue.	86
Figure II.2-7: The up-stand wall (left) the area with the wall removed (right).	86
Figure II.2-8: Map of plot boundaries (Department of Lands and Surveys).	88
Figure II.2-9: The flood prone area – subdivided in building blocks.	88
Figure II.2-10: The property uses in each block.	89
Figure II.2-11: FLORETO input file for typical bank.	90
Figure II.2-12: Flood damage curves for a property type.	90
Figure II.2-13: Cumulative Flood damage curves for all properties.	91
Figure II.2-14: Principle of the demountable flood barrier.	92
Figure II.2-15: 3-D model of flood barrier. Left during normal conditions, right mounted.	92
Figure II.2-16: The barrier under development. Left: Prototype under construction. Right: Exhibition during the SMARTeST conference in Athens (2012-09).	93
Figure II.3-1: Study area location in Rotterdam	96
Figure II.3-2: Predominant building types in Pendrecht: low and tall terraced houses (left), multi-family in row standing buildings (right).	97
Figure II.3-3: Building sub-types in the study area.	97
Figure II.3-4: Four water level situations in the study area: a) +0,3 m, b) + 0,5 m, c) +0,6 m, d) +0,7 m	100
Figure II.3-5: Depth-damage curves used in this study (adapted from a case study in Heywood)	100
Figure II.3-6: Assigned water levels for each building polygon [h in meters]. Top: +0.5m (run no. 1), middle: +0.6m (run no. 2), bottom: +0.7m (run no. 3).	102
Figure II.3-7: Water level calculation in HOWAD-PREVENT (green – no damage)	104
Figure II.4-1: The two building blocks in satellite image and in drawing	106
Figure II.4-2: Location of Nea Philadelphia and overview of the studied building blocks (red square).	107
Figure II.4-3: The House type is Multi with basement, with garage, garden, fence and balconies (buildings 3, 6, 7, 14, 16, 19 and 22).	108
Figure II.4-4: Two storey house, with the level of the basement at -1.2 m. The foundation is reinforced concrete, as in all the studied buildings. This image corresponds to building 6.	109
Figure II.4-5: Configuration of the basement – definition of each room type and building materials.	109
Figure II.4-6: Configuration of the ground floor for building 6 – definition of each room type and building materials.	110
Figure II.4-7: The final imported data before the results. In all the studied buildings the central heating was oil.	110
Figure II.4-8: Diagram of water depth and damage percentage estimation for a house with a basement. In this case, the level of the basement is 1.2 m below the level of the road. When the water depth reaches 2 m, the damages increase rapidly.	112

Figure II.5-1: Heywood area; six locations potentially exposed to pluvial flooding	115
Figure II.5-2: Heywood area; open and historically culverted watercourses. Source: Bubel 2008.	116
Figure II.5-3: Heywood area; 'Wilton Grove'. Green line: large catchment boundary (to evaluate the lateral inflow for the small catchment). Red line: small catchment boundary. Source: ENPC 2012.	118
Figure II.5-4: Heywood area; 'Wilton Grove'. Hydraulic modelling results (flood water levels) for a certain rainfall scenario based on Multi-Hydro simulations. Source: ENPC 2012.	119
Figure II.5-5: Typology of residential buildings for the case study area Heywood. Legend of the coloured elements: Dark grey: no occurrence. Light grey: building types with less quantitative relevance. Yellow: building types with high quantitative relevance. Orange: building type(s) with most quantitative relevance. Source: IOER 2012.	120
Figure II.5-6: Heywood area. Classified building types for 'Wilton Grove'. Source: IOER 2012. (Data source: Ordnance Survey Mastermap)	121
Figure II.5-7: Heywood urban area. Classified building types for 'Pilsworth road'. Source: IOER 2012. Data Source: Ordnance Survey Mastermap.	122
Figure II.5-8: Flood scenarios and the effects on building related water level (Source: IOER); data source: water level ENPC 2012)	123
Figure II.5-9: Results of the calculation for the case study area Wilton Grove	124
Figure II.5-10: Damage maps for the case study area Heywood, Wilton Groove based on rainfall event 58.5mm/2h (Source: IOER 2013; Data sources: (a) Water levels: ENPC, (b) Building polygons: Ordnance Survey Mastermap).	125
Figure II.6-1: Valencia with the study areas 'Ensanche' and 'Barrio Maritimo'	140
Figure II.6-2: Derivation of construction periods for the case studies in Valencia (Spain)	142
Figure II.6-3: Building type map and the Building type matrix of the study areas Ensanche and Barrio Maritimo as a result of the building type mapping (data source: aerial photographs: Institute of Cartography Valencia; building polygon layer: Valencia City Council)	144
Figure II.6-4: Predominate building types of the study areas 'Ensanche' and 'Barrio Maritimo' (a) single unit, attached house, about 1925 (ST2) (b) single (two) unit, attached house, about 1990 (ST5) (c) multi-unit, attached house about 1915 (MTH2) (d) multi-unit, attached house about 1950 (MTH3)	145
Figure II.6-5: Basic view of the fundamentals and the results of the synthetic vulnerability analysis for two relevant building types in the study area Ensanche, source: Kaidel 2012, modified	147
Figure II.6-6: Information to the basement levels in the study area Ensanche used for adaption of the depth-damage-functions shown for the example MTH2 (data source of basement levels: Sede Electrónica del Catastro)	148
Figure II.6-7: Results of the reference scenario with object-related damage to residential buildings source: IOER 2012.	149
Figure II.6-8: Classification of the buildings in case of Ensanche with regard to the exposure based on the water levels of the reference scenario	150
Figure II.6-9: Derivation of Scenarios to characterise the effects of FRe Technologies	151
Figure II.6-10: Comparison of the scenario analysis using Weight DDF and Monte Carlo Simulation (example of one model run) for one quarter of exposure zone	152
Figure II.6-11: Comparison of scenarios characterising the effects of FRe Technologies	153

List of Tables

Part I

Table I.2-1: Advantages and disadvantages of empirical and synthetic flood damage models (Merz et al., 2010 modified)	53
Table I.2-2: Overview of the model approaches within the SMARTeST toolkit	55
Table I.2-3: Application of the model approaches within the SMARTeST case studies	56
Table I.2-4: Selected results from case study analyses.	61

Part II

Table II.2-1: Commercial Property Categories.	89
Table II.2-2: Cost of Flood Barrier	93
Table II.3-1: Building type classification information sources	99
Table II.3-2: Modelling results combining two building type and three water level combinations	101
Table II.4-1: FloReTo results from the studied buildings	111
Table II.5-1: Sources of required data for flood damage assessment using HOWAD-Prevent	117

Part II: Findings and documentation of SMARTeST case study results

The SMARTeST models and tools have been applied in European case studies to test their functionality considering various organisational, local contexts as regional characteristics may influence the methodology and hence require an adaptation in generating input data for the models and tools. The following chapter reflects overall results of case study research and specifies research questions to reach convincing evidence grounding. The case study approach is described in section I-2.2.5 and is used to demonstrate the different models and tools as well as to compare the effects of different FRe T implementation alternatives at a preferably high spatial and contextual resolution.

Case study areas are:

- Villecresnes/Paris (France) Chapter II-1
- Paphos (Cyprus) Chapter II-2
- Pendrecht/Rotterdam(The Netherlands) Chapter II-3
- Nea Philadelphia (Greece) Chapter II-4
- Heywood/Greater Manchester (United Kingdom) Chapter II-5
- Ensanche/Valencia (Spain) Chapter II-6

The following chapters reflect the overall results of the work done within the case study.

II-1 Case study – Villecresnes (France)

Authors:

Agathe Giangola-Murzyn, Abdellah Ichiba, Ioulia Tchiguirinskaia, Daniel Schertzer,

École Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC)

II-1.1 Description of the case study: Villecresnes

Villecresnes is a town of 9639 citizens, located in the south east of the Paris region (Figure II.1-1). Being a part of the Val-de-Marne department, it covers an area of 5.62 km². As most of the cities in the Paris region, Villecresnes has undergone a huge urbanisation during recent years, which resulted in a significant decrease of green areas and an important soil sealing.

The city of Villecresnes was heavily affected by several pluvial flood events in 2009. The July 22 event was recognised as a ‘natural catastrophe event’ according to the French law. The flooding of the gymnasium of Villecresnes is an example of the recorded damages. The ground-floor, occupied by the main room for sport activities, was covered with more than 20 cm of water. The dojo located in the basement, was damaged after this event. Water infiltrated through the ceiling slab. The floor, the tatamis, and the ceiling were damaged.



Figure II.1-1: Location of the Villecresnes city

The sport equipment which was not damaged was moved to another location to be used by other cultural associations. The ‘sharing of the space with floods’ has been difficult because sport activities require a lot of space.

The flood damages could have been reduced by using an existing pumping system. But the users of the gymnasium ignored the existence of this pump, which was moreover not well maintained and could not work correctly. Finally, the decision was taken to move the gymnasium exposed to one in a year flood. A new gymnasium was built outside the flood risk area.

Since 2009 the city has been involved in the national strategy for sustainable development and its Local Plan of urbanisation promotes collective housing, aiming to protect green areas. After the floods of July 22, 2009 the city has also adopted a policy of flood protection and risk management.

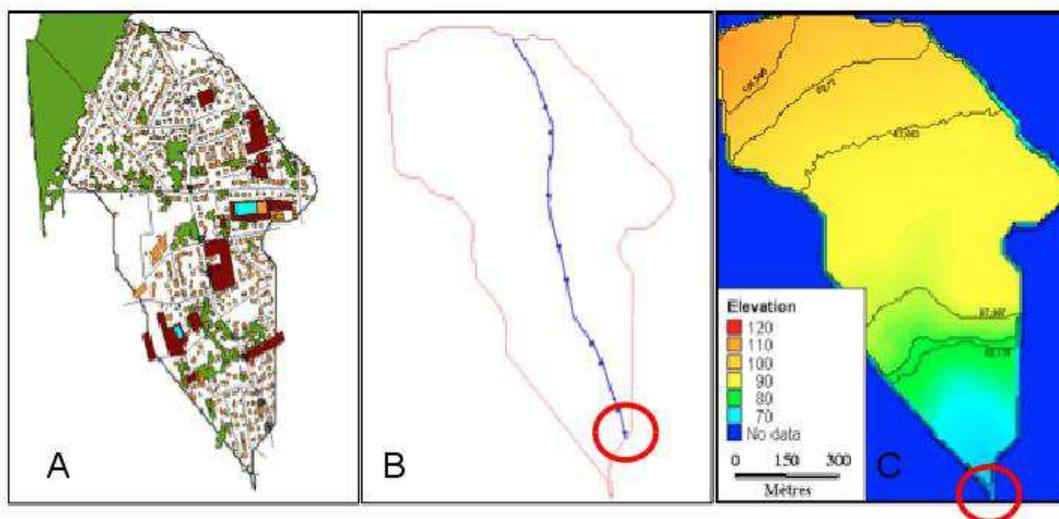


Figure II.1-2: Land use (A), sewer system (B) and elevation (C) maps for the modelling domain. The red circle indicates the location of the outlet of the sewer system on picture B and the outlet of the surface run-off on picture C

The modelled area is located on the East side of the city. Its surface is 7200 m² (72 ha) and its elevation ranges from 120m in the North to 50 m in the South with a constant gradient slope. The land use is characterised by eight classes (see Figure II.1-2). However, roads, houses, greenhouses, and tennis courts have similar parameters.

The sewer system is defined by a linear concrete pipe the diameter of which is 40 cm on the northern third and 60cm on the southern two-thirds. In this case study, four scenarios have been tested using Multi-Hydro model. For each of these scenarios, the objectives will be presented and the results will be discussed. The rainfall pattern (Figure II.1-3) is the same for each scenario: it is a constant (in space and in time) rainfall of 22 mm during 80 minutes. It corresponds to a return period of 10 years.

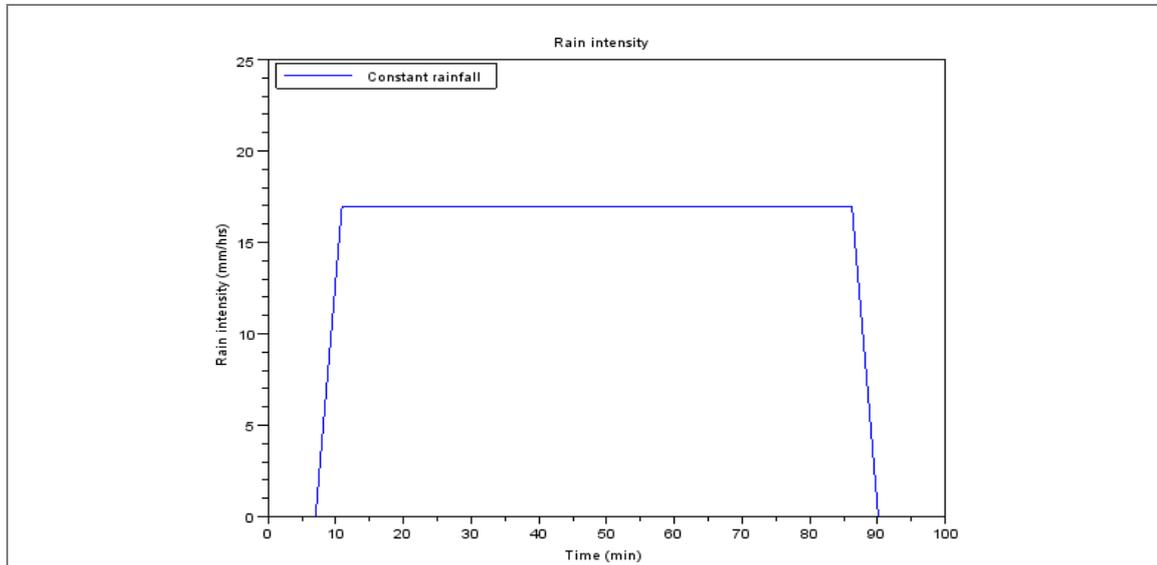


Figure II.1-3: Rainfall event used in this study

II-1.2 Background

Multi-Hydro is a fully distributed physically based model developed at the Ecole des Ponts ParisTech. It is built on the four open source software developed separately and widely used in the scientific world.

With its modular structure, Multi-Hydro can be easily adapted to the need of each case study. As it is GIS based and it doesn't need to be calibrated, Multi-Hydro is easily transportable to a case study to another one. The GIS data are quickly assimilated with the help of MH-AssimTool, an open source software developed at the Ecole des Ponts ParisTech.

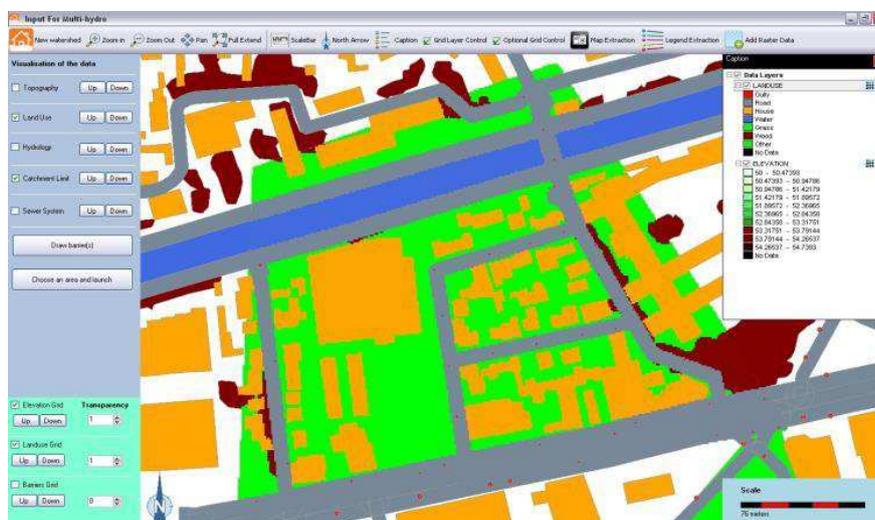


Figure II.1-4: User interface of the MH-AssimTool software

II-1.3 Research approaches/methodology

The Multi-Hydro Surface Component (MHSC) models the surface run-off and relies on TREX, which was developed by HydroQual Incorporate and the Colorado State University (Velleux *et al.*, 2011). It uses spatially distributed data (hydrological network, land use, type of soil, elevation, overland storage depth and the initial conditions) to model the behaviour of the catchment.

The Multi-Hydro Ground Component (MHGC) models sub-surface processes and relies on the VS2DT model, which was developed by the U.S. Geological Survey (Lappala *et al.*, 1987). It uses finite differences to compute the pressure head, the total head, the moisture contents and/or the saturation and the mass balance, with the help of the law of conservation of fluid mass and a non-linear form of the Darcy equation. It takes into account the structure and the composition of the soil, the amount of water entering in the system, the temperature and the initial conditions.

The Multi-Hydro Drainage Component (MHDC) models flows in sewer systems and relies on SWMM, which is developed by the United States Environmental Protection Agency and the Camp Dresser & McKee incorporation (Rossman, 2010). The model basically relies on 1D Saint-Venant equations, which are used to dynamically simulate sewer flow. The sewer system is described in details (pipe, node, shape, length, slope, initial head, Manning's coefficient).

The Multi-Hydro Rainfall Component (MHRC) enables to downscale rainfall data. Indeed the usual C-band radar resolution of 1 km * 1 km * 5 min does not enable to fully take advantage of the high resolution distributed hydrological model (10 m). The space-time downscaling is performed with the help of universal multi-fractals cascades (Schertzer and Lovejoy, 1987). More details about the multi-fractal analysis and downscaling of this process can be found in Gires *et al.* (2011).

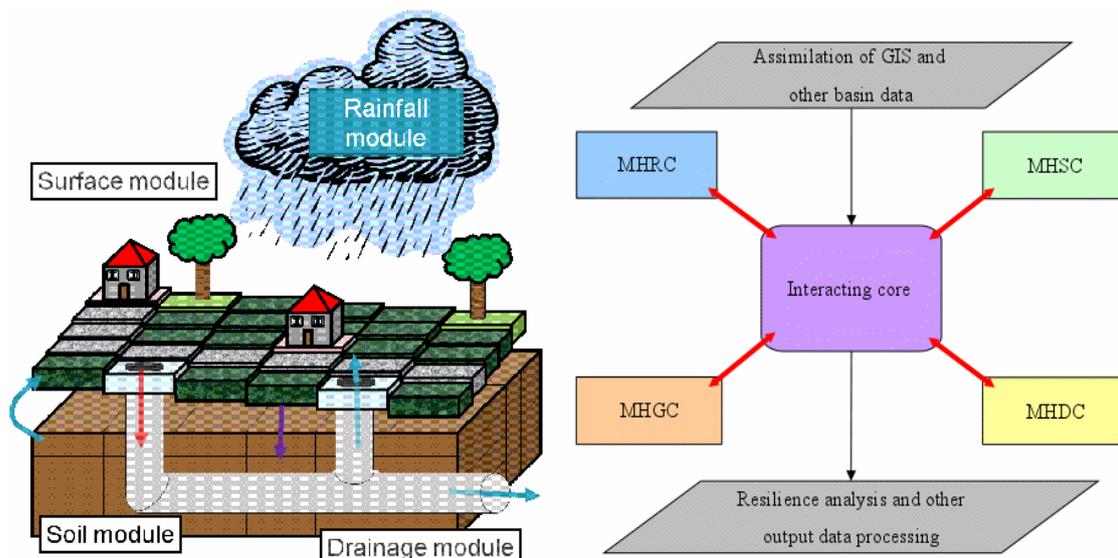


Figure II.1-5: Multi-hydro model description and organisation of the interaction between each component of the Multi-Hydro model

II-1.4 Implementation strategies

Multi-Hydro can be used to model the hydrological behaviour of a catchment under different scenarios, of rainfall and changes of land use.

As the time of computation is relatively short (around 10 minutes for three hours of event on a catchment of 1 km² with a resolution of 10 m), it is easy to produce different scenarios. Here, we will show four scenarios of land use modifications to illustrate the abilities of the model. The scenarios are as follows:

- Channelling roof collected water to drainage network;
- Applying FRe technology;
- Tennis court used as a retention basin;
- Implementation of a peripheral barrier.

These options were considered only for simulation purposes.

A. Channelling roof collected water to drainage network

For peri-urban watershed, water from the roofs of buildings represents an important volume and has a great influence on the surface run-off. Storing water in order to prevent it to directly run off the streets has been the subject of several recent scientific researches. Several storage techniques have been tested: underground reservoirs, wells and green-roofs.

