

**Projet ANR- ANR-18-CE01-0020**

## **DEUFI: Détails de l'impact des inondations urbaines**

Programme Milieux et biodiversité : Terre fluide et solide 2018

<b>A</b>	<b>IDENTIFICATION</b>	<b>2</b>
<b>B</b>	<b>RESUME CONSOLIDE PUBLIC</b>	<b>2</b>
B.1	Résumé consolidé public en français	2
B.2	Résumé consolidé public en anglais	5
<b>C</b>	<b>MEMOIRE SCIENTIFIQUE</b>	<b>7</b>
C.1	Résumé du mémoire	7
C.2	Enjeux et problématique, état de l'art	7
C.3	Approche scientifique et technique	8
C.4	Résultats obtenus, exploitation des résultats et conclusions	8
C.5	Références	16
<b>D</b>	<b>LISTE DES LIVRABLES</b>	<b>16</b>
<b>E</b>	<b>IMPACT DU PROJET</b>	<b>19</b>
E.1	Indicateurs d'impact	19
E.2	Liste des publications et communications	20
E.3	Liste des éléments de valorisation	23
E.4	Bilan et suivi des personnels recrutés en CDD (hors stagiaires)	25
<b>F</b>	<b>ANNEXE : DELIVERABLE D3A4</b>	<b>26</b>

## A IDENTIFICATION

Acronyme du projet	DEUFI
Titre du projet	Détails de l'impact des inondations urbaines
Coordinateur du projet (société/organisme)	A.Paquier puis S. Proust (INRAE)
Période du projet (date de début – date de fin)	1/1/2019 - 15/8/2023
Site web du projet, le cas échéant	<a href="https://riverhydraulics.riverly.inrae.fr/activites/projets-finalises/projets-anr">https://riverhydraulics.riverly.inrae.fr/activites/projets-finalises/projets-anr</a>

Rédacteur de ce rapport	
Civilité, prénom, nom	Mr Sébastien PROUST
Téléphone	+33 4 72 20 86 02
Adresse électronique	sebastien.proust@inrae.fr
Date de rédaction	27 juillet 2023

Si différent du rédacteur, indiquer un contact pour le projet	
Civilité, prénom, nom	
Téléphone	
Adresse électronique	

Liste des partenaires présents à la fin du projet (société/organisme et responsable scientifique)	RiverLy (Sébastien PROUST) ARTELIA (Olivier BERTRAND) CEREMA (Philippe SERGENT) G-EAU (Frédéric GRELOT) LAGAM (Freddy VINET) ICUBE (Guilhem DELLINGER) INSA Lyon (Emmanuel MIGNOT) Université de Liège (Benjamin DEWALS) KICT (Dong Sop RHEE) Hydrosociences Montpellier (Pascal FINAUD – GUYOT)
---	---

## B RESUME CONSOLIDE PUBLIC

### B.1 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN FRANÇAIS

**Projet DEUFI: plus d'information sur l'impact des inondations urbaines en prenant en compte les échanges d'eau entre rues et bâti.**

#### Objectifs du projet

Bien que les inondations urbaines soient largement étudiées, les débits d'échange entre les rues et les bâtiments sont peu documentés en laboratoire et sur le terrain. Le projet DEUFI comble cette lacune en se focalisant sur l'inondation à l'échelle individuelle intégrant la compréhension des processus hydrauliques à l'intérieur et à l'extérieur d'un bâtiment et en estimant comment cette connaissance peut être utile pour estimer les dommages et le nombre de victimes. Le projet DEUFI propose des méthodes de simulation des inondations urbaines améliorées capables (i) d'estimer l'intrusion d'eau dans les zones bâties, (ii) d'évaluer la répartition spatiale de l'exposition humaine et des dommages matériels et (iii) de définir des recommandations sur les meilleures méthodes de gestion des inondations urbaines à mettre en œuvre en lien avec la perception des citoyens et leur attitude pendant les fortes inondations (de relativement courte durée).

Afin d'examiner l'influence des ouvertures sur les écoulements dans les blocs de bâti et le long des rues, trois échelles sont étudiées: la façade (comprenant une ou plusieurs ouvertures), le

bloc (zone bâtie entourée de rues et incluant un ou plusieurs bâtiments) et le quartier (incluant plusieurs rues et de nombreux blocs). L'information fournie à une de ces échelles permet d'estimer le niveau de risque et de prendre des décisions pour la gestion du risque d'inondation aux échelles individuelle ou collective. A l'échelle de la façade, le calcul du débit à travers les ouvertures est central car c'est la première étape pour estimer l'influence des échanges rues/bâti sur les inondations urbaines. A l'échelle du bloc, la différence entre l'aléa à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment est mise en avant particulièrement pour l'estimation des dommages mais l'ouverture crée aussi une perturbation de l'aléa d'inondation dans la rue, ce qui peut être important pour l'estimation de la sécurité. A l'échelle du quartier, on étudie la propagation des écoulements et son incertitude à cause des échanges entre rues et bâtiments mais aussi à cause d'autres facteurs (e.g., influence des conditions limites) ; la stratégie pour la gestion des inondations doit être construite à partir de résultats à cette échelle.