The Multi-Hydro model has simulated the impact of channelling water collected by roofs directly to the sewage system, so as to avoid this volume of collected rain water to participate in the run-off process. In this scenario, both the impact of this change on surface run-off and the possible impact on the sewer system will be analysed.

B. House protection using FRe technologies

Protecting houses, public buildings and electrical installations against water penetration during the storm event is a crucial step to decrease their vulnerability. It may also be helpful to increase resilience.

The SMARTeST project highlighted the great variety of available protection products. The most commonly used are the flood barriers. According to their design, these barriers may be flexible and easy to install after flood alert diffusion.

The department of Val-de-Marne has adopted a protection strategy after the catastrophic floods of 1910 and 1920 and a risk management unit was established. The primary task of this unit is to secure and seal the most vulnerable buildings and important facilities such as electrical installations (see Figure II.1-6).

For simulation purposes, protections around buildings were described as 5m high barriers. This height is of course totally unrealistic. But, in term of numerical simulation and in the context of the scenarios studied, protections needed to be efficient in all case, hence this size of protection of 5m.



Figure II.1-6: Example of techniques used in Val-de-Marne to protect installations
(Source: Snapshots from the video: 'Ohval! 18 Spécial crue centennale'
<http://www.cg94.fr/webtv/term/1061#19442>)

C. Tennis court used as a retention basin

Alternative techniques have become today the most widely used tools for storm water management in cities. These techniques enable the storage of rainwater during the storm event. This stored water infiltrates the soil or maybe injected into the drainage network through a flow regulator after the event.

Great efforts have been done during the last few years to integrate such water storage in the urban landscape and make their presence acceptable for the population. In the Paris region, the Seine-Saint-Denis department is one of the leaders in this field. This department can demonstrate an important know-how after 30 years of research on these techniques.

Retention basin with double function is one of the techniques being used and tested in Seine-Saint-Denis. A football ground was for instance laid out so as to ensure a rainwater storage capacity during rain period and return to its normal condition after the event.

In this case study, it was attempted to simulate the same things with a tennis court, the location of which is shown in Figure II.1-7. This is obtained by excavating the ground so as to lower the tennis court surface by 2 metres. In the Multi-Hydro model, this scenario was modelled to assess the impact of this decision on the water run-off in the watershed.



Figure II.1-7: Location of the tennis court in the studied watershed.

D. Implementation of a perimeter barrier (FRe technology)

According to the results of the simulation on the unprotected catchment, a group of houses will be protected with a peripheral barrier of a type displayed on Figure II.1-8. The location of this protected area is shown in Figure II.1-9.

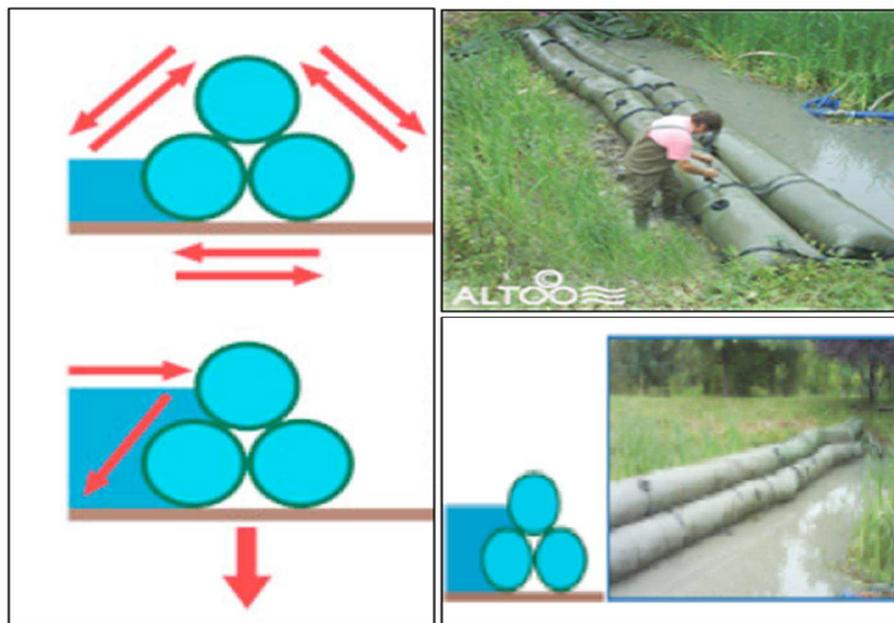


Figure II.1-8: System of barrier used in this case study. (source: www.altoo-protoc-flood.fr)

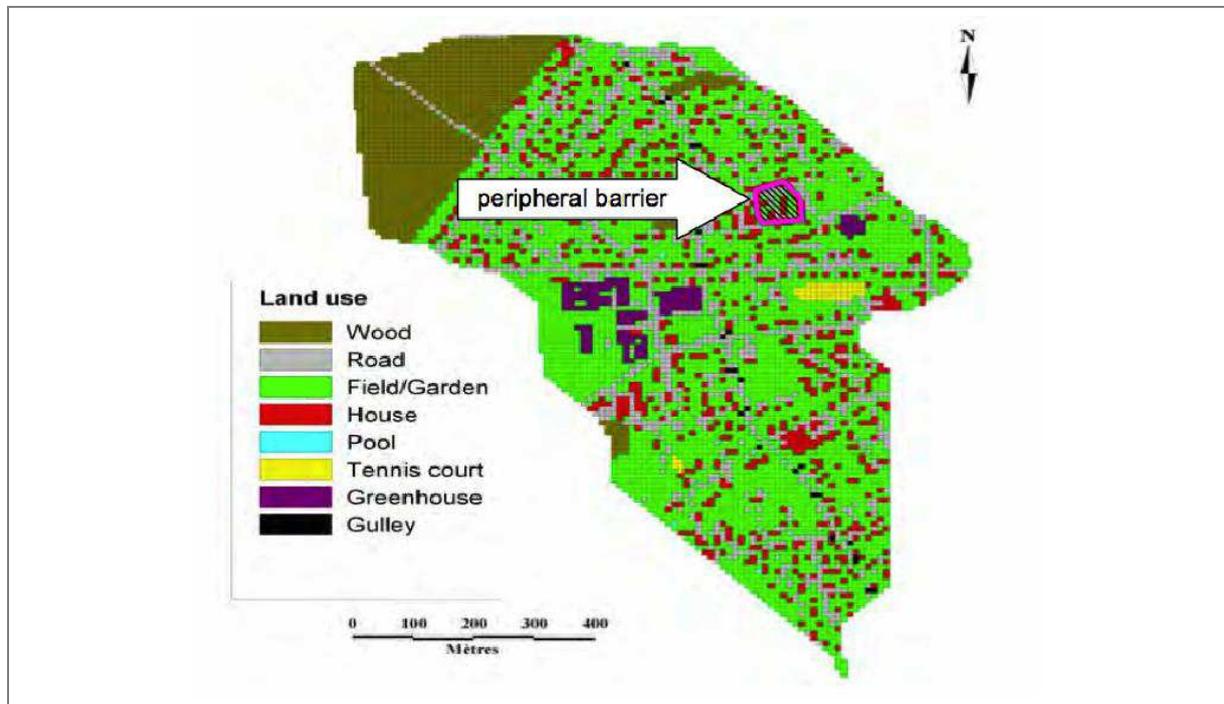


Figure II.1-9: Location of the area being 'virtually' protected by a peripheral barrier

II-1.5 Results

A. Channelling roof collected water to drainage network

To evaluate the impact of the connection of each property of the studied area to the drainage system on the hydrological behaviour of the catchment, the house's pixels were virtually disconnected and connected to the drainage system. The results are given in the Figure II.1-10 for the surface discharge (Figure II.1-10 A) and for the drainage discharge (Figure II.1-10 B).

Figure II.1-10 (A) shows that connecting properties to the sewer system decreases the surface run-off by $0.19\text{m}^3/\text{s}$, which present 30% of the initial run-off whilst Figure II.1-10 B shows that the sewer system discharge was increased by $0.21\text{m}^3/\text{s}$ (43% of the initial value).

With this simulation, we show that the connection of the properties to the drainage system has an important impact of the hydrological behaviour of the catchment by decreasing the surface run-off and increasing the discharge in the drainage system pipes.

This decrease of the water run-off does not rely on any FRe technology but on decisions concerning the water drainage system in the city. It may then rather be considered as a 'sustainable development' measure. Further reflections have nevertheless to be carried out in order to assess the possible negative effects (drainage overflow, overpressure).

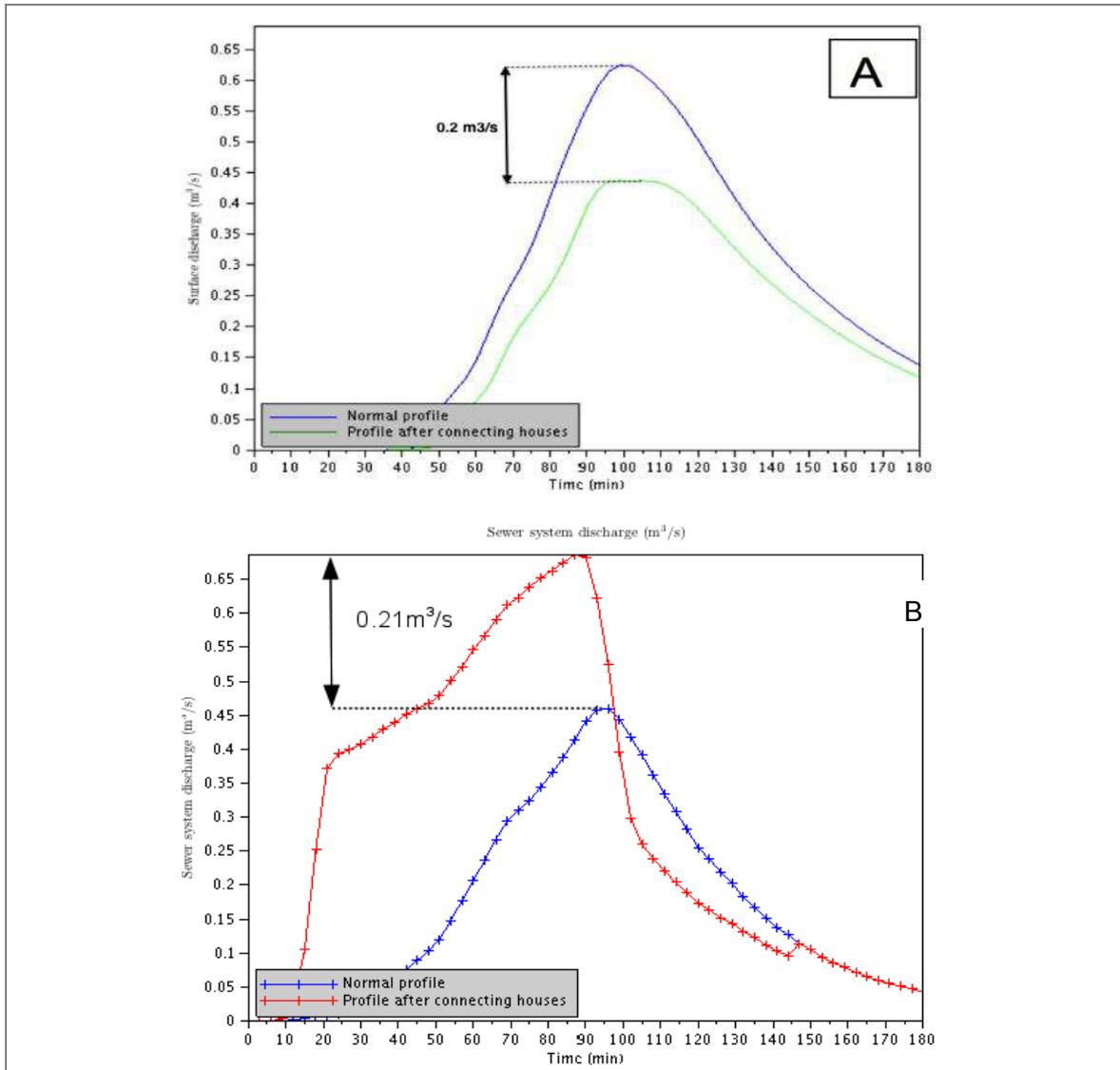


Figure II.1-10: The impact of connecting houses to the sewer system:
 (A) on the surface run-off
 (B) on sewer system discharge (m³/s)

B. House protection using FRe technologies

In this option, a 1-in-10 year storm event has been modelled with protecting all openings of houses and buildings. In this case, it is considered that the protections are completely efficient and so, there is no possibility of protection overflows.

The distribution of run-off resulting from the simulation is shown in Figure II.1-11. Gardens, parks and roads are flooded.

In reality, it is difficult to efficiently protect all houses against any flood water depths. The question will be to evaluate which are the houses to protect and for which height, keeping in mind the potential risk to flood an important access roads (access for hospital, evacuation of people).

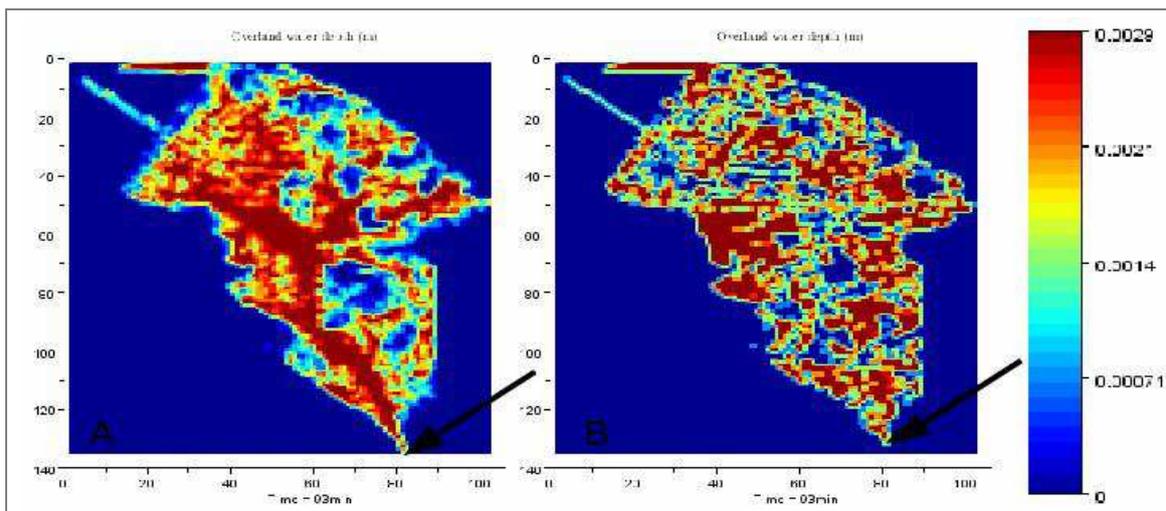


Figure II.1-11: The overland water depth before (A) and after (B) protecting houses at the end of the rainfall event (80min of rainfall, 22mm)

C. Tennis court used as a retention basin

One of the most common measures of land planning in Ile de France is to create areas with a double use. During dry periods, these areas are places of relaxation, such as parks, sports fields and green spaces. In the case of heavy rain, these areas become storage tanks for rainwater and run-off and can be completely flooded without damages.

In this study, the tennis courts were modelled as a potential retention basin to evaluate the effect of this change on the hydrological behaviour of the study area. The location of the tennis courts is given in Figure II.1-7.

Figure II.1-12 shows the impact of this change on the run-off rate at the outlet. The implementation of this modification reduced by $0.2\text{m}^3/\text{s}$ the peak flow at the surface.

These results need to be analysed as a series of maps centred on the tennis court area to evaluate the effect of this measure on the hydrological behaviour in the neighbourhood of the tennis courts.

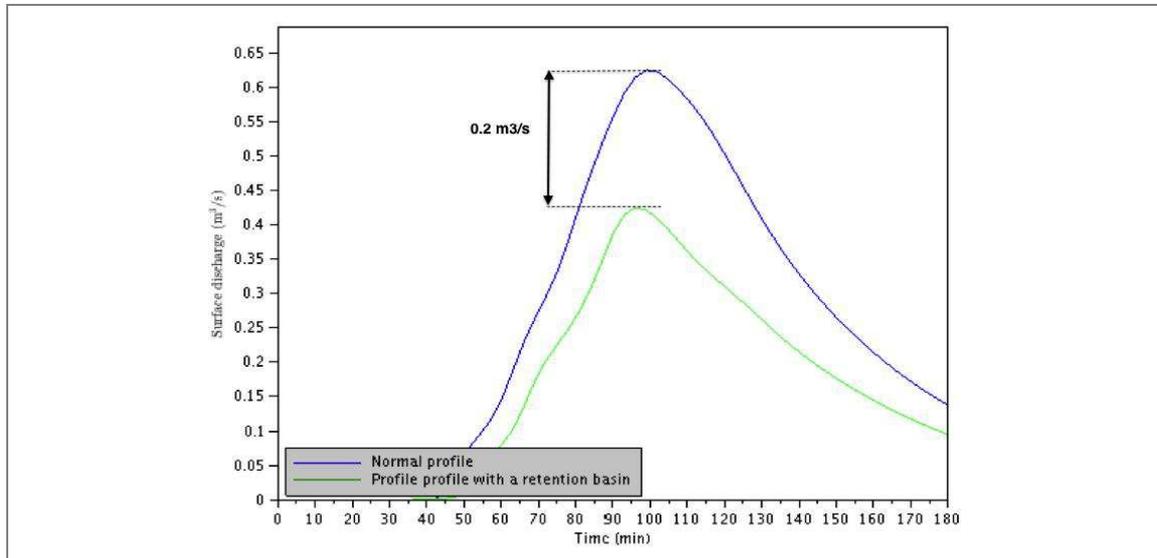


Figure II.1-12: Effect of a retention basin on the surface discharge at the outlet of the catchment

D. Implementation of a perimeter barrier

The simulation taking into account a perimeter barrier provides some indications on the effects of this kind of protection on the hydrological behaviour of the catchment.

The results of the simulation of the unprotected catchment show that a group of houses is vulnerable to the flood risk (pink circle) (Figure II.1-13 left). This area shows an overland water depth of 50 cm.

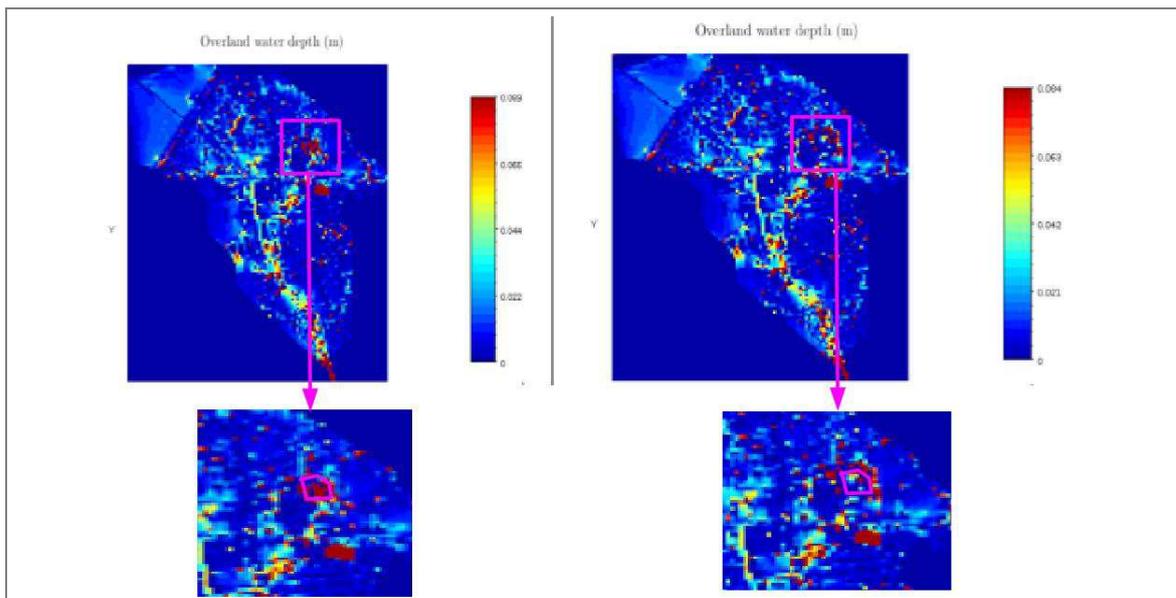


Figure II.1-13: Effect of a peripheral on the overland water depth before (left) and after (right) protecting the area

This area is 'virtually' protected by a peripheral barrier as shown previously in Figure II.1-10. The situation of the protected area looks to be improved (Figure II.1-13 right).