### **Méthodes et technologies utilisées**

Le projet DEUFI est structuré en trois tâches combinant hydraulique, estimation des dommages et approches citoyennes : expériences en laboratoire (WP1), cas de terrain (WP2) et modèles hydrodynamiques (WP3). WP1 regroupe trois ensembles d'expériences de laboratoires qui traitent des structures d'écoulements urbains aux échelles de la façade, du bloc et du quartier respectivement. WP2 se concentre sur deux cas d'étude dans le but d'appliquer les méthodes développées à des configurations réelles qui diffèrent par l'environnement géographique (origine de l'inondation, pentes des rues ...). WP2 regroupe les développements d'outils (logiciels, base de données ...) à l'échelle du terrain et l'application de ces outils aux deux cas de terrain en vue d'évaluer la pertinence pour des porteurs d'enjeux locaux. WP3 développe des modèles hydrodynamiques qui permettent de passer de l'échelle du laboratoire à l'échelle du terrain, valide ces modèles par rapport aux résultats du WP1 et compare leur efficacité à produire des résultats sur les cas de terrain utiles pour les porteurs d'enjeux locaux. Le projet DEUFI associe huit partenaires français compétents en hydraulique, économie, géographie, sociologie, hydrologie, mathématiques appliquées et informatique ainsi que deux équipes étrangères engagées dans des recherches sur des sujets proches dans leurs propres pays.

### **Résultats principaux**

Les expériences menées à l'INSA de Lyon ont montré : (1) la forte influence des obstacles présents devant les ouvertures sur le débit d'échange entre la rue et le bâtiment (diminution ou augmentation de l'ordre de 100%) ; (2) qu'il n'existe pas de formule analytique qui peut prédire avec précision le débit d'intrusion dans les bâtiments. Les expériences menées à INRAE ont montré que la porosité des murs d'un bloc de bâti pouvait modifier les hauteurs d'eau dans les rues de l'ordre de 10% et les vitesses de l'ordre de 70%. L'effet de la distribution de la porosité est également important mais est moindre que celui de la valeur de la porosité. Enfin, en régime instationnaire, la capacité de stockage du bloc peut permettre d'écarter les hauteurs et vitesses maximales de l'ordre de 10%. Les expériences réalisées en régime permanent à ICUBE ont permis d'étudier l'influence du débit total amont, de la répartition de ce débit entre rues amont, des conditions limites aval, et de la porosité planaire du quartier, sur les débits sortants à l'aval du quartier. En régime instationnaire, la déformation d'un hydrogramme triangulaire au travers du quartier a été étudiée pour des paramètres variables de l'hydrogramme (temps de montée et descente, valeur du pic...). Les tests de la chaîne d'identification automatique des ouvrants de façade sont concluants. La méthodologie incluant l'application pour prise de vue sur le terrain a été validée sur Nîmes et Oullins dans des quartiers où l'organisation urbaine était différente. Les enquêtes auprès de la population

et des gestionnaires du risque montrent qu'à Oullins la population a été rassurée par les travaux de recalibrage récent du cours d'eau Yzeron et que le niveau de conscience du risque est faible pour les crues rares et majeures. Les travaux se sont donc orientés vers la construction de scénario d'impact à échelle fine pour les crues Q100 à Q500 qui seront utiles aux gestionnaires des risques locaux. Pour le cas de Nîmes, les préoccupations se concentrent sur la sécurité humaine. Les bâtiments du quartier Richelieu ne sont pas adaptés à la sécurité des personnes. Les données de mortalité préalables au diagnostic sur la sécurité humaine dans le quartier Richelieu ont été consolidées et ont servi à la modélisation de la vulnérabilité humaine. La modélisation hydraulique 3D a contribué à redéfinir les lois d'échanges au droit des ouvertures des bâtiments répondant ainsi à la difficulté d'estimer les débits par des lois d'ouvrage classiques ou la modélisation 2D. Un algorithme d'échange rue-bâti a été développé dans le logiciel Flood1D2D. L'utilisation d'un tel modèle hydraulique permet d'estimer les dommages domestiques en prenant en compte l'aléa dans le bâtiment (au lieu de la rue).

### **Productions scientifiques**

Les résultats expérimentaux ont donné lieu à des articles de référence sur l'impact des inondations à l'échelle de la rue (Mignot et al., 2020), à l'échelle du bloc (Mejia et al., 2021 ; 2023 ; Dewals et al 2023) et à l'échelle du quartier (Finaud-Guyot et al. 2020, Seong et al 2020, Guiot et al, *in prep.*) présentant les principales conclusions de ces travaux et introduisant les bases de données correspondantes qui sont (Mignot 2022 ; Mejia et al 2022, 2023) ou seront accessibles (Dellinger et al, *in prep*) sur <https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/> pour des travaux de recherche futurs. La mise en œuvre des différents outils sur les cas de terrain a montré comment aboutir à une information détaillée sur l'inondation et l'incertitude qui demeure sur les résultats produits en terme de risque d'inondation. La pertinence de la modélisation 2D à modéliser les débits d'intrusion dans un bloc de bâti en présence de portes ouvertes a été évaluée (Dewals et al 2023). L'intérêt d'une modélisation 3D a été exploré par Li et al. (2024, 2025) et Dellinger et al. (2024, 2025), avec des comparaisons à la modélisation 2D dans les travaux de Dellinger et al. (2024, 2025) et Li et al. (2024). La capacité de la modélisation 2D à reproduire les inondations urbaines en régime instationnaire a également été évaluée (Dewals et al 2023). Le couplage modélisation hydraulique / modèle d'estimation de dommage a également été fait par Nortés Martinez et al (2023, 2024). L'exposition au risque d'inondation et les victimes associées (notamment à Nîmes) ont été étudiés par Vinet et al (2022) et Monteil et al (2022).