The overland water depth is only of 10 cm inside of the protected area, also a decrease of the water depth of 80%. Moreover, the situation in the neighbourhood does not worsen after implementing the barrier, i.e. roughly 20 cm of water in both cases.

The discharge at the surface outlet and drainage system outlet (Figure II.1-14 and Figure II.1-15) is not modified by the implementation of the barrier. This protection device has a beneficial effect on the vulnerable area without too many negative effects neither on the neighbourhood nor on the behaviour of the catchment.

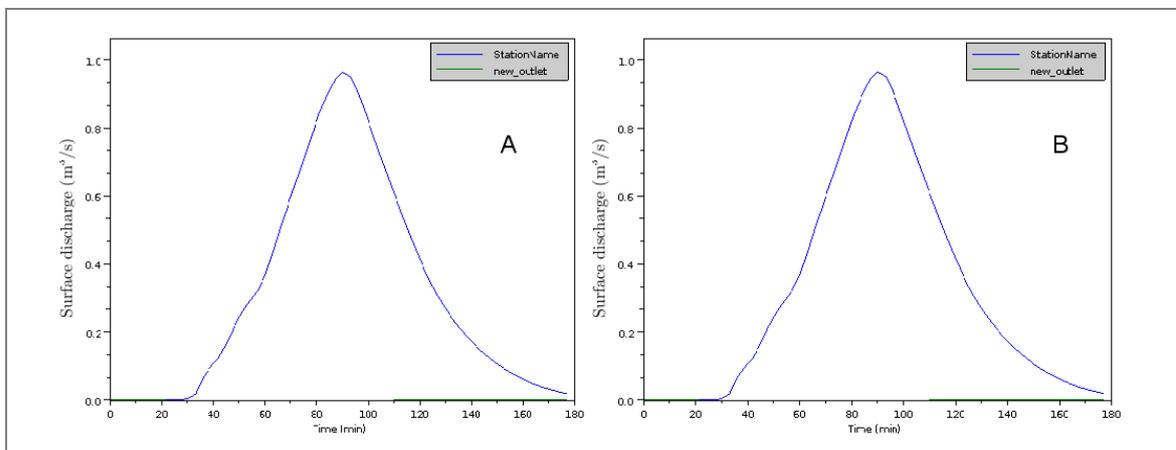


Figure II.1-14: Effect of a peripheral on the overland water depth before (A) and after (B) protecting the area

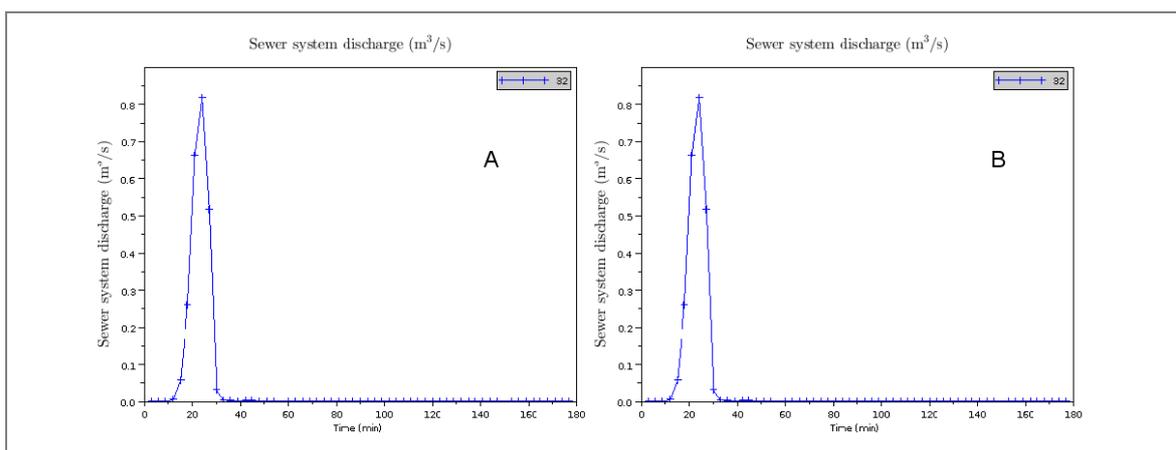


Figure II.1-15: Sewer system discharge before (A) and after (B) protecting the area

II-1.6 Short summary

The results presented in the previous paragraphs show that all scales should be taken into account when evaluating system performance. The simulations concern four options considered independently that have impacts on the whole area. These results are helpful to specify the functions of the FM/FRe system.

The implementation of these measures is something really complex and difficult in the Paris area. Indeed, as it shown during the recent local workshop with different actors of the flood resilience, these protections are from the responsibility of different level of the decisional pathway.

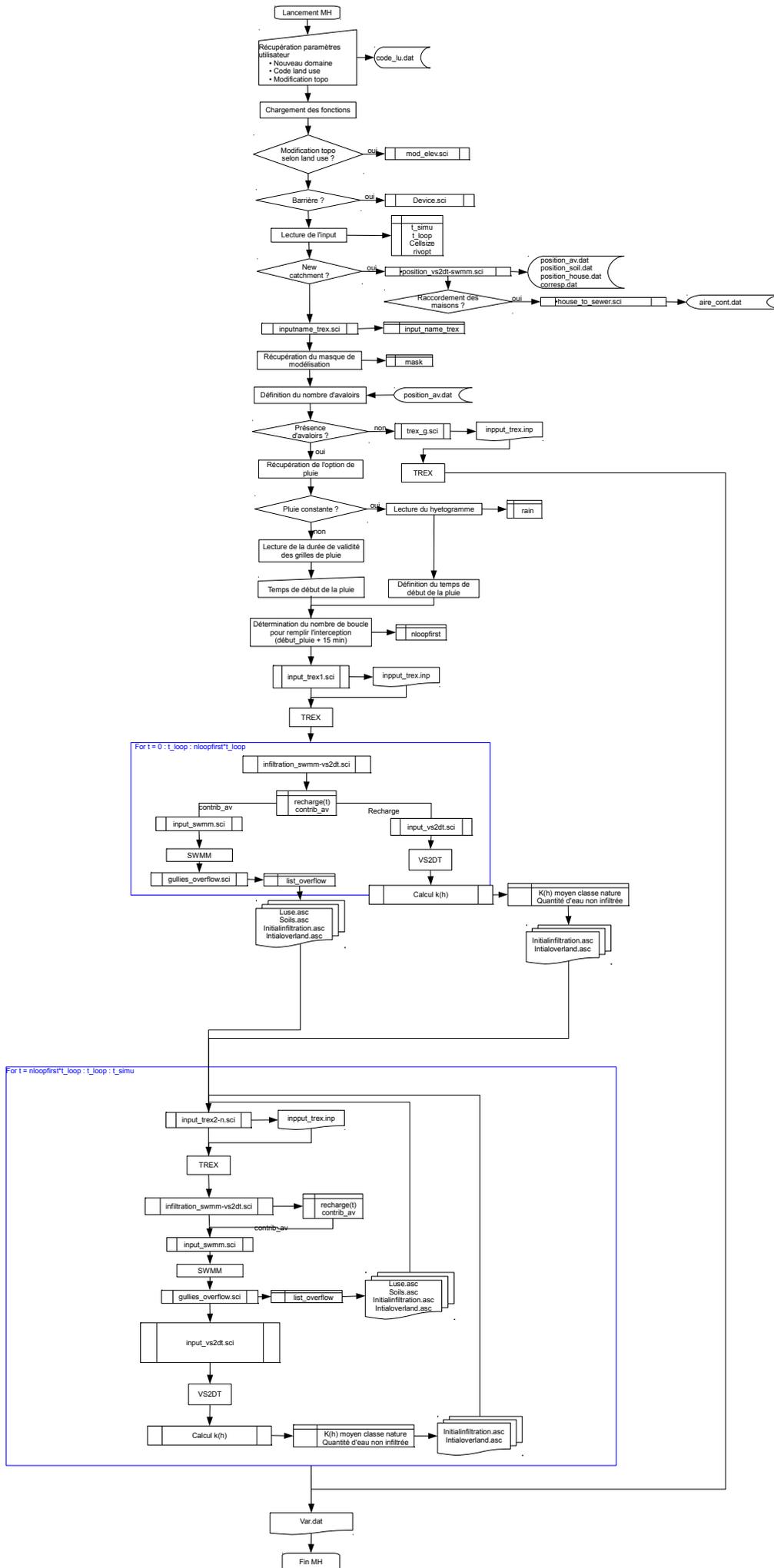
As shown in this study, the problem of the implementation of a protection measures ask many questions about the efficiency, the cost and the management. All these questions need to be taken into account before the choice of the protection strategy. A tool as Multi-Hydro can provide some precision about the effect of a given implementation and can provide a support to explain the problem to the concerned people.

II-1.7 References

- Gires, A., *et al.*, Impact of unmeasured rainfall variability on urban discharge: a case study in a multi-fractal framework. *Houille Blanche-Revue Internationale De L Eau*, 2011(4): p. 37-42.
- Lappala E.G., Healy R.W., Weeks E.P. (1987), Documentation of Computer Program VS2D to Solve the Equation of Fluid Flow in Variably Saturated Porous Media. U.S. Geological Survey, Denver, 184p.
- Richard J., Tchiguirinskaia I. And Schertzer D. (2012), GIS data assimilation interface for distributed hydrological models. Hydro-Informatics Conference, Hamburg 14-18 July 2012, Germany.
- Rossman L.A. (2010), Storm Water Management Model, User's Manual. Version 5.0. U.S. Environmental Protection Agency, EPA/600/R-05/040.
- Schertzer, D. and S. Lovejoy (1987). "Physical modelling and Analysis of Rain and Clouds by Anisotropic Scaling Multiplicative Processes." *Journal of Geophysical Research D* 8(8): 9693-9714.
- Velleux M.L., England J.F., Julien P.Y. (2011), TREX Watershed Modelling Framework User's Manual: Model Theory and Description. Department of civil engineering, Colorado State University, Fort Collins, January, 106p.

Annexe E

Structure du modèle Multi-Hydro



Annexe F

Notice de Multi-Hydro

Multi-Hydro notice/tutorial

A. Giangola-Murzyn, J. Richard, A. Gires, G. Fitton, I. Tchiguirinskaia, D. Schertzer.
*Université Paris-Est Ecole des Ponts ParisTech LEESU, 6-8 Av Blaise Pascal - Cité Descartes,
 Marne-la-Vallée, 77455 Cedex 2, France*

Summary

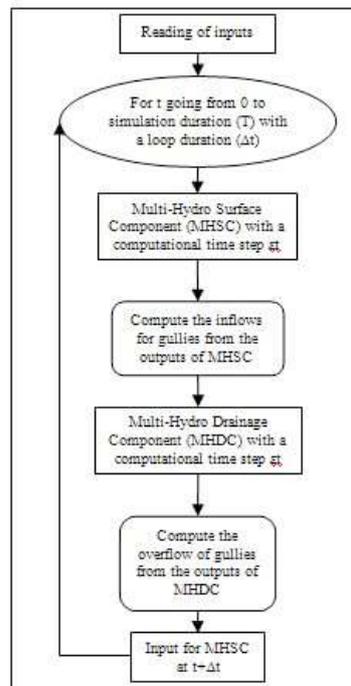
1.	Introduction	2
2.	Description of the folder “Multi-Hydro 2.0”	4
3.	Preparation of the Data	5
4.	Description of the file “general_input.txt”	12
4.1.	The “General data” section.....	12
4.2.	The “MHSC data” part	13
4.2.1.	The name of the input file and the header of the file	13
4.2.2.	General control data	13
4.2.3.	Hydrological data	14
The GIS data.....	14	
The rivers.....	16	
The initial conditions	16	
The rainfall	16	
Series of grid.....	17	
Time series.....	17	
The outlet of the catchment	18	
The outputs files	19	
4.3.	The “MHGC data” part (not included in the tutorial)	19
4.4.	The “MHDC data” part	19
4.4.1.	Title part [TITLE]	19
4.4.2.	Option [OPTIONS].....	19
4.4.3.	Files [FILES].....	20
5.	Running Multi-Hydro	21
6.	Analysis of the outputs	24
6.1.	Description of the outputs	24
6.2.	Plotting the outputs.....	26
	Appendix A: Code structure	30
	Appendix B: Table of the hydrological parameters for common classes.....	31

1. Introduction

This document explains how to run Multi-Hydro under the assumption that:

- *The reader* is aware of the overall functioning of Multi-Hydro. If not, a detailed description can be found in the document entitled “Multi-component physically based model to assess systemic resilience in the Paris region” submitted to the Hydro-Informatics Conference of 2012.
- *The reader* already has the data properly formatted. A detailed description of how to use the conversion module (MH-AssimTool) that enables the generation of properly formatted Multi-Hydro inputs from GIS data can be found in the part entitled “Preparation of the data”.

Moving forward, Multi-Hydro is a coupling core between a surface component (that models runoff and infiltration), a drainage component (that models sewer discharge) and a ground component (that models sub-surface flow). The coupling core is written in Scilab, a free and open source software that can be found here www.scilab.org.

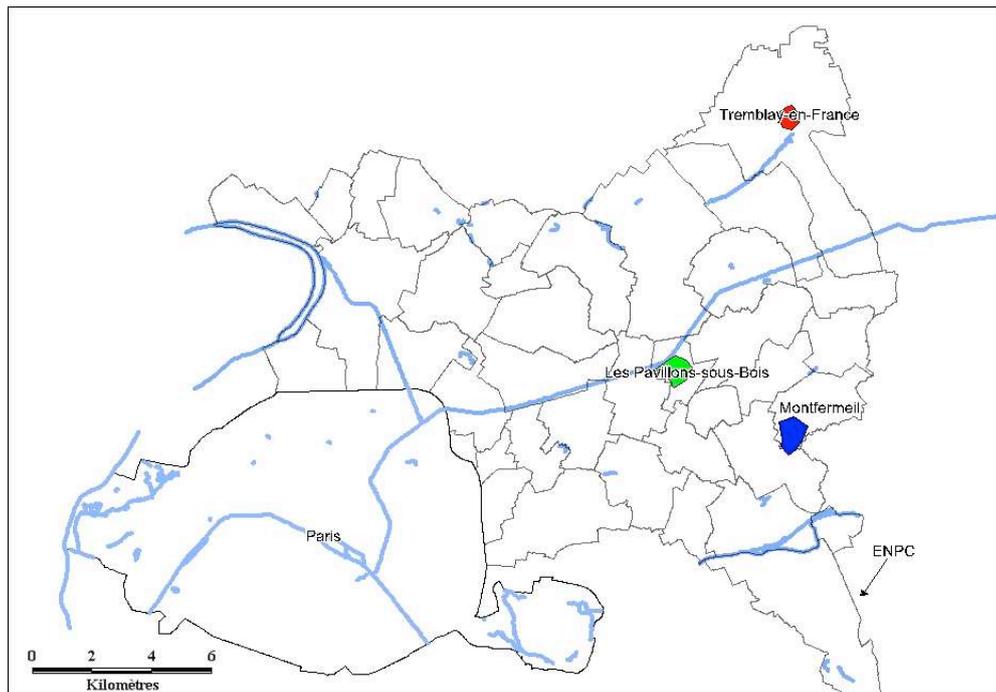


The document is organised as follows:

- A description of the folder “Multi-Hydro 2.0” that contains all the files required to run Multi-Hydro,
- a description of the file “general_input.txt”, which is the only one that should be modified once you have your formatted data.,
- an explanation of how to run Multi-Hydro from the Scilab script “Multi-Hydro_main.sci”
- and finally the main outputs of the different components. The components are presented using a series of Scilab scripts that produce graphs of the outputs that are then further described in more detail.

The questions in the tutorial are embedded within the document. The questions will act as a guide by helping you to implement the Multi-hydro model on the particular case study of Pavillon-Sous-Bois (see the green area on the map), a 75 ha peri-urban area located in the South of Paris.

On this catchment different spatial resolutions (i.e. 10, 20 and 40m) will be tested. In addition the differences between using a raw or modified elevation (e.g. decreasing the height of roads and increasing the height of houses) will also be analysed.

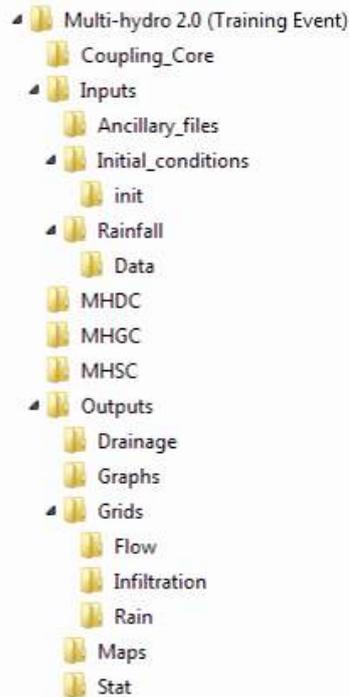


Some additional information

- The elevation of this catchment ranges from 53 to 58m in the East-West direction respectively. The slope is therefore 0.005% globally. This particular catchment is highly urbanised. In addition, the sewer system in this catchment is unevenly located and developed.

In the case where you can't use the data from your county, two other catchments are available for use. The first, located at Montfermeil (i.e. the blue area on the map), represents a North-South flow over an area of 76 ha. The elevation of this catchment ranges from 92 to 116m. The slope is therefore close to 0.024% globally. The second, located at Tremblay-en-France (the red area on the map), represents a flow from the North to the South over an area of 40 ha. The minimal elevation is 72m and the maximum elevation is 85m. This means that the slope is 0.016% globally. This last one is perfect for trying the highest spatial resolution of 5m.

2. Description of the folder “Multi-Hydro 2.0”



The directory of Multi-Hydro 2.0 is organised in the following way:

- The folder “Coupling_Core” contains all the Scilab routines that manage the interactions between each of the modules.
- The folder “Inputs” contains all of the input files.
 - The folder “Ancillary_files” contains files created by the coupling core and will be used only by the coupling core.
 - The folder “Initial_conditions” contains all the initial condition data. For each loop, the coupling core will create the initial conditions for this loop. The files for the initial conditions of the simulation are located in the sub-folder “Init”.
 - The folder “Rainfall” contains all of the grid files. For example in the case where the rain option set to 5 (i.e. a distributed rainfall field, see below for more details) a copy of the file is placed in the sub-folder “Data”.
- The MHDC, MHGC and MHSC folders contain the executables needed to run the MH Drainage Component (for the sewer system processes), MH Ground Component (for the underground processes) and the MH Surface Component (for the surface processes) respectively.
- The folder “Outputs” contains all the results of the MH model.
 - The report of the sewer system simulation is in the folder “Drainage”
 - The grid files are located in the folder “Grids”
 - The folder “Flow” contains the grid files of the overland water depth (m) and overland discharge (m^3/s)
 - The folder “Infiltration” contains the grid files of the cumulative infiltration depth (m) and the infiltration rates (mm/h)
 - The folder “Rain” contains the grid files for the rainfall depth (mm) and rainfall rates (mm/h) computed from the input rainfall data by the MHSC.
 - The folder “Stat” contains the statistical results as a mass balance or station report discharge file (see below for more explanations).

- The folder “Maps” and “Graphs” contain the figure created with the Plot.sci routine of MH.

3. Preparation of the Data

The data needed for Multi-Hydro can be formatted with the help of a GIS program called MH-AssimTool.

To use it, one must have the GIS data pre-formatted as explained just above:

- **TOPOGRAPHY:**

The most current files used to define landscape topography are grid files (.asc), called regular DEM (Digital Elevation Model). They can be read in a text editor as block-note and are inevitably composed by a header and a body. In the header, several informations are accessible for the program as: the cell size, the grid size (in lines and columns number) and the low left corner coordinates of the height map (note: these coordinates correspond to the corner and not the centre of the pixel). In the body, we will find the elevation of each pixel of the map. If the format is not ok for the user, he can use the open source software GRID CONVERTER to convert most of the height files into .asc files.

Note: The files below are asked in shapefile (.shp) format. The corresponding data to that file type (as every file which come from a GIS software) are composed by an object part and a information part. The object part corresponds to geo-referenced geometric forms as polygons (building delimitation, regions,...), lines (road network, gas network,...) or points (GPS points, fire light position,...). For each object, information are stocked into in a table linked by a unique ID. There will be as many rows as object. Adding to that, a file with the geographical projection is attached to the data. Thanks to that, the software will directly read the coordinate system during the files import.

- **LAND USE:**

The land use is specific for each country and can be defined differently according to the study. For a hydrological case study taking into account the surface run-off, it is better to have a precise data including the road limits, buildings delimitation or any other element that the user thinks is important. Only the land use “GULLY” is mandatory. Without this data, there will not be a link between the drainage module and the run-off surface. All these categories have to be defined by a unique ID in integer in the information table. That means that all buildings, for example, will have as unique information an identical numeric ID. It will be the same for each category. This information has to be implemented in the source data. A column will be created for this data.

- **HYDROLOGY:**

As the land use data, the hydrology has to be in shapefile format. This data corresponds to the rivers present in the simulated area.

- **CATCHMENT LIMIT**

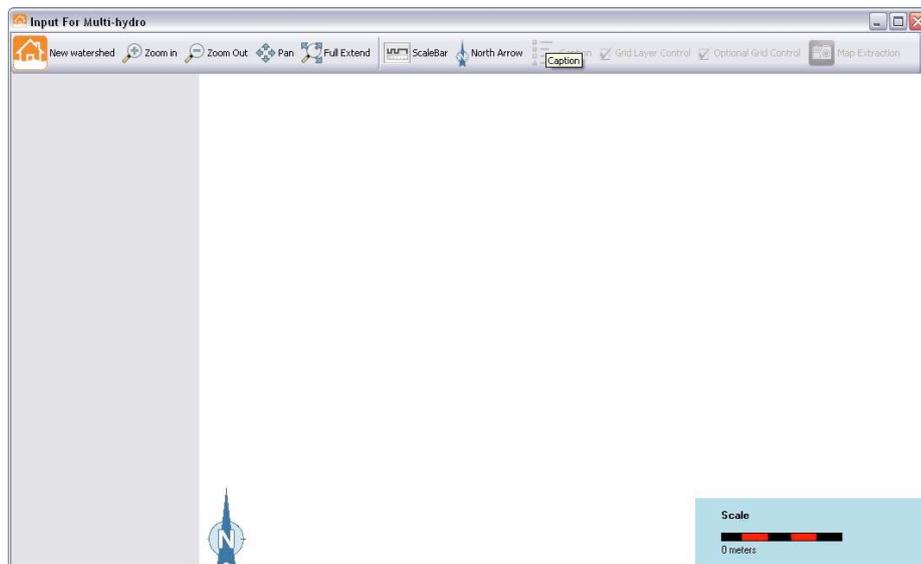
The catchment delimitation file is not mandatory. An integrated module allows to directly draw a basin on the map if the user doesn't have the limits on shapefile format.

- **SEWER SYSTEM**

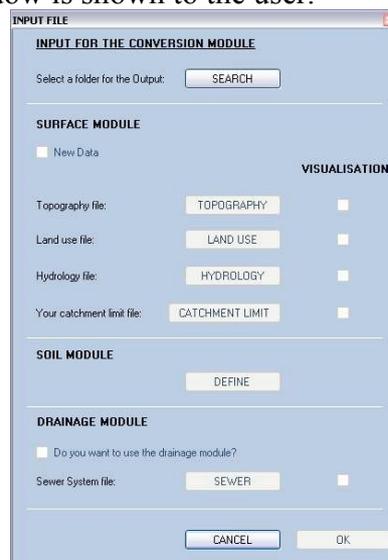
As the other files, it is requested in Shapefile format (.shp). The network needs to be defined by linear section linked together. For each section, information as the shape, the size, the depth,... will be required via a new window.

You can launch MH-AssimTool by double-clicking on the orange icon placed on the desktop (or in the start menu).

The first window display is empty as the figure below.

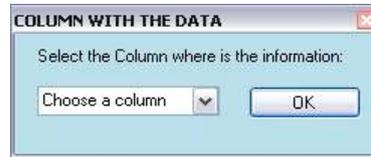


First, the user has to import the new catchment files. For that, the button “New Watershed” has to be clicked. A new window is shown to the user.

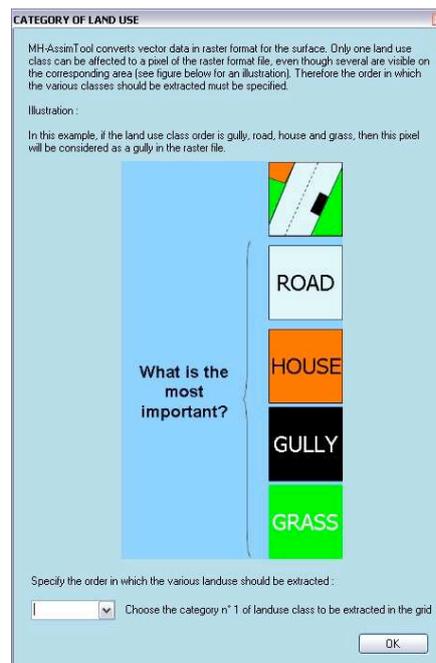


You can import all your GIS file with this window. At this moment, the “SEARCH” button is the only active button, with the “CANCEL” button. The others will be accessible only when the export folder will be chosen by the user.

For the land use the column filled with the land use code (explained above) is directly asked after the file uploading in the work folder (automatic), thanks to the below window.

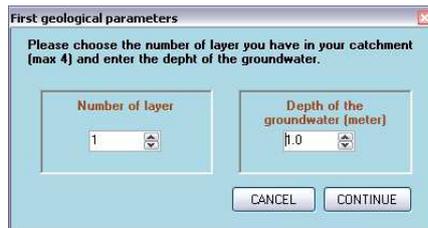


Once the column chosen, another window is displayed to the user. This interface allows to choose the land use extraction way. To be clearer, the land use will be converted into raster data, that means that the extraction program will transform each object into pixels. The size of these pixels is asked to the user just before the conversion launch. For each pixel, only one category will be extracted. If the pixel is big and includes several soil categories, the most important data has to be extracted first. It is advisable to take the “GULLY” data first because this one makes the link with the drainage module.



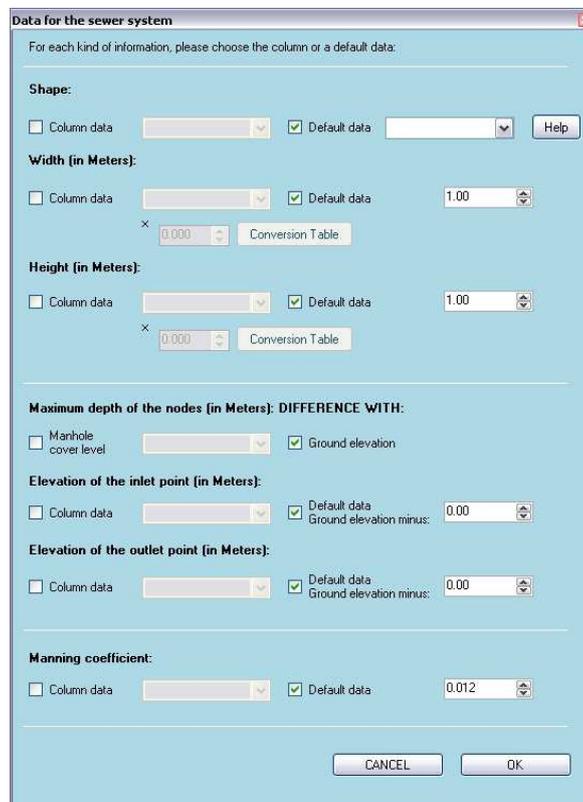
This window will be displayed as many times as there are categories in the land use file (limited to 30 categories). The scrolling menu allows to select the corresponding ID to a category. Once chose, the user will have an access to another window pressing “OK”. This one enables to get more information (initial condition, soil type), rarely integrated in the land use files. The user may also choose each category the color for the data visualisation.

The module which works with the depth infiltration needs inaccessible data. To define the catchment geology, it will not ask to import a file, but the user has to choose the layers manually. For that, a first window will allow to select the number of different layers (maximum 4) and also the depth of the ground water.



For France, the website of the BRGM (<http://infoterre.brgm.fr/viewer/MainTileForward.do>) will help the user to find most of the information thanks to the geological drilling. For others countries, the website onegeology (<http://portal.onegeology.org/>) will be useful to find this information. Once the layer number chosen, a second window allows to choose the infiltration parameters of each geological layer.

A check box allows to use the Multi-Hydro sewer system part. Once ticked, the sewerage file import will begin. For each data, the user will have the choice between a default data or the direct extraction of the information from a existing column in the source file.



When all files are imported, you can click on the OK button (from the import data window). A new menu is displayed on the window left. You can visualize the data into the drawing area by ticking the checkboxes.

- **FRe technologies implantation**

The interface allows to the user to draw flood FRe technologies as barrier or retention basin. It can also be used to create a new delimitation of a catchment. For that, two buttons at the left of the screen give an access to these modules.

- **Barriers**



When the “DRAW BARRIERS” button is clicked, a menu is displayed at top right corner of the visualisation window.

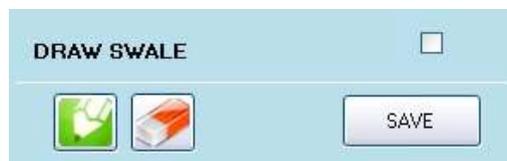


Three buttons are accessible to the user. The first one allows to directly draw a barrier on the map by clicking with the left click. To finish a barrier, the user will do a right click on the map. If the drawing is not as wanted, the second button will erase the previously drawn lines. For the drawing of several barriers, the user has to do a right click at the end of a barrier and to do a left click to begin another one. The “SAVE” button allows to save the drawing and include the barriers in the conversion process. Once this one clicked, it will be inactive, that means that the barriers drawings will be converted during the calculation process, otherwise, no barrier will be taken into account. Note: it will be displayed “DRAWING MODE ACTIVE” when the first button will be clicked. Like this, the user will know that he can draw on the map. When Multi-Hydro will be launched with these files, the height can be set to adjust the effect of the latter on the simulated flood.

- **Retention Basin**



When the “DRAW RETENTION BASIN” button is clicked, a menu is displayed at top right corner of the visualisation window.



As the barriers, three buttons are accessible to the user. The first one allows to directly draw a retention basin on the map by clicking with the left click. To finish a basin (polygon), the user will do a right click on the map. If the drawing is not as wanted, the second button will erase the previously drawn polygon. The “SAVE” button allows to save the drawing and include the retention basin in the conversion process. Once this one clicked, it will be inactive, that means that the barriers drawings will be converted during the calculation process, otherwise, no barrier will be taken into account. Note: it will be displayed “DRAWING MODE ACTIVE” when the first button will be clicked. Like this,

the user will know that he can draw on the map. When Multi-Hydro will be launched with these files, the depth can be set to adjust the effect of the basin on the simulated flood.

- **Catchment delimitation**

The interface allows also the user to draw a new catchment limit. The button “CHOOSE AN AREA AND LAUCH” (at the left of the window) displays the drawing tool.



The new tool is separate in two parts. The left one allows to draw on the map a new case study as a polygon. The first button activates the drawing mode (like explained in the barrier part). The user has to left click to add points to the polygon and to finish the drawing with the right click. To erase the drawing, the user will use the second button. To save the drawing, the “SAVE” button will replace the “CATCHMENT” file imported via the “IMPORT DATA” window described in the part 3. The drawing will be transformed into a Shapefile (.shp) (accessible in the “TEMP” folder). Adding to that, this new file will be directly visualised or hidden via the display menu placed at the left of the interface.

- **Launch file conversion**

Once all files are imported, the user has to parameterise two important information for the launch of the conversion. The first one is the choice of the studied area and the second is the cell size for the conversion of the vector data into the Raster data.

- **Study area choice**

The area delimiting the studied basin was either imported at the beginning of the information parameterisation, either manually drawn thanks to the left button of the tool. In both cases, this file will be automatically open when the “SELECT” button (button with the arrow on green background) will be clicked. Now, the user can click on the studied area. Note: the polygon will come green when the zone is selected. Once the zone chosen, the “GO” button can be pressed. A new window is displayed for the cell size choice.

- **Cell size choice**

The surface data will be converted to grid format. More the grid will be fine, more the quality will be high. On the other hand, there is also a strong link between the surface run-off and the cell size. Indeed, more the pixels will be small, more the impermeability will be strong because of the higher proportion of road and roof pixel for example. The user will also need to pay attention to the calculation time for the conversion and for the running of Multi-Hydro. For an area of 1,5 km², the convert process will take 1h to prepare all files for a cell size of 2m with a standard computer.

- [Tutorial: launch “MH-AssimTool”.](#)
- [Click on “New Watershed” and choose a folder for the outputs.](#)

- Tick the "NEW DATA" box and select all the following files in the folder "Inputs\Catchment":
 - The topography file is named "TOPOGRAPHY.asc".
 - The land use file is named "LANDUSE.shp"
 - The hydrology file is named "HYDROLOGY.shp".
 - The sewer system file is named "SEWER.shp".
 - The catchment limit file is named "LIMIT.shp"
- Display the GIS data
- Draw a barrier and a retention basin in the catchment
- Launch the conversion and choose the cell size.
- Tutorial: to **choose the cell size**, choose a size (remembering the presentation from this morning) according to the resolution of the given data :
 - Topography : 25 m
 - Land use : 50 cm
 - Hydrology : 50 cm
- In the case of Pavillon-sous-Bois, there is no river.
- Wait until the program has finished.

The module will create some files located in the folder "OUTPUT". In addition a new menu is displayed on the left of the main windows. You can directly visualize the conversion result. If the data are correct, each file can then be copied into the folder "Inputs" of Multi-Hydro as following:

- Elev.asc (with a copy of this file named "elev_init.asc")
 - Luse.asc (with a copy of this file named "luse_init.asc")
 - Soils.asc (with a copy of this file named "soils_init.asc")
 - Mask.asc
 - Storagedepth.asc
 - Device.asc
 - Bassin.asc
 - General Input.txt
 - In the "Initial_conditions" folder
 - Initialinfiltration.asc
 - Initialwateroverland.asc
 - Initialwaterchannel.txt
-
- Tutorial: You can now compare your land use map with the one of the other participant. What do you observe? Do you think that your choice for the cell size was the best? Why?
 - If your extracted data looks good, you can copy the following file from the "Output" folder of the GIS module to the "Inputs" folder of Multi-Hydro (folder named "Multi-Hydro 2.0 (Training event)")
 - Elev.asc (and create a copy of this file named "elev_init.asc")
 - Luse.asc (and create a copy of this file named "luse_init.asc")

- Soils.asc (and create a copy of this file named "soils_init.asc")
- Mask.asc
- Device.asc
- Bassin.asc
- Storagedepth.asc
- General_input.txt
- In the "Initial_conditions" folder and in the "Initial_conditions\init\" folder
- Initialinfiltration.asc
- Initialwateroverland.asc
- Keep MH-AssimTool open so that you can see the land use map later on or export it (Map Extraction button). You can display the legend with the "Caption" button.

4. Description of the file "general_input.txt"

The "general_input.txt" file is the only file that should be modified to run Multi-Hydro once you have your formatted data.

It is a text-format file (.txt) consisting of the four successive sections:

- "General data": contains the main parameters of the simulation.
- "MHSC data": contains all the parameters required for the surface component.
- "MHGC data": contains all the parameters required for the ground component.
- "MHDC data": contains all the parameters required for the drainage component.

In the following we discuss the snapshots of the file by focusing (the parts marked in red) on each part that should be modified.

4.1. The "General data" section

This section contains the duration of the simulated event and the duration of the retroactive loop (both in hours), as well as the cell size (in m).

```

General data
total duration : ? → in h
loop duration  : ? → in h
cellsize       : ? → in m

```

- Tutorial: Open the "Multi-Hydro 2.0 (Training Event)\Inputs\general_intput_template.txt" file and save your work in the same folder as "general_input.txt". In the case study of Pavillon-sous-Bois, the simulation lasts 3 hours and the loop duration is 3 minutes. All that remains is to fill up the cell size based on your previous choice.
-

4.2. The “MHSC data” part

This section contains all the parameters required for the surface component of Multi-Hydro. When Multi-Hydro runs, it creates an input file (name_file.inp) in the folder MHSC with this section.

4.2.1. The name of the input file and the header of the file

```
MHSC data
input file name : ??????
A line of text which describe the simulation conditions
Another line of text
```

The input file name corresponds to the name that will be used for the input file of MHSC. It should be written as in the red array without the path or the file extension.

The following two lines are the header of the “.inp” file. You can write the main characteristics of your simulation here e.g. location, date, user, simulation duration etc.

- Tutorial: modify the input file name and use the two lines of text to describe your case study e.g. location, resolution, simulation duration etc.

4.2.2. General control data

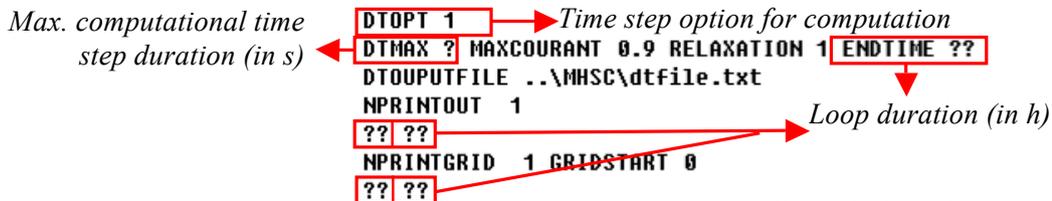
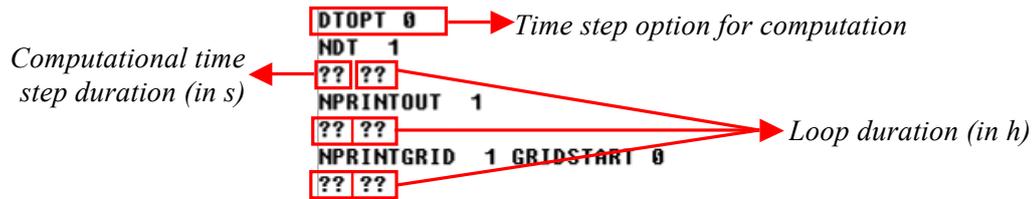
In the line beginning with “KSIM”, you need to modify the number (without units) of rows (NROW) and columns (NCOL) of the grid describing the studied area, and also the size (in m) of the cell (DX and DY). Although it is not mandatory, it is recommended to have DX=DY.

```
KSIM 1 NROW ?? NCOL ?? DX ?? DY ?? TZERO 0.0 TSTART 0.0
```

- Tutorial: modify the values according to the resolution you are using. These values can be found in the header of all the raster files (e.g. mask.asc).

We briefly discuss now the computation time step of this module. To use a fixed time step DTOPT is set to 0. To use an optimized time step DTOPT is set to 1. In the optimised case, the surface components run with the maximum computational time step, DTMAX, until numerical instabilities appears due to the Courant condition. The time step is then gradually decreased until the computation is stable. We recommend using the second option because it is less time consuming.

The variables “NPRINTOUT” and “NPRINTGRID” contain the “sampling time step”, i.e. the duration between the successive writings of all the output grids. The values that should be modified with the units are displayed in the following figures.



- o Tutorial: modify the "general_input.txt" file to implement the computational time step option 1, with a maximum time step of 5 seconds.

The line beginning with "ECHO" contains the path of the echo file. This file will contain a summary of the surface parameters. It needs to be located in the "Outputs\Stat\" folder.

```
|ECHO ..\Outputs\Stat\watertest.eco
```

4.2.3. Hydrological data

The GIS data

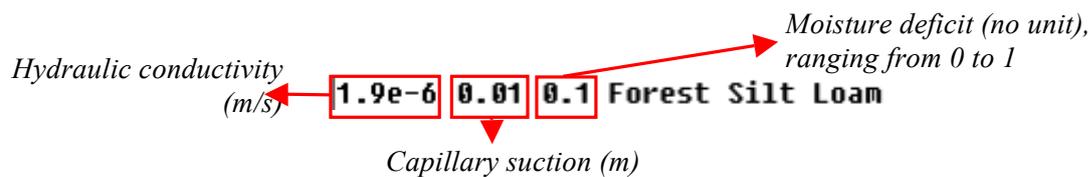
```
MASK ..\Inputs\mask.asc
ELEVATION ..\Inputs\elev.asc
INFOPT 1
NSOILS ?
1.9e-6 0.01 0.1 Forest Silt Loam
1.0e-10 0.01 0.0 Road Concrete
1.9e-6 0.01 0.1 Grass Silt Loam
1.0e-10 0.01 0.0 House Concrete
??? ??? ??? ???????
1.0e-0 0.01 0.9 Gullies
SOIL_TYPES ..\Inputs\soils.asc
NLANDS ?
0.80 7.62 WOODS Dense
0.012 1.9 Road
0.15 3.81 Grass
0.012 1.9 House
??? ??? ??? ???????
0.9 100000 Gullies
LANDUSE ..\Inputs\luse.asc
STORAGE DEPTHS ..\Inputs\storagedepth.asc
```

The lines beginning with "MASK", "ELEVATION", "SOIL_TYPES", "LANDUSE" and "STORAGE DEPTHS" contain respectively the path of the mask file (with 1 in catchment et -9999 outside), the elevation file (with the topography), the soil file (with the code of the superficial pedology class for each cell), the land use file (with the code the land use class for each cell) and the storage depth file (with the depth which can be stored at the surface) that should be generated with the help of the conversion module. These files need to be located in the "Inputs" folder.