### **Illustration**



Modélisation expérimentale d'une inondation dans un réseau de rues (thèse de Mejia 2022)

### **Information factuelle**

Le projet collaboratif DEUFI a commencé le 1<sup>er</sup> janvier 2019 et a duré 55 mois. Il a été coordonné par A. Paquier puis S. Proust. Il a associé 9 partenaires publics (UR RiverLy, CEREMA,

LAGAM, UMR GEAU, INSA, ICUBE, HSM, KICT, ULiège) et un partenaire privé (Artelia) Il a reçu une aide de l'ANR de 629 000 euros pour un coût global de plus de 2 200 000 euros.

## **B.2 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN ANGLAIS**

### **DEUFI project: more information on the impact of urban flooding, taking into account water exchanges between streets and building**

#### **Project objectives :**

Although urban flooding is widely studied, exchange flows between streets and buildings are poorly documented in the laboratory and in the field. The DEUFI project fills this gap by focusing on flooding at the individual scale, integrating the understanding of hydraulic processes inside and outside a building, and assessing how this knowledge can be useful for estimating damage and casualties. The DEUFI project proposes improved urban flood simulation methods capable of (i) estimating water intrusion into built-up areas, (ii) assessing the spatial distribution of human exposure and property damage, and (iii) defining recommendations on the best urban flood management methods to implement in relation to citizens' perceptions and attitudes during heavy (relatively short-lived) floods.

In order to examine the influence of openings on flows in building blocks and along streets, three scales are studied: the façade (including one or more openings), the block (built-up area surrounded by streets and including one or more buildings) and the neighborhood (including several streets and numerous blocks). The information provided at one of these scales can be used to estimate the level of risk and make flood risk management decisions on an individual or collective scale. At the façade scale, the calculation of flow through openings is central, as it is the first step in estimating the influence of street/building exchanges on urban flooding. At the block scale, the difference between the hazard inside and outside the building is highlighted particularly for damage estimation, but the opening also creates a disturbance in the flood hazard in the street, which can be important for safety estimation. At the neighborhood scale, we study flow propagation and its uncertainty due to exchanges between streets and buildings, but also due to other factors (e.g. influence of boundary conditions); flood management strategy must be built on results at this scale.

#### **Methods and technologies:**

The DEUFI project is structured into three tasks combining hydraulics, damage estimation and citizen approaches: laboratory experiments (WP1), field cases (WP2) and hydrodynamic models (WP3). WP1 brings together three sets of laboratory experiments dealing with urban flow structures at facade, block and neighborhood scales respectively. WP2 focuses on two case studies, with the aim of applying the methods developed to real-life configurations that differ in terms of geographical environment (flood origin, street slopes, etc.). WP2 brings together the development of tools (software, database, etc.) at field scale and the application of these tools to the two field cases in order to assess their relevance to local stakeholders. WP3 develops hydrodynamic models that enable us to move from the laboratory scale to the field scale, validates these models against the results of WP1 and compares their effectiveness in producing results on the field cases that are useful for local stakeholders. The DEUFI project brings together seven French partners with expertise in hydraulics, economics, geography, sociology, hydrology, applied mathematics and computer science, as well as two foreign teams engaged in research on similar subjects in their own countries.

#### **Main results**

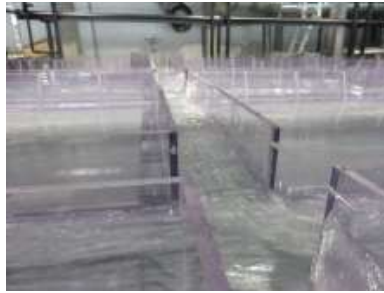
Experiments carried out at INSA Lyon showed: (1) the strong influence of obstacles in front of openings on the exchange rate between the street and the building (decrease or increase of the

order of 100%); (2) that there is no analytical formula that can accurately predict the intrusion rate into buildings. Experiments carried out at INRAE have shown that the porosity of the walls of a building block can modify the height of water in streets by around 10% and velocities by around 70%. The effect of porosity distribution is also significant, but less so than that of porosity value. Finally, in the unsteady regime, the block's storage capacity can cushion maximum heights and velocities by around 10%. The steady-state experiments carried out at ICUBE made it possible to study the influence of total upstream flow, the distribution of this flow between upstream streets, downstream boundary conditions, and the planar porosity of the block, on outflows downstream of the block. Under unsteady conditions, the deformation of a triangular hydrograph across the district was studied for variable hydrograph parameters (rise and fall times, peak value, etc.). Tests on the automatic identification chain for facade openings were conclusive. The methodology, including the application for field photography, was validated in Nîmes and Oullins, in neighborhoods with different urban organization. Surveys of the population and risk managers showed that in Oullins, the population had been reassured by the recent recalibration of the Yzeron watercourse, and that risk awareness was low for rare and major floods. Work has therefore focused on building fine-scale impact scenarios for Q100 to Q500 floods, which will be useful to local risk managers. In the case of Nîmes, the focus is on human safety. The buildings in the Richelieu district are not suitable for human safety. Mortality data prior to the diagnosis of human safety in the Richelieu district were consolidated and used to model human vulnerability. 3D hydraulic modeling was used to redefine the exchange laws at building openings, in response to the difficulty of estimating flows using conventional structure laws or 2D modeling. A street-building exchange algorithm has been developed in the Flood1D2D software. The use of such a hydraulic model makes it possible to estimate domestic damage by taking into account the hazard in the building (instead of the street).

### **Scientific output**

The experimental results have led to reference papers on the impact of flooding at street scale (Mignot et al., 2020), block scale (Mejia et al., 2021; 2023; Dewals et al 2023) and at neighborhood scale (Finaud-Guyot et al. 2020, Seong et al 2020, Guiot et al, in prep.) presenting the main findings of this work and introducing the corresponding databases which are (Mignot 2022; Mejia et al 2022, 2023) or will be (Dellinger et al, in prep) accessible on <https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/> for future research work. Implementing the various tools on field cases has shown how to achieve detailed flood information and the uncertainty that remains over the results produced in terms of flood risk. The suitability of 2D modeling to model intrusion flows into a building block in the presence of open doors was assessed (Dewals et al 2023). The value of 3D modelling has been explored by Li et al. (2024, 2025) and Dellinger et al. (2024, 2025), with comparisons to 2D modelling in the work of Dellinger et al. (2024, 2025) and Li et al. (2024). The ability of 2D approach to reproduce urban flooding under unsteady conditions has also been assessed (Dewals et al 2023). The coupling of hydraulic modelling and damage estimation models has also been carried out by Nortes Martinez et al (2023, 2024). Exposure to flood risk and the associated victims (particularly in Nîmes) were studied by Vinet et al (2022) and Monteil et al (2022).

## Illustration



Experimental modeling of flooding in a street network (Mejia 2022 PhD thesis)

### Factual information

The DEUFI collaborative project began on January 1, 2019 and lasted 55 months. It was coordinated by A. Paquier and then S. Proust. It involved 9 public partners (UR RiverLy, CEREMA, LAGAM, UMR GEAU, INSA, ICUBE, HSM, KICT, ULiège) and one private partner (Artelia). It received ANR funding of 629,000 euros for a total cost of over 2,200,000 euros.

## C MEMOIRE SCIENTIFIQUE

**Mémoire scientifique confidentiel** : non

### C.1 RESUME DU MEMOIRE

Bien que les inondations urbaines soient largement étudiées, les débits d'échange entre les rues et les bâtiments sont peu documentés en laboratoire et sur le terrain. Le projet DEUFI comble cette lacune en se focalisant sur l'inondation à l'échelle individuelle intégrant la compréhension des processus hydrauliques à l'intérieur et à l'extérieur d'un bâtiment et en estimant comment cette connaissance peut être utile pour estimer les dommages et le nombre de victimes. Le projet DEUFI propose des méthodes de simulation des inondations urbaines améliorées capables (i) d'estimer l'intrusion d'eau dans les zones bâties, (ii) d'évaluer la répartition spatiale de l'exposition humaine et des dommages matériels et (iii) de définir des recommandations sur les meilleures méthodes de gestion des inondations urbaines à mettre en œuvre en lien avec la perception des citoyens et leur attitude pendant les fortes inondations (de relativement courte durée). Le projet DEUFI est structuré en trois tâches combinant hydraulique, estimation des dommages et approches citoyennes : expériences en laboratoire (WP1), cas de terrain (WP2) et modèles hydrodynamiques (WP3). WP1 regroupe trois ensembles d'expériences de laboratoires qui traitent des structures d'écoulements urbains aux échelles de la façade, du bloc et du quartier respectivement. WP2 se concentre sur deux cas d'étude dans le but d'appliquer les méthodes développées à des configurations réelles qui diffèrent par l'environnement géographique (origine de l'inondation, pentes des rues ...). WP2 regroupe les développements d'outils (logiciels, base de données ...) à l'échelle du terrain et l'application de ces outils aux deux cas de terrain en vue d'évaluer la pertinence pour des porteurs d'enjeux locaux. WP3 développe des modèles hydrodynamiques qui permettent de passer de l'échelle du laboratoire à l'échelle du terrain, valide ces modèles par rapport aux résultats du WP1 et compare leur efficacité à produire des résultats sur les cas de terrain utiles pour les porteurs d'enjeux locaux.

### C.2 ENJEUX ET PROBLEMATIQUE, ETAT DE L'ART

Lors des inondations, l'intrusion d'eau dans les bâtiments (lieux principaux des dommages) s'effectue par l'intérieur (remontée de nappe à travers le sous-sol ou les canalisations), par les ouvertures (portes et fenêtres, etc) ou par infiltration à travers les toits ou les murs. Le facteur



le plus important est souvent l'entrée par les ouvertures dès que l'eau est présente dans la rue. Or, bien que les inondations urbaines soient largement étudiées, les débits d'échange entre les rues et les bâtiments ne sont que peu documentés que ce soit en laboratoire ou sur le terrain ; autrement dit, les bâtiments sont considérés comme non-poreux (e.g. Mignot et al 2006, Neal et al 2009, Ishigaki, 2003; Araud et al., 2014; Finaud-Guyot et al. 2018). Le projet DEUFI comble cette lacune en se focalisant sur l'inondation à l'échelle individuelle intégrant la compréhension des processus hydrauliques à l'intérieur et à l'extérieur d'un bâtiment et en estimant comment cette connaissance peut être utile pour réduire les dommages et les victimes.