Please, keep a copy of your land use file named “luse_init.asc”, a copy of the soil file names “soils_init.asc” and a copy of your elevation file named “elev_init.asc” in the folder “Inputs” to allow for possible re-initialisations of the simulation.

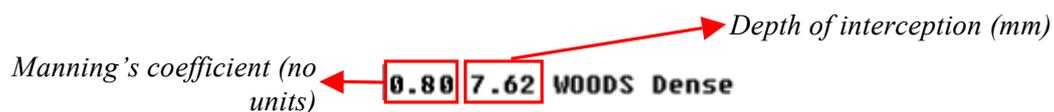
- Tutorial: Check that the file names are correct, and that a copy of the land use, soil, and elevation files have been created as requested.

The lines following “NSOILS” contain the soils features. The parameters and their respective units are displayed below. There is one line for each soil class. The first line corresponds to the features of the cells whose class number is 1 in soils.asc file. The second line corresponds to the features of the cells whose class number is 2 in soils.asc file, and so on.



- Tutorial: fill the two parts NSOIL and NLAND with the help of the table in Appendix B. In the case of Pavillon-sous-Bois, 1 is for the woods, 2 is for the roads, 3 is for the grass surfaces, 4 is for the houses, 5 is for the gullies, 6 is for the water surfaces and 7 is a class to fill in the missing data. For this last class, choose one of the previous classes according to your land use and copy its parameters. The classes need to be declared strictly following the order of their numbering. The classes are the same for the land use and for the soil.
- Check that there are as many lines describing the soil classes as there are reported numbers of class. Also check that the highest index in the file “soils.asc” also corresponds to the highest reported number of class.

The lines following “NLANDS” contain the land use features. The parameters and their respective units are displayed below. There is one line for each land use class. The first line corresponds to the features of the cells whose class number is 1 in luse.asc file. The second line corresponds to the features of the cells whose class number is 2 in luse.asc file, and so on.



- Tutorial: Check that there are as many lines describing the land use classes as there are reported numbers of class. Also check that the highest index in the file “luse.asc” also corresponds to the highest reported number of class.

The rivers

```
CHNOPT 1
TPLYOPT 0 CTLOPT 0 FLDOPT 1 OUTOPT 0
LINK ..\Inputs\links.asc
NODE ..\Inputs\nodes.asc
CHANNEL ..\Inputs\channels.txt
INITIAL_WATER_OVERLAND ..\Inputs\Initial_conditions\initialwateroverland.asc
INITIAL_INFILTRATION ..\Inputs\Initial_conditions\initialinfiltration.asc
INITIAL_WATER_IN_CHANNEL ..\Inputs\Initial_conditions\initialwaterchannel.asc
```

If there are any rivers whose width is greater than the size of a cell, “CHNOPT” is set to 0. The rivers are then handled as a land use class with a lower elevation than for the corresponding cells.

If there are rivers whose width is smaller than the size of a cell, then “CHNOPT” is set to 1. The proceeding then line contains different options that correspond to the transmission loss or routing properties of the water via the river. By default, this line is set to “TPLYOPT 0 CTLOPT 0 FLDOPT 1 OUTOPT 0”. This means that you will use the link, node and channel files to define the river where there is no transmission loss computed. It is possible to have an overflow of the river. In this case the last value of the routing of the water comes from the overland plane to the outlet. At the present however, these options will remain fixed. The three lines after indicate the path for the link, the node and the text file.

- Tutorial: There is no river in the case of Pavillon-sous-Bois. Modify the `general_input.txt` file accordingly.

The initial conditions

The initial condition files are all in the folder “Inputs\Initial_conditions\”. **A copy of the initial conditions file must be kept in the folder “Inputs\Initial_conditions\init” to enable the restart of the simulation.**

There is a file of initial conditions for the overland water depth (the path should be written after “INITIAL_WATER_OVERLAND”) and for the infiltration (the path should be written after “INITIAL_INFILTRATION”).

- Tutorial: Check that these two files are in the folder “Inputs\Initial_conditions” and that there are copies of these files in the folder “Inputs\Initial_conditions\init”.

If “CHNOPT was set to 1, the path of the file with the initial water level in the river should be written after “INITIAL_WATER_IN_CHANNEL”. This file contains the base flow of the river.

The rainfall

Two options are available for the input of rainfall: a series of successive grids (typically radar data, or downscaled radar data) or time series (typically rain gauge) data.

Series of grid

```

RAINOPT 5
CONU1 1.0 CONU2 1.0 SCALE 1.0
RAINGRIDFREQ ??
RAINGRIDFILES Input\raingrid
    
```

In the above case, “RAINOPT” is set to 5. The rainfall intensity for each cell of the modelled area is then given as in a series of grid files (one per time step). **Each grid file is then named “raingrid.#”, where the initial hash is replaced with a “0”.** These files are in the folder “Inputs\Rainfall\”. “RAINGRIDFREQ” and should be set to the time step of the rain grids in hours. Remember, this value needs to be given in hours. **Please note the loop duration must be greater or equal to the rain grid frequency.**

The line “RAINGRIDFILES” contains the path and name of the rain grid files without the number of the grid.

Time series

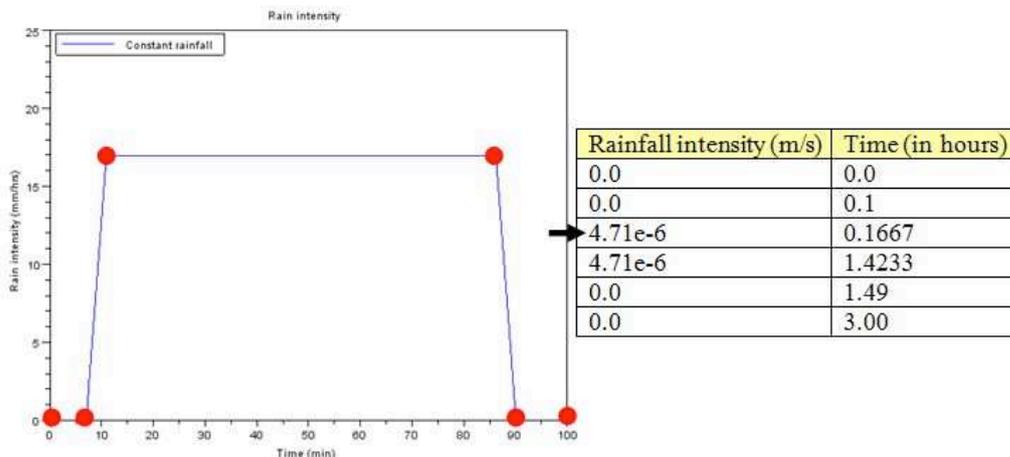
```

RAINOPT 0
NRAINGAGES 1
CONUNIT 1.0 CONUTIME 1.0 SCALE 1.0
GAGE 1 ?? ?? ??
?? ??
?? ??
?? ??
?? ??
    
```

X position of the rain gauge
Number of pair rainfall intensity-time
Y position of the rain gauge
Rainfall intensity (m/s)
Time (h)

In this case “RAINOPT” is set to 0. The time series is defined as a series of rainfall intensity/time pair. The intensity is valid until the corresponding time is reached. Then the intensity of the following line is used. The parameters that should be changed are marked in red in the previous figure. The rain gauge must be located within the studied area.

Remember, the series of rainfall intensity/time pair is created as follow:



- o Tutorial: implement the above options for the rainfall, with the time series shown in the previous table. As you can see, the rainfall

intensity/time pairs correspond to each the line of the table. In this case, the pair number is the number of the line in the table...

The outlet of the catchment

```

NOVERLANDOUTLETS 1
OUTLET1 ?? ?? ?? 0
NQREPORTS ?
?? ?? ?? 1  ???
?? ?? ?? 1  ???

```

The outlet of the catchment is defined as a cell within the grid. The line beginning by “OUTLET1” contains the row index, the column index and the slope of the outlet cell in the modelled area. The last number must be kept to 0 (as it defines the boundary condition, in this case it means that no water other than the one coming from the catchment is flowing into this cell).

```

NOVERLANDOUTLETS 1
OUTLET1 ?? ?? ?? 0
NQREPORTS ?
?? ?? ?? 1  ???
?? ?? ?? 1  ???

```

The line following “NQREPORTS” defines the cell for the discharge report. This point is used to get the discharge at the outlet of your catchment, so you need to copy the row and column index of the outlet cell. The third value is the area of studied catchment (in km²). The fourth value is the unit option for the discharge: 1 for m³/s and 2 for mm/hrs. **The unit must be kept to m³/s if the automatic plotting script is to be used.**

- Tutorial: In the case of Pavillon-sous-Bois, the outlet is located on the west of the catchment. To know the line and the columns of the cell, you need to look in the “elev.asc” file and search the lower pixel (normally in the first column of your file).
- The report station will be placed at the outlet.
- The slope and the area can be fixed to 0.0162 (no unit) and 0.76 km² respectively.
- Don't forget to save your document every now and again...

The outputs files

```
*** Data Group F: Output Specification Controls *****
-----EXPORT TIME SERIES OUTPUTS-----
WATEREXPORT          ..\Outputs\Stat\overland_discharge.exp
-----POINT-IN-TIME GRID OUTPUTS-----
RAINFALL_RATE        ..\Outputs\Grids\Rain\rainrate
RAINFALL_DEPTH        ..\Outputs\Grids\Rain\raindepth
INFILTRATION_RATE     ..\Outputs\Grids\Infiltration\infiltrate
INFILTRATION_DEPTH    ..\Outputs\Grids\Infiltration\infiltdpth
WATER_DISCHARGE       ..\Outputs\Grids\Flow\waterdischarge
WATER_DEPTH           ..\Outputs\Grids\Flow\waterdepth
-----SIMULATION SUMMARY OUTPUTS-----
DUMP_FILE
MASS_BALANCE         ..\Outputs\Stat\overland_balance.msb
SUMMARY_STATISTICS   ..\Outputs\Stat\overland_summary.stats
```

It is preferable if you don't modify the path of these files. They will be written in the "Outputs" folder by default. The outputs will be: infiltration rate and depth, overland discharge and depth or rainfall rate and depth formatted as a grid for each sampling time step in the folders: "Outputs\Grids\Flow" for the overland results, "Outputs\Grids\Rain" for the rain results and "Outputs\Grids\Infiltration" for the infiltration results. More details about these outputs files can be found in section 6.

4.3. The "MHGC data" part (not included in the tutorial)

The basic steps of using the ground module within the Multi-Hydro interface remain similar to the one of the surface module. We have therefore chosen skip them in the current version of this tutorial.

4.4. The "MHDC data" part

4.4.1. Title part [TITLE]

You can write a short summary of the simulation control here.

4.4.2. Option [OPTIONS]

```

MHDC data
[TITLE]
  Example 1 of Extran Manual

[OPTIONS]
FLOW_UNITS          CMS
INFILTRATION        HORTON
FLOW_ROUTING        DYNWAVE
START_DATE          07/07/2001
START_TIME          00:00:00
REPORT_START_DATE   07/07/2001
REPORT_START_TIME   00:00:00
END_DATE            07/07/2001
END_TIME            03:59:00
SWEEP_START         01/01
SWEEP_END           12/31
DRY_DAYS            0
REPORT_STEP         00:03:00
WET_STEP            00:03:00
DRY_STEP            0:30:00
ROUTING_STEP        0:00:05
ALLOW_PONDING       NO
INERTIAL_DAMPING    PARTIAL
VARIABLE_STEP       0.00
LENGTHENING_STEP   0
MIN_SURFAREA        0
NORMAL_FLOW_LIMITED BOTH
SKIP_STEADY_STATE   NO
IGNORE_RAINFALL     NO
FORCE_MAIN_EQUATION H-W

[FILES]

SAVE HOTSTART "hot1.hsf"
...

```

You can change the date at the beginning, but the time must remain “00:00:00”.

The end time is not important, however, it must be greater than the duration of the initial loop of 15 minutes, because it will be changed by Multi-Hydro. The report step must be set to the loop duration.

- o Tutorial: copy the entire content of the “sewer_system.inp” file from the “Output” folder of the GIS data to the “MHDC part” of the “general_input.txt” file.

4.4.3. Files [FILES]

This part contains the name of the “hotstart” file required to restart the MHDC from one loop to the next. It should not be changed.

- o Only one line has to be changed in the section [FILES]. You need to remove all the data from the line “USE HOTSTART...” (but don’t remove the line, we need to have an empty line later on) and replace the 5 by a 1 in the line “SAVE HOTSTART...” as shown below.

```

[FILES]
USE HOTSTART "..\MHDC\hot4.hsf"
SAVE HOTSTART "..\MHDC\hot5.hsf"

```



```

[FILES]
SAVE HOTSTART "hot1.hsf"

```

- Save your file as "general_input.txt" in the folder "Inputs" as explained before.

The rest of this part contains the description of the network, which is generated with the help of the conversion module.

5. Running Multi-Hydro

WARNING – What to do before the running of Multi-Hydro:

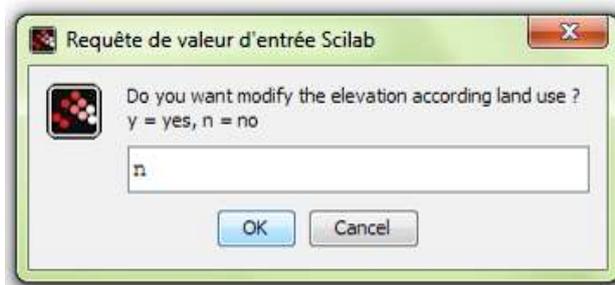
- Launch the cleaning file (by double clicking on "cleaning.bat") to remove all previous results, statistics and initial conditions. If the names of some of the files have been changed the cleaning file also needs to be modified. This can be done by editing (changing the corresponding file names) with the help of any text editor (notepad, gvim, ...).
- If there is an interruption of the Scilab script caused by "can not open file 'tampon'", you need to close Scilab and re-open it.

Open the file "Multi-hydro_main.sci" in Scilab, and execute it (CTRL + SHIFT + E under Scilab 5.1.3 or 5.3.3, "Executer\Executer sans echo" in older versions). Some windows will pop up asking you for some parameters. Fill each value and validate your answer by clicking on the "ok" button (**do not** use the key "return"). The first window will ask you whether it is a new domain or not. If yes, for each pixel with containing the house land-use, a nearest gully will be found and the water that runoffs from the roof will be directly routed to this gully. If not, it means the corresponding table between house cells and nearest gully has already been done. This is good as it will save you some computation time.

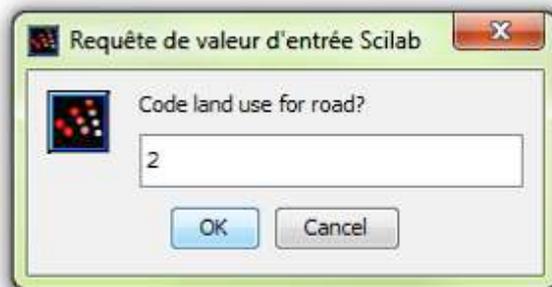
- Tutorial: Open the "Coupling-core\Multi-Hydro_main.sci" file by double clicking on it. Two windows will appear: one for the scilab console, where the potential error messages will appear, and another for the text editor, where you can modify the scripts (all "filename.sci") of the program.
- Run Multi-hydro for the case study of Pavillon-sous-Bois. As explained above, you can do that with the keyboard combination "CTRL + SHIFT + E" or by clicking in the menu of the text editor of Scilab "Executer\Executer sans écho...". The parameters that should be entered in the windows that pop up are specified below.
- You will be presented with the question "New modelled domain?" → If yes, replace the "n" with a "y" and click on the "ok" button. Remember **don't use "return" on your keyboard**



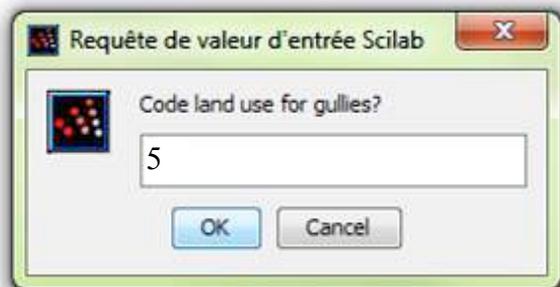
- If you want modify the elevation of each pixel according to the land use (increase of 5 m for house pixels and decrease of 15 cm for the road pixel), you need to replace the "n" with a "y" in the following window:



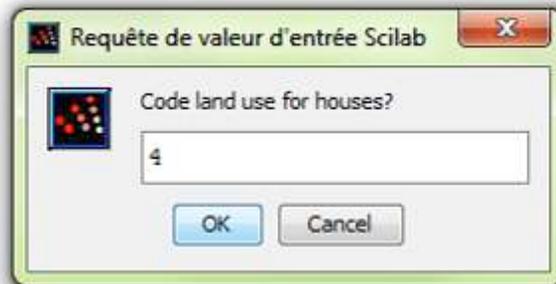
- Code land use for road? → 2 (click on "ok" button)



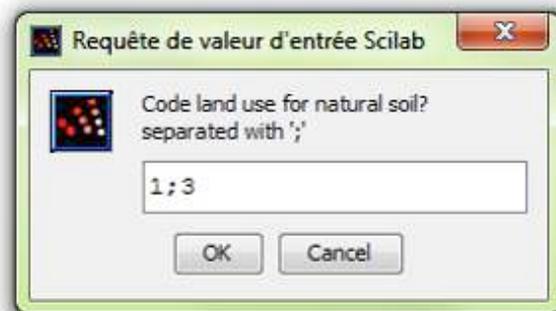
- Code land use for gullies? → replace the 8 with a 5 (click on the "ok" button)



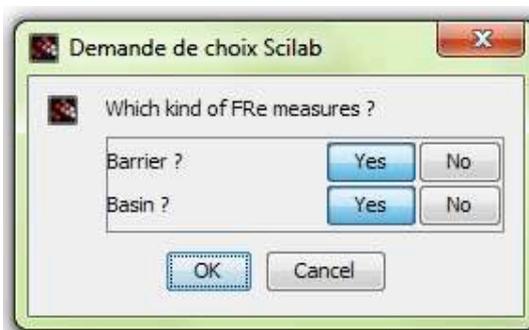
- Code land use for houses? →4 (click on the "ok" button)



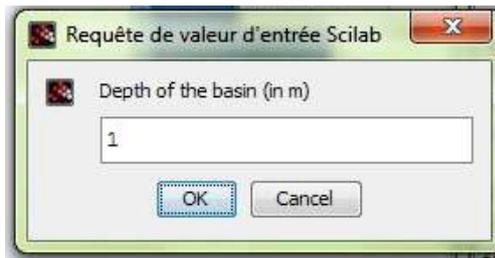
- Code land use for natural soil? →1;3 (click on the "ok" button)



- The next pop-up will ask you for the implementation of protection measure on the catchment. If you don't want to implement barrier nor basin, you should to choose 'no' for each kind of protection. If you want only a barrier, you should choose 'yes' for barrier and 'no' for basin. If you want only a basin, you should choose the opposite ('yes' for basin and 'no' for barrier).



- If you chose yes for the basin, you need to write the depth in meter that you want for your swale.



- If you chose yes for the barrier, you need to write the height in meter that you want for it.



- o Wait until the end of the run (estimated time about 20 minutes).
- o In the console window of Scilab, a variable is written (if not, write "time" and press the return key to see the value). It's the time taken by Multi-Hydro to run in minutes. Compare your time with the time taken for other resolutions. Do you think that the differences of computing time are significant? For you, what is the best trade-off between resolution and time of computing?