### **C.3 APPROCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE**

L'hydrodynamique est étudiée à trois échelles : la façade (comprenant une ou plusieurs ouvertures), le bloc (zone bâtie entourée de rues et incluant un ou plusieurs bâtiments) et le quartier (incluant plusieurs rues et de nombreux blocs). L'information fournie à une de ces échelles permet d'estimer le niveau de risque et de prendre des décisions pour la gestion du risque d'inondation aux échelles individuelle ou collective. Le projet DEUFI aboutit à des méthodes de simulation des inondations urbaines améliorées capables (i) d'estimer l'intrusion d'eau dans les zones bâties, (ii) d'évaluer la répartition spatiale de l'exposition humaine et des dommages matériels et (iii) de proposer des recommandations sur les meilleures méthodes à mettre en œuvre en lien avec la perception des citoyens et leur attitude pendant les fortes inondations de courte durée.

### **C.4 RESULTATS OBTENUS, EXPLOITATION DES RESULTATS ET CONCLUSIONS**

#### **WP1 – Expériences de laboratoire**

- **WP1a - INSA**

La tâche WP1a consistait à mesurer le débit d'intrusion de l'eau depuis la rue inondée vers une zone bâtie (bâtiment ou pâté de maison), notamment lorsque l'ouverture du bâti est endommagée par l'inondation. Les ouvertures testées ont consisté en une fenêtre ouverte, une porte ouverte, un portail avec grille en place et un portail ouvert. Quatre écoulements caractéristiques d'une rue inondée ont été considérés pour chaque ouverture: deux écoulements profonds et deux peu-profonds et deux écoulements rapides et deux lents. La première partie du travail consistait à mesurer le débit d'intrusion d'eau en absence de tout obstacle affectant l'écoulement à proximité de l'ouverture, et surtout d'évaluer la capacité des lois d'ouvrages (prédisant le débit d'intrusion dans le cas d'un seuil latéral) disponibles dans la littérature. Les comparaisons entre prédictions par ces lois et mesures expérimentales ont montré que certaines lois sont très adaptées à un type d'ouverture (telle qu'une porte pour lequel l'ouverture descend jusqu'au sol) quand d'autres sont adaptées à un autre type d'ouverture (telle d'une fenêtre qui est surélevée par rapport au sol). Aucune loi d'ouvrage de la littérature ne donne une satisfaction parfaite pour toutes les configurations testées. La deuxième partie de ce tâche consistait à mesurer l'effet d'obstacles présents dans les rues (arbres, voitures garées, kiosque à journaux...) ou sur le trottoir (panneaux, blocs EDF, etc...) sur le débit d'intrusion pour les configurations d'ouvertures et d'écoulement décrits ci-dessus. Une trentaine de configurations d'obstacles a été testée et les résultats ont montré que ces obstacles peuvent modifier de plus ou moins 100% le débit d'intrusion. Les obstacles qui tendent à réduire le débit d'intrusion sont ceux qui bloquent l'écoulement vers l'ouverture en le déviant vers le centre de la rue; les obstacles qui augmentent le débit d'intrusion sont ceux qui tendent à dévier l'écoulement vers l'ouverture. Un résultat important est que certains obstacles augmentent le débit d'intrusion pour certains écoulements ou ouvertures donnés mais réduisent ce débit pour d'autres configurations. Ces résultats montrent que la prédiction



quantitative du débit d'intrusion de la rue vers le bâti présent un défi majeur pour la simulation des inondations urbaines et que les détails de topographie (obstacles ou autres) ne peuvent être négligés. L'ensemble des travaux de cette sous-tâche ont été valorisés dans Mignot et al (2020) et les données ont été mises en open access (Mignot 2023, [livrable D1a1](#)). Un rapport a été rendu ([livrable D1a2](#)) et une vidéo est disponible ([livrable D1a3](#))

- **WP1b - Riverly, INSA, ULiège, KICT**

Des inondations dans un réseau de rues à l'échelle du bloc de bâti ont été étudiées en utilisant la plateforme de RiverLy, [MURI](#) (Modèle Urbain pour l'étude du Risque d'Inondation). Ce travail a été fait dans le cadre de la thèse de Miguel Mejia (Mejia 2022). La zone d'étude a une taille de 5.40 m sur 3.20 m correspondant à un bloc de bâti (1.56 m x 0.96 m) entouré de quatre rues adjacentes avec deux entrées d'eau et quatre sorties (cf. Fig.1 de Mejia et al 2021). Des ouvertures (représentant des portes ouvertes) ont été créées dans les murs du bloc. Dans un premier temps, le doctorant a évalué (1) l'impact d'une porosité variable du bâti (définie comme le ratio entre le linéaire des ouvertures et le linéaire total d'un mur) sur les hauteurs et vitesses de l'eau dans les rues et à l'intérieur du bloc. Dans un deuxième temps, il a évalué (2) l'impact d'une variation de la distribution de cette porosité, pour une valeur de porosité fixée. Les données de (1) et (2) sont accessibles en open access (Mejia et al 2022, [livrable D1b1](#)). Il s'agit de données de hauteur d'eau, de vitesses de surface et de vitesses moyennées sur la verticale, et de débits d'intrusion dans le bâti, et de débits dans les rues et en sorties de rues. Les résultats de (1) sont publiés dans Mejia et al (2021), et ceux de (2) dans Mejia (2022) et Dewals et al (2023). Il a été montré que la porosité des murs pouvait modifier les hauteurs d'eau et les vitesses dans les rues adjacentes au bloc, en particulier au droit des ouvertures, d'environ 10% et 70%, respectivement. La stabilité des piétons (et le risque de noyade) est donc lui aussi modifié (lié au produit hauteur x vitesse). En revanche, la création d'ouvertures a peu d'influence sur la répartition des débits dans les rues éloignées du bâtiment. De plus, il a été montré que la distribution de la porosité avait un effet important en modifiant les chemins de l'eau, mais que cet effet était moins important que celui de la valeur de la porosité. Dans un troisième temps, M. Mejia a évalué (3) l'impact de la porosité de stockage du bloc de bâti (surface disponible divisée par surface totale) sur l'écroulement des hauteurs et des débits dans les rues lorsqu'un hydrogramme est injecté à l'amont de la ville. Pour cette étude, une rue amont a été supprimée et les seuils aval abaissés (Fig. 3 de Mejia et al 2023a). Les données sont accessibles en open access (Mejia et al 2023b, [livrable D1b2](#)). Les résultats sont publiés dans Mejia et al (2023a). Il a été montré que la capacité de stockage du bloc peut permettre d'écrouler les hauteurs et vitesses maximales dans les rues de l'ordre de 10%. De plus, le pic de crue est amorti d'autant plus que la montée de l'eau est rapide et que le bloc a une faible densité de bâti.