6. Analysis of the outputs

6.1. Description of the outputs

The main output files are briefly presented below. Some examples and explanation of the files are showed below. The files can be found in the folder "Outputs"

```
Time (hours),Qov1,Qch1,Qsum1 (m3/s),Qov2,Qch2,Qsum2 (m3/s)
0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000001,0.000000,0.000001
0.050028,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000
0.100028,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000
0.150000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000
0.200000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000
0.250000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000015,0.000000,0.000015
0.300000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000320,0.000000,0.000320
0.350000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000371,0.000000,0.000371
```

The discharge at each report station is written in the export file (Outputs\Stats\filename.exp). For each sampling time step, Qov (discharge overland runoff), Qch (discharge in channel) and Qsum (sum of the two last one) are given for each report station (identified by order of declaration).

col	lmask	link	node	initial water vol (m3)	grossrain (m3)	netrain (m3)	interception (m3)	infiltration (m3)	dqovoutvol 1 (m3)	dqovoutvol 2 (m3)	dqovoutvol 3 (m3)	dqovoutvol 4 (m3)	dqovoutvol 5 (m3)	dqovoutvol 6 (m3)	dqovoutvol 7 (m3)	dqovoutvol 8 (m3)	dqovoutvol 9 (m3)	dqovoutvol 10 (m3)	final vol (m3)
L 19	1	-1	-1	0.08222	0.050782	0.050782	0	0.000002	0	0	0.143967	0	0	0	0	0	0	0	0.071524
L 20	1	-1	-1	0.13815	0.050782	0.050782	0	0.000002	0	0	0.257452	0	0	0	0	0	0	0	0.119467
L 21	1	-1	-1	0.13314	0.050782	0.050782	0	0.000002	0	0	0.362754	0	0	0	0	0	0	0	0.116188
L 22	1	-1	-1	0.1464	0.050782	0.050782	0	0.000002	0	0	0.465408	0	0	0	0	0	0	0	0.125664
L 23	1	-1	-1	0.17956	0.050782	0.050782	0	0.000002	0	0	0.581181	0	0	0	0	0	0	0	0.155348
L 24	1	-1	-1	0.19081	0.050782	0.050782	0	0.000002	0	0	0.691895	0	0	0	0	0	0	0	0.166073
L 25	1	-1	-1	0.38285	0.050782	0.050782	0	0.000002	0	0	0.786927	0	0	0	0	0	0	0	0.37021
L 26	1	-1	-1	17.39654	0.050782	0.050782	0	0.000002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18.275721
L 27	1	-1	-1	0.22486	0.050782	0.050782	0	0.0389	0	0	0.01452	0	0.007732	0	0.016112	0	0	0	0.198379
L 28	1	-1	-1	0.37454	0.050782	0.050782	0	0.0389	0	0	0.032226	0	0.015087	0	0	0	0	0	0.353629
L 29	1	-1	-1	0.42239	0.050782	0.050782	0	0.0389	0	0	0.037112	0	0.021844	0	0	0	0	0	0.407543
L 30	1	-1	-1	0.43954	0.050782	0.050782	0	0.0389	0	0	0.038717	0	0.021291	0	0	0	0	0	0.428526
L 31	1	-1	-1	0.4371	0.050782	0.050782	0	0.0389	0	0	0.036788	0	0.023856	0	0	0	0	0	0.427056
L 32	1	-1	-1	0.51795	0.050782	0.050782	0	0.0389	0	0	0.02662	0	0.022419	0	0	0	0	0	0.51758
L 33	1	-1	-1	0.44498	0.050782	0.050782	0	0.0389	0	0	0.021559	0	0.023933	0	0	0	0	0	0.43799
L 34	1	-1	-1	0.48229	0.050782	0.050782	0	0.0389	0	0	0.009517	0	0.026866	0	0	0	0	0	0.479349
L 35	1	-1	-1	1.02242	0.050782	0.050782	0	0.038896	0	0	0	0	0.091759	0	0	0	0	0	1.049914
L 36	1	-1	-1	0.44805	0.050782	0.050782	0	0.038822	0	0	0	0	0	0	0.097851	0	0	0	0.416004
L 37	1	-1	-1	0.25514	0.050782	0.050782	0	0.038899	0	0	0	0	0.057739	0	0.036819	0	0	0	0.229295
L 38	1	-1	-1	0.38793	0.050782	0.050782	0	0.038829	0	0	0	0	0	0	0.05683	0	0	0	0.356052
L 16	1	-1	-1	0.41923	0.050782	0.050782	0	0.0389	0	0	0.043555	0	0	0	0	0	0	0	0.41054
L 17	1	-1	-1	0.55158	0.050782	0.050782	0	0.0389	0	0	0.070655	0	0	0	0	0	0	0	0.556581

In the mass balance file (Outputs\Stats\namefile.msb), you can find the volume of runoff or infiltration for each pixel of the catchment.

FLOW AND VOLUME OUTPUT SUMMARY		MINIMUM AND MAXIMUM VALUES FOR SELECT HYDROLOGIC/HYDRAULIC PROCESSES	
Initial Water Volume Within Domain (m3).....=	367.94	Outlet: 1 (Row 135, Col 82)	
Cumulative Gross Rainfall Volume Entering Domain (m3).....=	2616.15	Peak Overland Discharge (m3/s).....=	0.00
Cumulative Interception Volume Within Domain (m3).....=	2196.86	Time to Peak (hours).....=	0.00
Cumulative Net Rainfall Volume Entering Domain (m3).....=	419.56	Min. Rainfall Intensity (mm/hr).....=	0.00
Cumulative Rainfall Excess (Rain-Intercept-Infilt) (m3).....=	231.43	Max. Rainfall Intensity (mm/hr).....=	16.96
Flow Volume Entering Domain from External Sources (m3).....=	0.00	Min. Infiltration Depth (mm).....=	0.00
Volume Entering the Overland Plane (m3).....=	0.000000	Max. Infiltration Depth (mm).....=	1801.00
Cumulative Volume Entering Domain, U_in (m3).....=	419.56	Transmission loss was not simulated	
Volume leaving the Watershed, U_out (m3).....=	188.14	Min. Overland Depth (m).....=	0.000
Percentage of U_out to U_in (%).....=	44.84	Max. Overland Depth (m).....=	0.289
Volume leaving the Watershed via Overland Flow (m3).....=	0.00	Channel flow was not simulated	
Percentage of Overland/Channel Outflow to U_in (%).....=	0.00		
Final Surface Volume, U_final (m3).....=	592.44	Runtime Performance Summary	
Final Surface Volume, Overland (m3).....=	592.44	-0.00	
Percentage of U_final to U_in (%).....=	141.20	TREX model run successfully completed!	
Percentage of Overland/Channel Outflow to U_in-U_final (%).....=	188.14	Program stopped at simulation hour: 0.3500	
Volume Infiltrated Overland, U_inf (m3).....=	44.84	TREX Run Time: 1.65 minutes	
Percentage of (U_inf + U_ct1) to U_in (%).....=	0.88		
Percent Mass Balance Error (%).....=	0.88		

The statistic file (Outputs\Stats\filename.stats) contains global information as the amount of water entering or leaving the domain, the error percentage on the entering and leaving volume of water $\left(\frac{(V_{init} + V_{entering}) - (V_{end} + V_{leaving})}{(V_{init} + V_{entering})} \times 100 \right)$ or the maximum peak flow at outlet of the catchment.

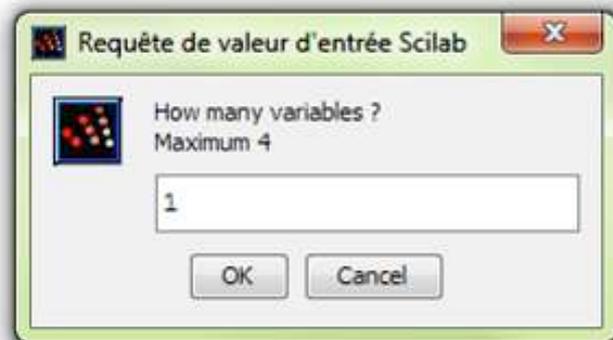
- Select the surface processes by clicking on the "Yes" or "No" buttons for each kind of process. Click on the "OK" button.



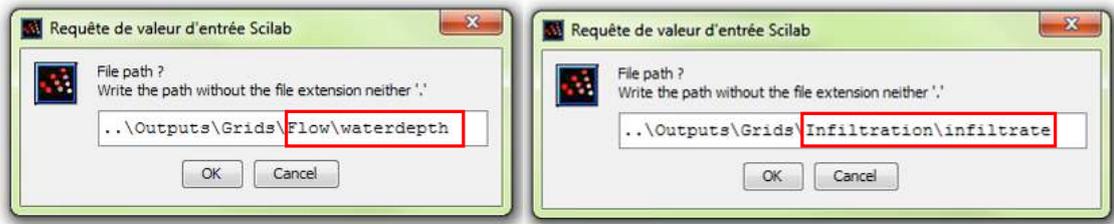
- Choose the "Maps" option and click on the "OK" button.



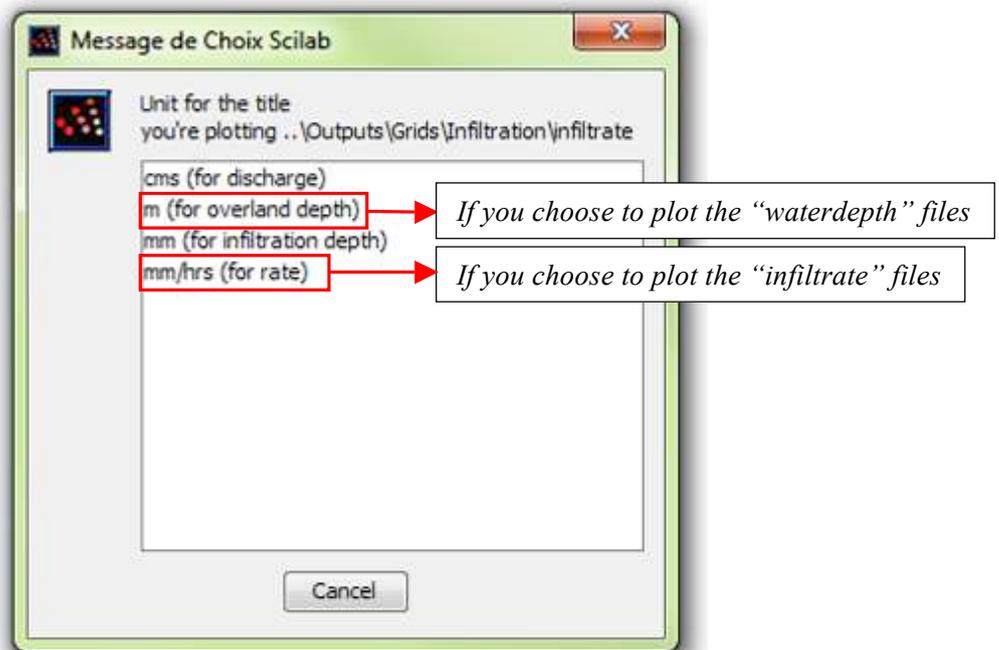
- Give the number of the variable that you want to plot (only 1 here) and click on the "OK" button.



- Write the path of the grid file containing the variable and click on the "OK" button.



- Choose the unit of your maps by double clicking on the right value.



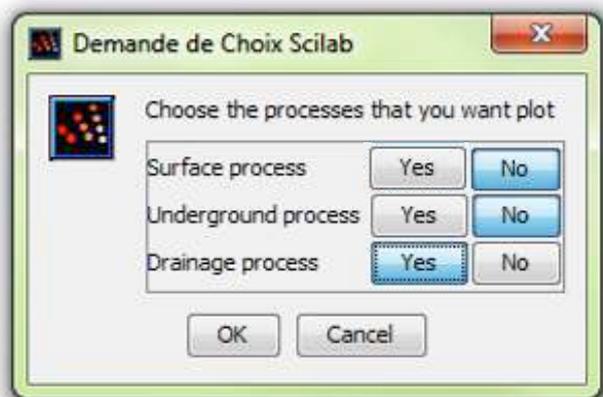
- To plot the surface discharge
 - Select the surface processes by clicking on the "Yes" or "No" buttons for each kind of processes. Click on the "OK" button.



- Choose the "Discharge" option and click on the "OK" button.



- To plot the sewer system discharge
 - Select the surface processes by clicking on the "Yes" or "No" buttons for each kind of process. Click on the "OK" button.



- Compare the results obtained with different resolutions. Are the differences significant?
- Compare the results of the simulations with and without modification of the elevation according the land use. Which case represents urban processes more accurately?

Appendix A: Code structure

Multi-hydro.sci: calls all functions and launches all model executables

- Asks if the user wants to redefine the linking between the house and the gullies
- Loads all functions
- If redefining the linking house-gullies
 - o Launches the linking functions (“position_vs2dt-swmm.sci” and “house_to_sewer.sci”). The houses will be connected to the sewer system and the position of each gully will be read.
- Computes the rain and the duration of the first loop.
- Launches “input_trex1.sci” which will create the input for the MHSC for the first loop.
- Launches MHSC which will compute the surface runoff and the superficial infiltration
- For t = 1:end_first_loop
 - o Launches “infiltration_to_swmm_vs2dt.sci” which will read the amount of infiltrated water in the soil and in each of the gullies.
 - o Launches “input_swmm.sci” which will create the input for the MHDC taking into account the infiltrated water in the gullies.
 - o Launches MHDC which will compute the load in the sewer system and the eventual overflow from the gullies.
 - o Launches “gullies_overflow.sci” which adds the eventual overflowed volume of water from the gullies in the overland water depth.
- For t= end_first_loop:time_step:end_simulation
 - o Launches “input_trex2-n.sci” which will create the input file for the MHSC for all other loop.
 - o Launches MHSC which will compute the surface runoff and the superficial infiltration
 - o Launches “infiltration_to_swmm_vs2dt.sci” which will read the amount of infiltrated water in the soil and in each gullies
 - o Launches “input_swmm.sci” which will create the input for the MHDC taking into account the infiltrated water in the gullies.
 - o Launches MHDC which will compute the load in the sewer system and the eventual overflow from the gullies.
 - o Launches “gullies_overflow.sci” which add the eventual overflowed volume of water from the gullies in the overland water depth.

Appendix B: Table of the hydrological parameters for common classes

Name	Hydraulic conductivity (m/s)	Capillary suction (m)	Deficit (dimensionless)	Manning's coefficient (no units)	Interception (mm)
Forest	1.9e-6	0.01	0.1	0.8	7.62
Grass	1.9e-6	0.01	0.1	0.15	3.81
Roads	1.0e-10	0.01	0.1	0.012	1.9
Houses	1.0e-10	0.01	0.1	0.012	1.9
Gullies	1.0e-0	0.01	0.1	0.9	0

Annexe G

Rapport scientifique et technique du projet Ville Numérique relatif à Multi-Hydro

Rapport technique et scientifique: Modélisation et paramétrisation hydrologique de la ville



Approche multi-échelles et plateforme Muti-Hydro

Giangola-Murzyn A., Richard J., Ichiba A., Gires A., Tchiguirinskaia I. et Schertzer D.
LEESU et Chaire "Hydrologie pour une ville résiliente, Ecole des Ponts ParisTech

Sommaire

I. MULTI-HYDRO	3
1. DESCRIPTION DES MODULES DE MUTI-HYDRO.....	3
2. EVOLUTION DE MULTI-HYDRO	4
a. <i>Version initiale</i>	4
b. <i>Prise en compte des interaction surface-réseau d'assainissement et surface-sol</i>	5
c. <i>Prise en compte de la modification de la topographie par les activités anthropiques</i>	6
d. <i>Prise en compte des rivières</i>	7
e. <i>Prise en compte des mesure de lutte contre les inondations</i>	7
3. RESULTATS ET VISUALISATION	8
II. MH-ASSIMTOOL : OUTIL DEDIE A MULTI-HYDRO.....	8
1. FICHIERS A IMPORTER POUR UNE NOUVELLE SIMULATION	10
a. <i>Topographie</i> :	10
b. <i>Le mode d'occupation du sol</i> :.....	11
c. <i>L'hydrologie</i> :	13
d. <i>Le bassin d'étude</i> :	13
e. <i>Le réseau d'assainissement</i> :	13
2. PARAMETRE A DEFINIR POUR UNE NOUVELLE SIMULATION.....	14
3. FONCTIONNEMENT DU PROGRAMME	15
4. VISUALISATION DES DONNEES D'ENTREES ET DE SORTIES	16
III. PERSPECTIVES.....	17
IV. REFERENCES.....	17

I. Multi-Hydro

Multi-hydro est un couplage entre quatre modèles hydrologiques et hydrauliques indépendants. Ces modèles sont des outils open source et libre d'accès développés par différents organismes. Ils bénéficient ainsi d'un développement constant et d'une large communauté d'utilisateurs.

Multi-Hydro est donc conçu comme une structure modulaire totalement distribuée et basée sur des équations physiques qui peut facilement être adaptée aux besoins spécifiques de chaque cas d'étude. Les modélisations sont basées sur l'outil SIG spécifiquement dédié à Multi-Hydro et présenté dans le chapitre précédent (Richard et al., 2012 ; voir aussi chapitre II et Annexe B). Cet outil permet ainsi une assimilation facile des données d'entrée et donc la mise en place rapide de nouveaux cas d'étude pour différentes résolutions, ce qui, avec l'absence de calibration, fait de Multi-Hydro un outil aisément transportable.

Au cours des trois dernières années, Multi-Hydro a subi de nombreuses améliorations lui permettant de passer d'une simple simulation en cascade de plusieurs modèles à un outil tenant compte des interactions complexes entre les différents éléments du cycle de l'eau en ville. Si le présent rapport se veut être un résumé des différentes fonctionnalités et capacités de Multi-Hydro, un tutoriel permettant sa mise en œuvre est disponible en Annexe A.

1. Description des modules de Multi-Hydro

Chaque module de Multi-Hydro (Figure 1) représente une partie du cycle urbain de l'eau. Ainsi, le module de surface (MHSC) prend en compte les ruissellements de surface. Il est basé sur le modèle TREX (Two Runoff Export model, Velleux et al., 2011) qui est développé par la compagnie HydroQual en association avec l'Université du Colorado. Ce modèle utilise des données spatialement distribuées (réseau hydrographique, utilisation du sol, topographie, pédologie, stockage de surface et conditions initiales) pour évaluer le comportement hydrologique d'un bassin versant.

Le module de sol (MHGC) est quant à lui basé sur le modèle VS2DT (Variably Saturated 2D Transport, Lappala et al., 1987) développé par U.S. Geological Survey. Ce modèle utilise les différences finies pour calculer la pression capillaire, le front d'humification, le contenu en eau et/ou la saturation et le bilan de masses du sol. Pour cela, une combinaison entre la loi de conservation de masses et la loi de Darcy est appliquée sur la structure et la composition du sol, la quantité d'eau entrant dans le système, la température et l'état hydrique initial du sol.

Le module de drainage (MHDC) permet la modélisation des écoulements d'eau dans le réseau (qu'il soit pluvial ou unitaire). Ce module est basé sur le modèle SWMM (Storm Water Management Model, Rossman, 2010) développé au sein de l'agence de protection environnementale américaine. Il est basé sur l'application des équations de Saint Venant en 1D sur une description détaillée du réseau de drainage des eaux pluviales (localisation, pente, profondeur, matériaux, forme des conduites,...)

Le module de pluie (MHRC) permet la prise en compte soit de pluie sous forme d'enregistrement temps-intensité de la pluie, soit sous forme de grilles temporelle. Ce dernier format permet de prendre en compte la variabilité spatiale et temporelle de la pluie au travers de la mise en place

d'une désagrégation des données de pluie issues des mesures radar par le biais de cascades multifractales universelles (Schertzer et Lovejoy, 1987).

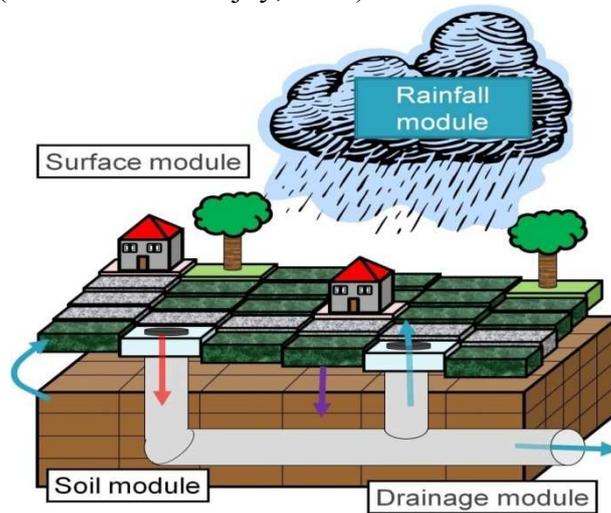


Figure 1 : Organisation de Multi-Hydro

2. Evolution de Multi-Hydro

a. Version initiale

La version initiale de Multi-Hydro (El Tabbach et al., 2009) correspondait à une simulation en cascade des différents modèles utilisés (Figure 2). Si l'automatisation de cette cascade s'est faite assez rapidement, elle ne permettait que l'application du modèle sur des événements courants, c'est-à-dire ne mettant pas le système de drainage en surcharge.

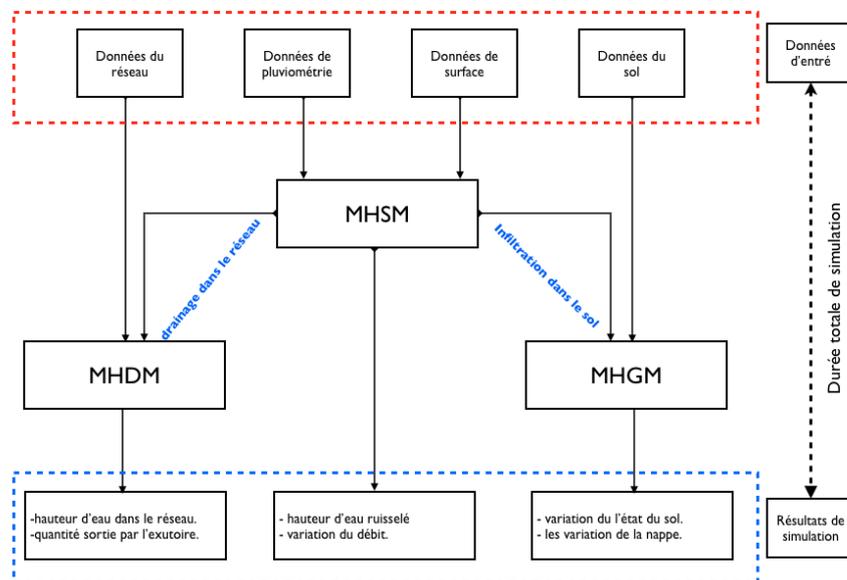


Figure 2 : Organisation des modules dans la version initiale de Multi-Hydro, Ichiba A. (voir Annexe C)

Toutes les versions suivantes intègrent les différentes interactions entre les différents composants du cycle de l'eau représentés dans Multi-Hydro. Ces interactions seront détaillées dans les sections suivantes. Un exemple d'utilisation des versions les plus récentes de Multi-Hydro est donné dans les annexes C et D.

b. Prise en compte des interaction surface-réseau d'assainissement et surface-sol

La connexion entre la surface et le système d'assainissement en milieu urbain se fait par le biais des avaloirs et des regards présents sur la chaussée. C'est également par ce biais que les modules de sol et de drainage sont connectés dans Multi-Hydro (Giangola-Murzyn et al., 2012 ; Ichiba, 2012).

Les avaloirs, présents dans les données SIG, sont définis dans le module de surface comme des éléments ayant une capacité d'infiltration très importante. Ces éléments de surface sont associés avec un nœud du réseau de drainage qui recevront les quantités infiltrées par la surface comme contribution à la charge du réseau. Cette démarche permet de spatialiser les entrées dans les conduites et ainsi de reproduire les problèmes inhérents à la surcharge de certaines zones du réseau.

La surcharge des canalisations conduit généralement au débordement des eaux vers la surface. Ce processus est pris en compte dans Multi-Hydro par la modification des éléments d'infiltration en source ponctuelle, ce qui permet à la fois de représenter la remise en ruissellement des eaux, mais aussi l'incapacité des avaloirs concernés à drainer les eaux de surface.

Le sol, dans les zones périurbaines, joue un rôle important dans la répartition des eaux de pluies entre le ruissellement et l'infiltration. Cependant, dans le module de surface, les quantités d'eau définies comme infiltrées (et donc perdues pour le ruissellement) sont déterminées assez sommairement puisqu'il ne prend en compte que les propriétés de la couche de sol la plus superficielle. Ces quantités d'eau sont ensuite utilisées comme entrée par le module de sol pour la répartition de l'eau au travers de la colonne de sol. Cependant, comme ce dernier module est plus

précis en terme d'infiltration, il est possible que la totalité de l'eau ne puisse entrer dans les processus de la zone non saturée. Dans ce cas l'excédant d'eau est remis en surface pour entrer dans les processus de ruissellement.

Avec la prise en compte de ces interactions, Multi-Hydro est donc capable de modéliser à la fois les échanges d'eau descendants mais aussi montants (Figure 3)

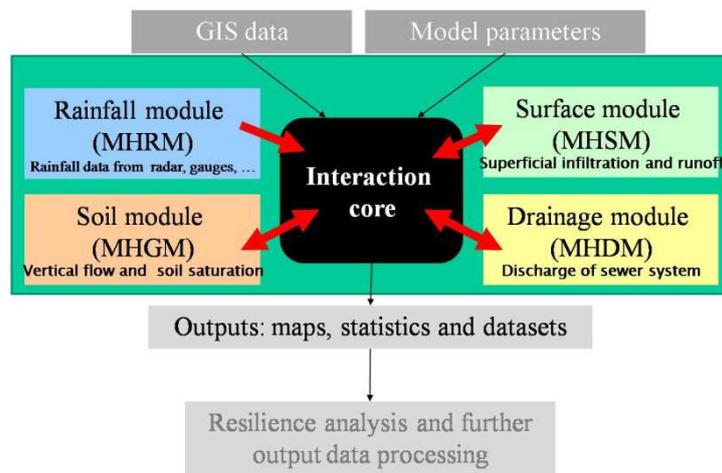


Figure 3 : Organisation des modules dans la version avec interaction dans Multi-Hydro

c. Prise en compte de la modification de la topographie par les activités anthropiques

La topographie généralement récupérée pour la modélisation des bassin versant correspond à l'élévation du sol en ne tenant pas compte de la présence des bâtiments, routes, mobilier urbain et autre (On parle alors de MNT, en opposition au MNE, pour Modèle Numérique d'Élévation). Or, la présence de ces éléments modifie grandement le cheminement de l'eau dans les zones plus ou moins urbanisées.

La modification de la topographie par les éléments du paysage urbain a donc été mis en place par le biais d'une option croisant les données de l'utilisation du sol et de l'élévation pour créer automatiquement un nouveau fichier d'altitude pour les calculs des écoulements de surface (Figure 4).

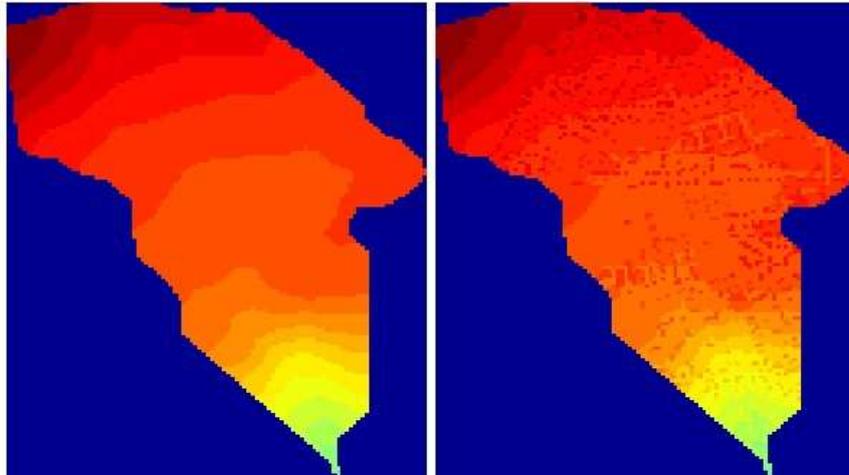


Figure 4 : Exemple de modification de l'élévation en fonction de l'utilisation du sol. A gauche, la topographie telle que récupérée initialement. A droite, la topographie modifiée. L'altitude de la zone est comprise entre 70 et 120 m.

d. Prise en compte des rivières

Les rivières sont prise en compte dans Multi-Hydro via le module de surface mais il est apparu que leur modélisation dépendait de leur largeur et de la taille de maille employée pour la modélisation. Initialement conçu pour la modélisation de grands bassins versants à des résolution assez faible, le module de surface considère les rivières comme des éléments uni-dimentionnel. Cette représentation est parfaitement valable dans le cas où la largeur de la rivière est inférieure à la taille de la maille. Cependant, dans le cas où la rivière est plus large, une modélisation en deux dimension est indispensable. Comme l'a montré Boyington (2010) dans sa thèse, il est préférable dans ce cas de modéliser la rivière comme un chenal de plusieurs pixel de large et initialement rempli d'eau. L'automatisation de la procédure a donc été mise en place dans Multi-Hydro.

e. Prise en compte des mesure de lutte contre les inondations

Les événements extrêmes sont souvent associés à des volume de ruissellements important pouvant conduire à des inondations. Dans le but de limiter l'étendue de celles-ci et de protéger les populations, les gestionnaires des villes peuvent être appeler à décider de la mise en place de mesures de protection contre les inondations comme des barrières (Figure 5). Ce type d'éléments, de part leur fonctions, modifient considérablement l'écoulement des eaux en surface et nécessite d'être pris en compte dans la modélisation que ce soit pour définir leur localisation la plus adaptée que pour évaluer les impacts qu'il peuvent avoir sur les quartiers avoisinants. Du fait de la structure de Multi-Hydro, il est possible de simuler une mise en place ou la destruction en cours d'évènement de l'élément modélisé, ce qui permet de tester plusieurs scénarios.

D'autre part, les éléments visant à la réduction des eaux de ruissellements telles que les noues sont de plus en plus utilisées et nécessite également d'être pris en compte dans les modélisation de quartiers urbains et péri-urbains. Ceux-ci sont défini dans Multi-Hydro comme des dépressions dont les propriétés d'infiltration et de stockage des eaux sont facilement descriptibles via MH-AssimTool.

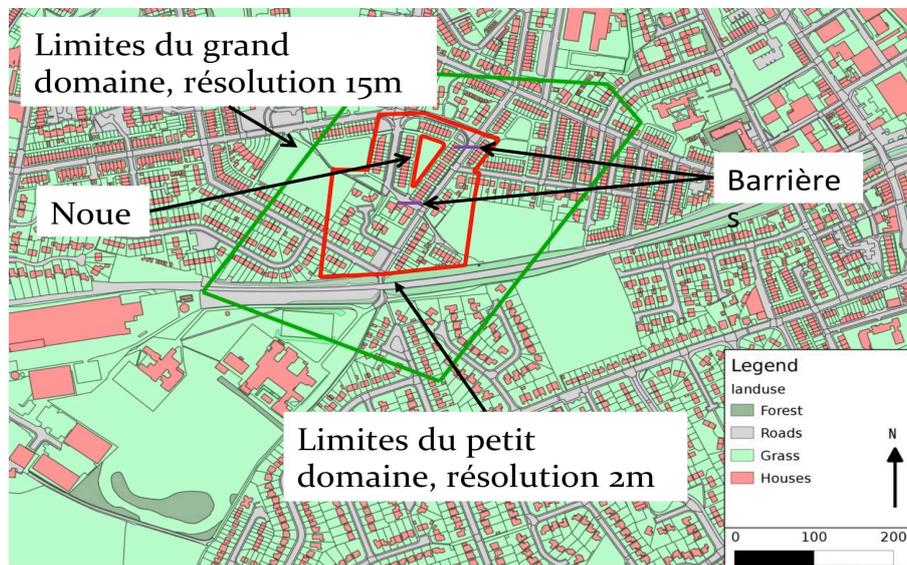


Figure 5 : Exemple de mise en place de barrières dans le cadre de la lutte contre les inondations.

3. Résultats et visualisation

Les simulations Multi-Hydro donnent un grand nombre de résultats qui ont requit le développement d'un outils Scilab pour faciliter leurs visualisations et leurs analyses.

Les principales sorties sont les sorties courantes des modèles hydrologiques tels que les courbe de débits en surface et dans le réseau de drainage des eaux de pluies.

Multi-Hydro permet également de récupérer les cartes de ruissellement, d'infiltration et de hauteur d'eau sur le domaine modélisé, et ce pour chacun des pas de temps de calcul. Ainsi, il est possible de mettre en place des analyses statistiques poussées (analyses multifractales) sur ces résultats afin d'évaluer le comportement global de la zone d'étude.

II. MH-AssimTool : Outil dédié à Multi-Hydro

Cet outil a pour but de créer les fichiers d'entrée au modèle Multi-Hydro. Ce dernier est basé sur des informations géographiques devant être converties sous des formats spécifiques. Il est construit autour de 4 modules :

- Simulation de pluie : Multi-Hydro Rainfall Module (MHRM)
- Écoulement en surface : Multi-Hydro Surface Module (MHSM)
- Infiltration de l'eau : Multi-Hydro Ground Module (MHGM)
- Modélisation du réseau d'assainissement : Multi-Hydro Drainage Module (MHDM)

Pour chaque module, des formats de fichiers différents doivent être produits. MH-AssimTool permet de préparer les fichiers nécessaires à l'utilisation de Multi-Hydro ainsi qu'à l'exportation de

cartes créées. En plus de cela, les résultats de Multi-hydro pourront être importés dans l'interface pour une visualisation.

Fenêtre principale

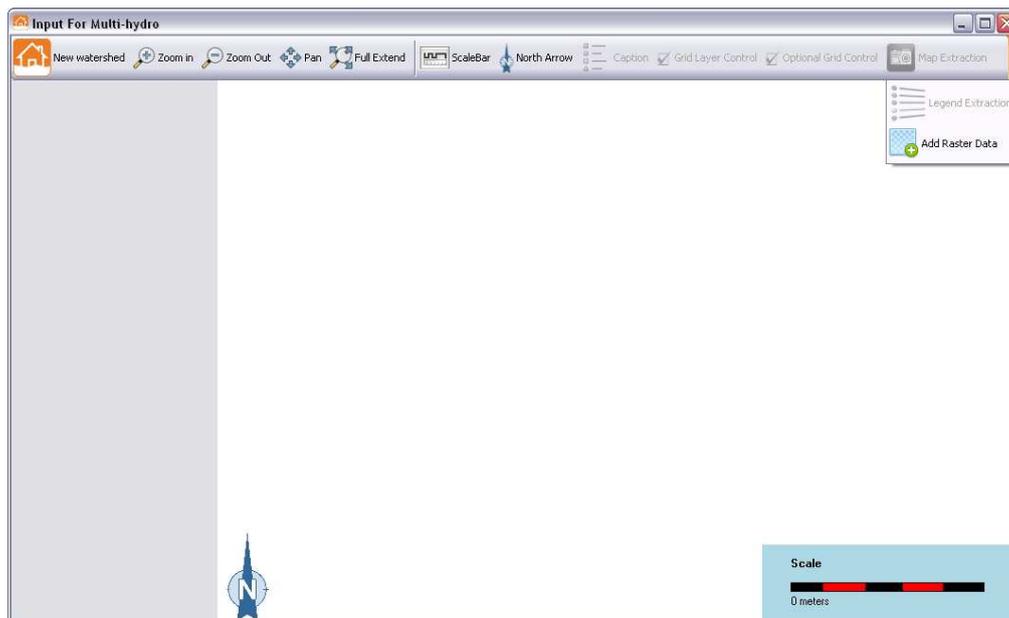


Figure 6 : Fenêtre principale de MH-AssimTool

Quelques boutons s'offrent à l'utilisateur au démarrage mais ne seront actifs seulement lorsqu'un fichier contenant de l'information géographique sera importé. Il sera alors possible de zoomer, dézoomer, déplacer la carte ou alors de zoomer au maximum de la carte grâce au bouton "Full Extend". Des boutons "ScaleBar" ou "North Arrow" permettront d'afficher ou de cacher respectivement l'échelle ou la cardinalité de la carte.

D'autres boutons, qui pour l'instant ne sont pas actifs, seront accessibles à la fin du processus de conversion des fichiers.

L'utilisateur aura la possibilité d'importer dès maintenant les fichiers créés par Multi-Hydro. Ces fichiers sont les résultats d'une simulation et leur visualisation peut être intéressante en les couplant avec l'affichage de la donnée source ou convertie.

Pour commencer une nouvelle préparation de donnée, l'utilisateur doit cliquer sur le bouton « NEW WATERSHED » et une nouvelle fenêtre dédiée au chargement des données sera affichée Figure ci-dessous.

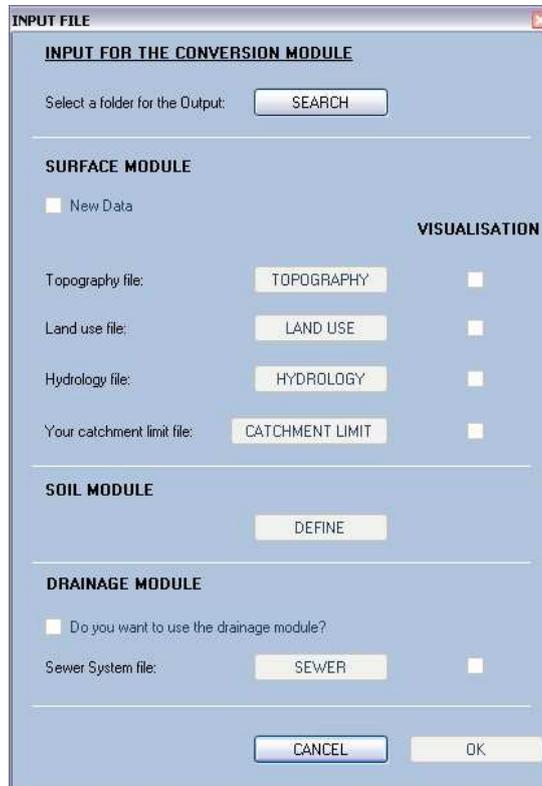


Figure 7 : Fenêtre pour l'import des données définissant le nouveau bassin versant

1. Fichiers à importer pour une nouvelle simulation

a. Topographie :

Les fichiers les plus courants pour définir la topographie d'un terrain sont des fichiers grilles (.asc), dit MNT réguliers (Modèle Numérique de Terrain). Ils peuvent être lus dans un éditeur de texte de type bloc-notes et contiennent obligatoirement une entête et un corps. Dans l'entête plusieurs informations seront accessibles au programme : la taille de la maille, la taille de la grille (en nombre de lignes et de colonnes) et la coordonnée du point en bas à gauche du fichier d'altitude (Remarque : ces coordonnées correspondent au coin du pixel et non au centre). Dans le corps, on trouvera les altitudes de chaque pixel de terrain. Si le format ne convient pas, le logiciel open source GRID CONVERTER aidera l'utilisateur à convertir la plupart des fichiers d'altitude (.jpg, .grd, .flt, .gif, .bmp, .tif) en fichier grille .asc.

Une fois importée, la donnée pourra être visualisée grâce à la case à cocher à côté du bouton d'import. Cela permettra à l'utilisateur de vérifier la conformité du fichier.

Cette donnée d'élévation sera, au cours de la conversion, interpolée en fonction de la taille du maillage choisi. L'interpolation utilisée, IDW (Inverse distance weighted), détermine la valeur des cellules en calculant une moyenne pondérée à partir des valeurs des points du voisinage. La

pondération est inversement proportionnelle à la distance séparant le centre de la cellule des points du voisinage. Par contre, si la taille du maillage est supérieure à la taille des pixels contenant l'altitude, aucune interpolation ne sera faite.

Les fichiers ci-dessous sont tous demandés en format shapefile (.shp). La donnée correspondant à ce type de fichier (tout comme n'importe quel fichier provenant d'un logiciel de Système d'Information Géographique) est composée d'une partie objet et d'une partie information. La partie objet correspond à des formes géo-référencées correspondant à des polygones (délimitation de bâtiments, régions,...), des lignes (réseau routier, de gaz, ...) ou des points (points GPS, emplacement de réverbères, ...). Pour chaque objet, des informations pourront être stockées dans un tableau lié par un identifiant unique. Il y aura autant de lignes dans le tableau que d'objets. Grâce à cela, un utilisateur pourra cliquer sur un objet (par exemple un bâtiment) et obtiendra les informations de cet objet dans une fenêtre (Hauteur, superficie, nombre d'étages,...). Ajouté à cela, un fichier contenant la projection géographique est attaché à la donnée. Grâce à cela, le logiciel lira directement le système de coordonnées lors de l'import des fichiers.