A l'ULiège, des inondations urbaines ont également été étudiées en laboratoire dans le cadre de la thèse de Xuefang Li (Li et al, 2022, 2021a, 2021b, 2020). L'attention a été portée sur les modèles physiques distordus, souvent utilisés pour l'étude des inondations urbaines en laboratoire en raison du caractère multi-échelle de ce type de phénomène. Le biais potentiellement induit par la distorsion géométrique n'a jamais été étudié de manière systématique sur base d'expériences de laboratoire dédiées. Pour répondre à cette problématique, l'ULiège a dans un premier temps réalisé une étude préliminaire de ces biais sur base d'une ré-analyse de deux jeux de données expérimentales récentes liées aux inondations urbaines. Ensuite, en combinant modélisation numérique bidimensionnelle et expérimentations en laboratoire, l'ULiège a fourni une première quantification systématique de ce biais dans le cas d'un quartier urbain synthétique, faisant intervenir des modèles à trois échelles horizontales, sur base de trois configurations géométriques différentes et une gamme de scénarios d'inondation. Les résultats indiquent la direction et l'amplitude du biais induit

par la distorsion géométrique pour une large gamme de cas d'écoulement, ce qui s'avère précieux pour compenser ces effets dans les études pratiques d'inondations urbaines en laboratoire.

Au KICT, un dispositif expérimental où un plan similaire à MURI a été mis en place, l'influence de la pluie sur l'inondation a été testée, mettant en lumière une localisation différente de l'aléa le plus fort.

- **WP1c – ICUBE, HSM, KICT**

Les travaux menés par le laboratoire ICube ont comporté un volet expérimental (WP1c). L'objectif principal des travaux expérimentaux était d'étudier la physique des écoulements en cas d'inondations dans un réseau de rues à l'échelle du quartier. Une première partie des expérimentations a été réalisée en régime stationnaire. Ainsi, dans un premier temps, la répartition des débits au sein du pilote a été étudiée. Puis, des mesures ont été réalisées pour déterminer l'évolution spatiale des hauteurs d'eau au sein du réseau de rues. Enfin, l'influence de la porosité des blocs sur la répartition des débits a été étudiée. La seconde partie des mesures expérimentales a été réalisée en régime instationnaire. Dans cette étude, l'attention s'est portée sur la déformation de l'hydrogramme de crue induite par son transit dans le pilote. Ainsi, l'influence des caractéristiques de l'hydrogramme d'entrée sur la forme de l'hydrogramme de sortie a été étudiée. Une description complète des résultats expérimentaux ainsi que les analyses se trouvent dans le rapport D1c4. Les données expérimentales (livrables D1c1, D1c2 et D1c3) seront mises en open access après parution des articles de Guiot et al (in prep.) et Dellinger et al (in prep.).

Les travaux menés par le KICT ont consisté à reproduire la géométrie du modèle RiverLy (16 blocs de bâti) en rajoutant des toits aux blocs, un simulateur de pluie, et une alimentation en amont due à un débordement de rivière. L'importance de la pluie et l'importance du débordement en amont ont été modifiés. Les résultats sont présentés dans le nouveau livrable D1c5.

## **WP2 – Études de terrain**

- **WP2a et WP2b – Riverly, G-EAU, LAGAM**

Grâce à l'aide des services techniques en charge de la gestion des inondations, de nombreuses données ont pu être obtenues sur les deux cas de terrain (WP2a et WP2b) ; en particulier, une topographie récente a permis de bâtir des modèles hydrodynamiques actualisés qui ont servi de base pour les cartes fournies pour différents scénarios d'inondation. Les données des livrables D2a1 et D2b1 sont confidentielles.

- **WP2c – CEREMA**

Méthode : Une méthodologie d'identification automatique des ouvertures pour les inondations urbaines a été développée. Elle combine deux techniques : la photogrammétrie et la reconnaissance d'images. La photogrammétrie est basée sur le principe de « slicing » qui est une méthode pour trouver les ouvertures à partir d'un évidement dans le plan principal correspondant au plan de la façade. La détection des ouvertures par « slicing » se fait en analysant les trous présents dans le plan principal obtenu. La reconnaissance d'image est quant à elle basée sur l'apprentissage profond qui utilise des algorithmes d'intelligence artificielle tels que RCNN. Une fois entraîné, l'algorithme détecte plusieurs types d'ouverture et fonctionne donc par classification pour identifier les fenêtres, les volets, les soupiraux, les portes, les portes de garage ou encore les fenêtres coulissantes. La dernière étape nommée analyse croisée consiste à comparer les résultats des deux méthodes pour attribuer un score de confiance compris entre 0 et 1 en fonction des résultats des deux méthodes et des règles architecturales. Les données proviennent de vidéos de rue qui, comme Google Street View, ont été collectées sur le terrain par les partenaires du projet. Le flux de travail du traitement

numérique et les détails de chaque tâche sont discutés. Les résultats du traitement avec l'interface dédiée de l'application développée fournissent les conclusions ci-dessous.

**Résultats :** Parmi 210 bâtiments sélectionnés à Nîmes, le taux moyen de détection des ouvertures est de 90 % avec les méthodes combinées de « slicing » et d'apprentissage profond. L'identification des types d'ouverture a un taux de réussite de 80 %. Le taux de détection des ouvertures passe de 90 % à 72 % avec l'utilisation de l'analyse croisée. Nous en déduisons des règles architecturales types pour les soupiraux, les fenêtres et les portes. Pour les soupiraux, la largeur et la hauteur sont d'environ 0,5 m. L'allège est d'environ 0,5 m. Pour les fenêtres, la largeur est d'environ 1,2 m et la hauteur d'environ 2 m. L'allège mesure environ 1 m. Pour les portes, la largeur est d'environ 1,2 m et la hauteur d'environ 3 m. Le seuil est environ 0,1 m au-dessus du terrain naturel mais peut être plus haut lorsqu'il y a plusieurs marches. La dispersion est petite sur la position du seuil de la porte (15 cm environ) en comparaison avec l'écart type sur l'allège des fenêtres et soupiraux (30 cm environ). Pour les fenêtres et les portes, il existe une corrélation entre la largeur et la hauteur. Il n'y a pas de corrélation entre le niveau du sol et le seuil, malheureusement pour les dommages en cas d'inondation. Les applications hydrauliques en cas de ruissellement homogène montrent que l'eau passe majoritairement par les portes jusqu'à 1 m mais la contribution des fenêtres dépasse rapidement celle des portes. La contribution des soupiraux n'est également pas négligeable. L'hypothèse de zone d'accumulation donne le même type de conclusions mais le phénomène est moins fort car le remplissage des ouvertures n'est pas aussi simultané que dans la première hypothèse. Les ouvertures sont dans l'eau successivement et plus progressivement. Le cas d'Oullins a fourni une base de données plus petite que celle de Nîmes. Il présente l'avantage par rapport au cas de Nîmes de contenir de nombreux bâtiments avec des fenêtres entourées de volets comme dans la phase d'apprentissage sur la ville de Compiègne. En revanche, la présence de zones pavillonnaires rend l'identification difficile avec des ouvrants qui sont parfois cachés derrière la clôture. L'ensemble des résultats est présenté dans le rapport d2c2 et des exemples de résultats du logiciel sont montrés dans le livrable D2c3. Le livrable d2C1 a été abandonné.

- **WP2d – UMR G-EAU, HSM**

Les travaux menés dans le cadre du WP2d ont été réalisés à deux échelles différentes : « quartier » et « bâtiment ». Pour chaque échelle, un couplage a été réalisé entre des modèles hydrauliques et économiques pour évaluer l'influence de la prise en compte des ouvertures dans l'évaluation monétaire des dommages causés par les inondations. À l'échelle du « quartier », les modèles couplés ont été testés sur les deux terrains d'étude du projet : Richelieu (Nîmes) et Oullins. Le principe retenu a été de comparer pour des scénarios d'inondation donnés, une estimation dite de référence (sans échange rue-bâtiment) avec une estimation avec prise en compte des échanges. À Nîmes, les estimations ont toutes été réalisées pour l'événement correspondant à celui de 1988. Les estimations avec prise en compte des échanges, ont été réalisées avec différentes configurations pour les ouvertures (ouvertes, fermées, protégées par des batardeaux). Les résultats montrent que la prise en compte des ouvertures fait baisser l'estimation des dommages de 12 % (configuration ouverte) à 15 % (configuration fermée). À Oullins deux événements de crue ont été analysés (Q50 et Q100). La prise en compte des ouvertures diminue l'estimation des dommages de 20 % (crue centennale) à 40 % (crue à période de retour de 50 ans). En conclusion, la prise en compte des ouvertures amène systématiquement à une diminution de l'estimation des dommages, mais l'ampleur de cette diminution dépend du cas d'étude et de l'événement étudié. À l'échelle du « bâtiment », le travail de couplage a impliqué un travail plus conséquent pour intégrer une composante hydraulique au sein de l'outil **floodam.building** qui permet de générer des fonctions de dommage. Il s'est agi de construire un modèle hydraulique simplifié permettant de tenir compte des échanges entre l'intérieur et l'extérieur et entre les différentes pièces intérieures au