Selon le type de donnée (mode d'occupation des sols, réseau d'assainissement), le programme utilisera les données géographiques et les informations liées à chaque objet, c'est pour cela qu'il sera demandé à l'utilisateur le nom de la colonne où l'information se trouvera. Dans le cas du réseau d'assainissement, l'utilisateur pourra utiliser des valeurs par défaut si l'information voulue n'est pas présente dans le fichier source.

b. Le mode d'occupation du sol :

Le mode d'occupation du sol est spécifique à chaque pays et peut être défini d'une manière ou d'une autre selon l'étude que l'on souhaite faire. Pour un cas d'étude hydrologique prenant en compte l'écoulement en surface, il est préférable d'avoir une donnée précise incluant la délimitation des routes, des bâtiments ou tout autre élément que l'utilisateur pense important. Seul le mode d'occupation des sols "avaloirs" est obligatoire. Sans cette donnée, il n'y aura aucun lien entre le module gérant le réseau d'assainissement et l'écoulement de surface. Toutes ces catégories devront être définies par un identifiant numérique entier dans le tableau d'information. Cela veut dire que tous les bâtiments, par exemple, auront comme information commune un identifiant numérique identique. Il en sera de même pour chaque catégorie. Cette information se doit d'être implémentée dans la donnée source. Une colonne sera créée pour le stockage de cette donnée. Le nom de la colonne est demandé directement après le chargement du fichier dans l'espace de travail (automatique), grâce à la fenêtre imagée ci-dessous.

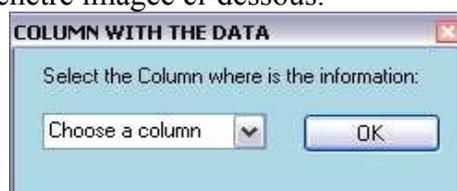


Figure 8 : Choix de la colonne contenant les différentes catégories d'occupation du sol

Une fois la colonne contenant les différentes classes choisies, une autre fenêtre se présente à l'utilisateur. Cette interface permet de choisir le sens d'extraction des données d'occupation du sol. Pour être plus clair, le mode d'occupation du sol va être converti en donnée Raster, cela veut dire que le programme va transformer chaque objet en pixel. La taille de ces pixels sera demandée à l'utilisateur juste avant le lancement de la conversion. Pour chaque pixel, une seule catégorie d'occupation du sol sera extraite. Si la taille de ce dernier est grande et englobe plusieurs catégories de sol, il faut que la donnée la plus importante soit extraite. Il est conseillé d'extraire en premier la donnée "AVALOIR" car elle permet de faire le lien avec le module du réseau d'assainissement. L'extraction des données sera guidée grâce à la fenêtre affichée ci-dessous.

Figure 9 : Choix des catégories à extraire

Cette fenêtre sera affichée autant de fois qu'il y a de catégories différentes dans le fichier d'occupation du sol (limité à 30 catégories). Le menu déroulant permet de sélectionner l'identifiant correspondant à une catégorie. Une fois choisi, l'utilisateur aura accès à une fenêtre en pressant sur "OK". Celle-ci permet d'obtenir des informations supplémentaires, rarement intégrées dans les données d'occupation du sol. L'utilisateur pourra aussi choisir les couleurs de chaque catégorie pour la visualisation des résultats. Lorsque toutes les catégories ont été paramétrées, l'utilisateur revient automatiquement sur le chargement de la donnée source. La donnée importée pourra être visualisée grâce à la case à cocher correspondante pour vérification.

c. L'hydrologie :

Tout comme la donnée du mode d'occupation du sol, l'hydrologie se doit d'être en format Shapefile. Cette donnée correspond aux rivières présentes dans le domaine modélisé. Cette donnée pourra être visualisée grâce à la case à cocher correspondante pour vérification.

d. Le bassin d'étude :

Le fichier de délimitation du bassin d'étude n'est pas obligatoire, un module intégré au logiciel permet de tracer directement un bassin sur la carte si l'utilisateur n'a pas les limites sous format Shapefile. Si cette donnée est importée, elle pourra être visualisée grâce à la case à cocher correspondante pour vérification.

e. Le réseau d'assainissement :

Une case à cocher permet d'utiliser la partie assainissement de Multi-Hydro. Une fois cochée, l'importation du fichier du réseau d'assainissement pourra commencer. Tout comme les autres fichiers, il est demandé sous format Shapefile (.shp). Le réseau devra être défini par des tronçons linéaires reliés les uns aux autres. Pour chacun d'eux, des informations telles que la forme, la taille, la profondeur,... seront demandées via une nouvelle fenêtre (Figure ci-dessous).

The dialog box 'Data for the sewer system' is designed to allow users to specify data sources for various sewer system parameters. It features the following sections:

- Shape:** Includes a 'Column data' dropdown, a checked 'Default data' checkbox, and a 'Help' button.
- Width (in Meters):** Includes a 'Column data' dropdown, a checked 'Default data' checkbox with a value of 1.00, and a 'Conversion Table' button.
- Height (in Meters):** Includes a 'Column data' dropdown, a checked 'Default data' checkbox with a value of 1.00, and a 'Conversion Table' button.
- Maximum depth of the nodes (in Meters): DIFFERENCE WITH:** Includes a 'Manhole cover level' dropdown and a checked 'Ground elevation' checkbox.
- Elevation of the inlet point (in Meters):** Includes a 'Column data' dropdown, a checked 'Default data' checkbox, and a 'Ground elevation minus:' dropdown set to 0.00.
- Elevation of the outlet point (in Meters):** Includes a 'Column data' dropdown, a checked 'Default data' checkbox, and a 'Ground elevation minus:' dropdown set to 0.00.
- Manning coefficient:** Includes a 'Column data' dropdown, a checked 'Default data' checkbox, and a 'Manning coefficient:' dropdown set to 0.012.

At the bottom of the dialog are 'CANCEL' and 'OK' buttons.

Figure 10 : Paramètre du réseau d'assainissement

Pour chaque donnée, l'utilisateur aura le choix entre une valeur par défaut ou alors l'extraction directe de l'information dans une colonne présente dans le fichier source.

- **Section des tuyaux** : La forme du réseau d'assainissement influence grandement le débit dans les tuyaux. La liste déroulante par défaut contient toutes les formes acceptées par le module. Le bouton "HELP" à côté permet de visualiser les caractéristiques de chaque forme pour savoir ce qui correspond au mieux au réseau que l'on étudie. Si la donnée est présente dans une colonne du tableau attachée aux tuyaux, l'utilisateur pourra choisir son nom dans le menu déroulant de gauche. Tout comme pour la forme des tuyaux, l'utilisateur pourra choisir la hauteur ainsi que la largeur de la section des tuyaux. Il aura le choix entre une donnée existante dans le tableau des informations et une donnée par défaut. Remarque : si la forme du tuyau est "CIRCULAR" par défaut et que les tailles de sections sont différentes, la forme sera automatiquement changée en "VERTICAL ELLIPSE".
- **Profondeur des nœuds** : Chaque nœud du réseau doit avoir une profondeur. Pour cela, le logiciel peut faire la différence entre l'élévation des nœuds et la topographie en surface ou alors prendre une donnée d'élévation correspondant au regard de visite présente dans une colonne du tableau.
- **Élévation des points d'entrée et de sortie du tuyau** : L'élévation des points d'entrée et de sortie de chaque tuyau peut être stockée dans le tableau des données ou alors peut être déduite de la topographie. En effet, l'élévation des nœuds peut être trouvée grâce à une différence entre une profondeur constante et la topographie. Bien sur, ceci ne s'applique que dans le cas d'un écoulement gravitaire.
- **Coefficient de Manning** : Le coefficient de Manning permet de caractériser un matériau par sa rugosité. Il diffère selon le type de matériau de la canalisation. Si la donnée est existante dans le tableau lié aux formes géométriques définissant le réseau, l'utilisateur choisira la colonne dans la liste déroulante de gauche, sinon, il pourra choisir une valeur par défaut dans la case à droite.

2. Paramètre à définir pour une nouvelle simulation

Le module gérant l'infiltration en profondeur nécessite des données souvent inaccessibles. Pour définir la géologie du bassin d'étude, il ne sera donc pas demandé d'importer un fichier mais l'utilisateur devra choisir les couches présentes en profondeur manuellement. Pour cela, une première fenêtre lui permettra de sélectionner le nombre de couches différentes (quatre au maximum) ainsi que la profondeur de la nappe phréatique.

Pour la France, le site du BRGM permet de trouver la plupart des informations grâce aux forages géologiques. Pour les autres pays le site onegeology.org sera utile pour trouver ces informations.

Une fois le nombre de couches choisi, une deuxième fenêtre permet de choisir les paramètres d'infiltration de chaque couche géologique.

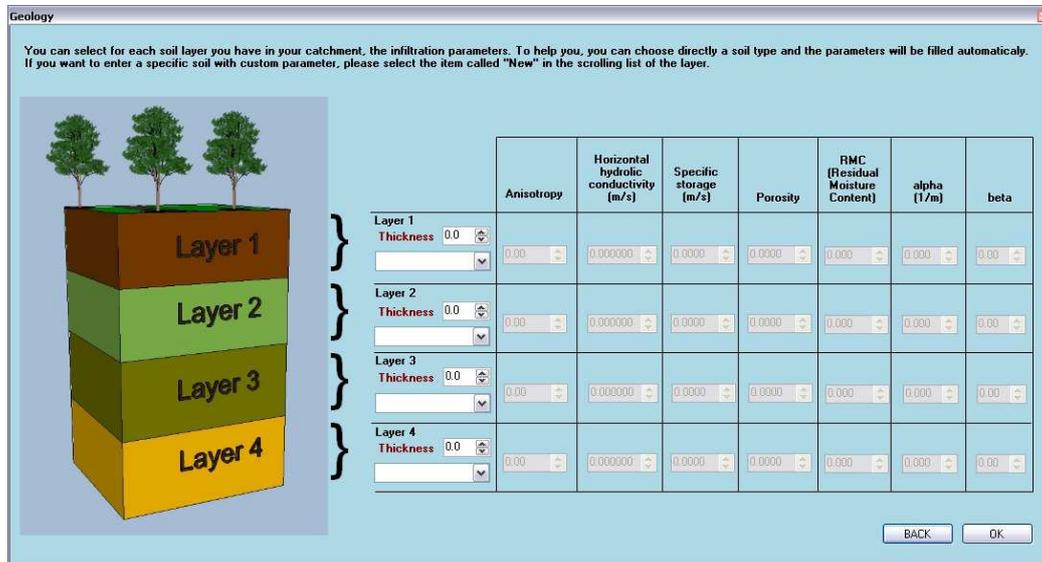


Figure 11 : Paramètres d'infiltration pour chaque couche géologique

Une fois que tous les fichiers sont importés, l'utilisateur doit paramétrer deux informations importantes pour le lancement de la conversion. La première est le choix de zone d'étude et la deuxième est la taille du maillage pour la conversion de la donnée vecteur vers la donnée Raster.

La zone délimitant le bassin d'étude a été soit importée au début de la paramétrisation des informations, soit dessinée manuellement grâce au bouton de gauche de l'outil. Dans les deux cas, ce fichier sera automatiquement ouvert lorsque le bouton "SELECT" (bouton avec la flèche sur fond vert) sera cliqué. Il suffira alors de cliquer sur la zone d'étude. Remarque : le polygone deviendra vert lorsque la zone est sélectionnée. Maintenant que la zone est choisie, le bouton "GO" peut être appuyé. Une nouvelle fenêtre s'offre à l'utilisateur pour le choix de la taille du maillage.

Les données de surfaces vont être converties sous forme de grilles. Plus la grille sera fine, plus la qualité de conversion sera grande. Par contre, il existe aussi un lien fort entre l'écoulement en surface et la taille du maillage. En effet, plus la grille sera fine, plus l'imperméabilisation sera forte du fait de la plus grande proportion de route et de toit dans la donnée grille par exemple. L'utilisateur devra aussi penser aux temps de calculs pour la conversion ainsi que pour le lancement du modèle Multi-Hydro. Pour une zone d'environ 1,5 km², il faudra 1h pour convertir tous les fichiers pour un maillage de 2m avec un ordinateur standard.

3. Fonctionnement du programme

Lorsque la préparation des fichiers commence, des grilles vides de la taille de la zone d'étude sont créées. Ensuite, elles sont remplies avec la donnée correspondante à chacune : la

topographie, le mode d'occupation du sol, les conditions initiales... Une fois les grilles remplies, la conversion du fichier de réseaux d'assainissement est réalisée. Pour chaque donnée choisie dans la fenêtre de définition du réseau, un test est fait pour savoir si la donnée est une donnée par défaut ou alors, doit être directement extraite depuis le tableau de données. Ainsi, la donnée voulue est écrite dans un fichier type pour le modèle hydrologique. Lorsque les calculs sont finis, les données converties pourront être visualisées. Ainsi, l'utilisateur jugera du bon choix de la taille du maillage, de la zone d'étude ou encore de l'ordre d'extraction des différentes catégories d'occupations du sol. Pour cela, une série de boutons et de nouveaux menus sont accessibles. Ils se situent en haut de l'interface.

4. Visualisation des données d'entrées et de sorties

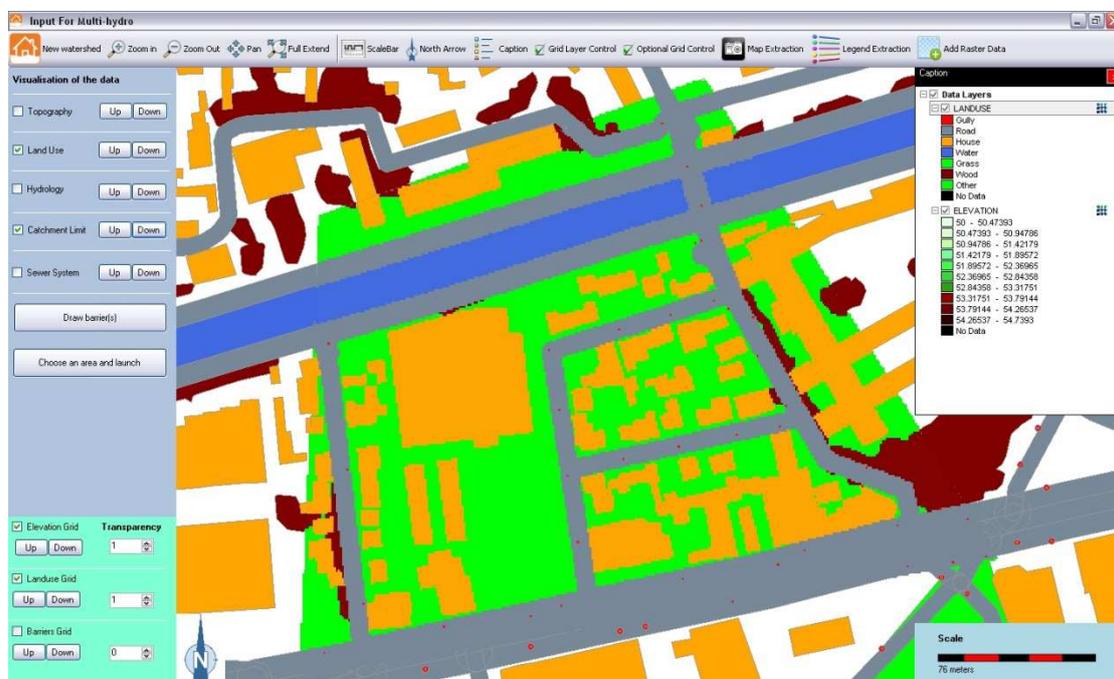


Figure 12 : Fenêtre principale avec les données sources (.shp) et converties (.asc)

A la fin du processus, un nouveau menu sur fond vert est apparu à droite de l'interface. Celui-ci permet d'afficher les grilles d'élévations interpolées, du mode d'occupation du sol et des barrières. Si besoin, une transparence pourra être appliquée à chacune des couches afin de superposer les informations. Ce nouveau menu peut être caché et ré-affiché grâce au bouton "GRID LAYER CONTROL". En plus de cela, les fichiers Raster correspondants aux conditions initiales (infiltration et eau en surface) peuvent être visualisés. Pour cela, l'utilisateur devra cliquer sur le bouton "OPTIONAL GRID CONTROL" pour afficher le menu permettant l'affichage de ces données.

Si l'utilisateur souhaite créer des cartes automatiquement pour les utiliser dans un rapport ou une présentation, le bouton "MAP EXTRACTION" permettra un export instantané de toutes les cartes rasterisées dans un dossier nommé "MAP" qui sera ouvert lors du clic. Elles seront stockées sous format bitmap (.bmp).

Le bouton "LEGEND EXTRACTION" permet l'export de la légende en cours ainsi que l'échelle de la carte. Si la carte n'affiche pas de couche Raster, la légende sera vide. A chaque fois que ce bouton sera appuyé, un nouveau fichier bitmap sera créé avec un nom différent suivant le style : "legend + NUMERO .bmp". Ces fichiers seront accessibles dans le dossier MAP créé lors de l'extraction des cartes.

III. Perspectives

Dans les années à venir, Multi-Hydro continuera à être développé selon deux axes principaux. Tout d'abord, l'interaction homme-machine sera améliorée. Cette tâche a débuté avec la création de MH-AssimTool facilitant la mise en place de nouveaux cas d'étude. La connexion entre MH-AssimTool et Multi-Hydro sera par la suite renforcée jusqu'à ce que les deux outils soient fusionnés en un seul. A l'autre bout de la chaîne de modélisation, l'exploitation des résultats de Multi-Hydro sera facilitée par la mise en place d'un package pour la visualisation des écoulements en trois dimensions. Ensuite, les processus simulés avec Multi-Hydro seront affinés et complétés. La partie quantitative des calculs doit encore être améliorée pour prendre en compte les interactions entre le sol et le réseau de drainage des eaux pluviales ainsi que les flux dans la zone saturée. De plus, les modules de surface, de sol et de drainage possèdent déjà dans leur code source les outils nécessaires à la mise en place d'étude qualitative dans Multi-Hydro.

IV. Références

- Bonyington, T. M. (2010). Water on the Floodplain: Frequency and Volume of Overbank Discharge. PhD thesis, University of Wisconsin-Madison.
- El-Tabach, E., I. Tchiguirinskaia, O. Mahmood and D. Schertzer (2009). Multi-Hydro: a spatially distributed numerical model to assess and manage runoff processes in peri-urban watersheds. Road Map Towards
- Giangola-Murzyn A., A. Gires, C.T. Hoang, I. Tchiguirinskaia, D. Schertzer (2012): Multi-Hydro physically based modelling to assess flood resilience across scales, case studies in Paris region. Proceedings of the 10th Urban Drainage Conference, Belgrade 3-7 Sept. 2012, Serbia
- Ichiba A. (2012). Modélisation Hydrologique des Effets de Mesure de Resilience sur le Bassin Versant de Chennevière-sur-Marne par le Modèle Multi-Hydro. Mémoire de projet de fin d'étude et de stage de master, Université Paris-Diderot et Ecole des Ponts ParisTech
- Lappala E.G., Healy R.W., Weeks E.P. (1987), Documentation of Computer Program VS2D to Solve the Equation of Fluid Flow in Variably Saturated Porous Media. U.S. Geological Survey, Denver, 184p.
- Richard J., Tchiguirinskaia I. And Schertzer D. (2012), GIS data assimilation interface for distributed hydrological models. Hydro-Informatics Conference, Hamburg 14-18 July 2012, Germany.

- Rossman L.A. (2010), Storm Water Management Model, User's Manual. Version 5.0. U.S. Environmental Protection Agency, EPA/600/R-05/040.
- Schertzer, D. and S. Lovejoy (1987). "Physical modeling and Analysis of Rain and Clouds by Anisotropic Scaling Multiplicative Processes." Journal of Geophysical Research D 8(8): 9693-9714.
- Velleux M.L., England J.F., Julien P.Y. (2011), TREX Watershed Modelling Framework User's Manual: Model Theory and Description. Department of civil engineering, Colorado State University, Fort Collins, January, 106p.