travers des différentes ouvertures présentes. Pour tenir compte des résultats de cette composante hydraulique, **floodam.building** a été adapté pour construire des fonctions de dommage partielles à l'échelle des pièces d'un bâtiment. Ce modèle a été testé sur deux bâtiments archétypiques dits en T (la pièce d'entrée distribuant l'accès à trois aux pièces) ou en I (les 4 pièces étant en enfilade, celle d'entrée étant la première). Ces tests ont permis de montrer que la distribution des pièces n'avait qu'une faible importance, au contraire de la face d'exposition aux inondations du bâtiment. Pour des durées d'inondation supérieures à 12h, l'état des ouvertures (ouvert ou fermé) n'est pas déterminant. Pour ces durées supérieures à 12h, les estimations sont très proches de celles avec une hauteur d'eau uniforme égale au maximum atteint lors de l'événement. Pour les durées d'inondation inférieures à 12 h, les estimations s'écartent sensiblement des estimations avec hauteur uniforme, et cet écart est d'autant plus visible pour les ouvertures dans l'état fermé. Ces résultats semblent prometteurs pour des estimations de dommage dans le contexte spécifique du ruissellement où les durées des événements peuvent être très courts et où la face d'exposition d'un bâtiment fait sens. Les résultats sont rassemblés dans les rapports D2d1 et D2d2, dans Nortes Martinez et al. (2022, 2023, 2024).

- **WP2e - LAGAM : Besoins et perception de la population**

La tâche WP2e était consacrée à l'identification des besoins de la population et des acteurs locaux face aux inondations urbaines. La démarche s'est appuyée sur des entretiens auprès des gestionnaires du risque sur les données existantes du programme Nîm'ALABRI, mené depuis 2015 par l'entreprise Mayane sous la maîtrise d'ouvrage de la municipalité de Nîmes<sup>1</sup>. Mayane a réalisé plus de 1700 diagnostics dans la ville de Nîmes, avec des résultats convaincants sur l'implication des propriétaires (livrable D2e1). Le traitement statistique des données d'enquêtes et l'analyse des entretiens ont montré un quartier Richelieu (Nîmes) au bilan vulnérabilités/capacités plutôt défavorable. Au crédit de la résilience capacitaire du quartier, on peut citer la présence d'un « noyau dur » de personnes, habitant le quartier depuis longtemps, ayant vécu les inondations de 1988 et les suivantes. Ce « noyau dur » de personnes sensibilisées au risque décroît avec le renouvellement des populations (Monteil et al., 2022, livrable D2e1). La vulnérabilité du quartier se caractérise par :

- un habitat dégradé, ancien (1850-1860) dans sa structure et complexe
- une accessibilité des logements contrariée par la structure de l'habitat en cours intérieures.

D'ailleurs l'enquête préalable à l'OPAH a signalé la présence d'une quarantaine de « souricières » logement de plain-pied sans possibilité d'évacuation ou de refuge par le haut (pas de terrasse ou balcon, pas d'hélicoptère possible). Les logements de petite taille attirent une population « de passage » comme des jeunes couples, des travailleurs isolés ou des personnes âgées. Ce qui est peu propice au maintien de la culture du risque. Malgré la démarche proactive des autorités locales en matière de prévention du risque, la préparation à la gestion de crise rencontre des obstacles. La communication sur le risque doit s'accompagner d'une information sur les moyens de le réduire. LE WP2e comportait la livraison d'outils de communication intégrant les conclusions des enquêtes auprès de la population et des gestionnaires. Cinq fiches d'information (22 pages) ont été établies (format pdf) et mises à la disposition des gestionnaires locaux. (livrable D2e2 « new communication devices ») Elles s'accompagnent d'un support numérique ESRI online pour chaque terrain : une storymap sur Oullins et une storymap sur le cas d'étude de Nîmes. StoryMap Nîmes : <https://arcg.is/C5DaS>

- **WP2f - LAGAM : Estimation de l'exposition humaine**

OULLINS : L'objectif de cette sous-tâche était de mesurer l'exposition humaine au risque d'inondation et d'évaluer le danger de perte de vie dans les blocs de construction sur les

---

<sup>1</sup> Les données appartiennent à la municipalité de Nîmes qui les a mises à disposition du projet DEUFI.

terrains d'Oullins et de Nîmes. Ce type d'évaluation vient en appui aux politiques publiques de prévention des risques et de planification de gestion de crise prises en charge par les acteurs locaux de la gestion de crise. La tâche a consisté à récolter des informations sur le terrain d'étude afin de mesurer l'exposition des habitants à un danger de perte de vie potentiel. Les facteurs de mise en danger de la vie des habitants ont été testés dans les bâtiments uniquement (décès dans la rue exclus). Ces facteurs ont été déterminés à partir de la littérature et à partir des données de la base Vict-In qui collecte les décès liés aux inondations dans le sud de la France depuis 1980 (Vinet et al., 2022). A Oullins, la méthode combine les caractéristiques de l'aléa d'une part et d'autre part les caractéristiques du bâti et le potentiel danger qu'elles représentent pour la vie humaine (absence d'étage refuge, présence de cave...) Les méthodes et les résultats sont détaillés dans le rapport D2f3 -D2f4 « rapport sur la caractérisation de la vulnérabilité humaine face aux crues en zone urbaine ». Les sorties de modèle hydraulique ont été croisées avec les données de caractérisation du bâti déterminées par enquête de terrain estimer le nombre de personnes présentes en zone inondables et le nombre de personnes potentiellement en danger. Quatre scénarios ont été testés : Q50 nuit, Q50 jour, Q100 nuit et Q100 jour. Les résultats montrent une commune d'Oullins peu touchée par une crue de niveau Q50. En revanche les niveaux de danger atteignent des valeurs proches de la mise en péril de la vie humaine (vitesse d'eau, hauteur d'eau dans les bâtiments sans refuge et/ou isolé avec des populations vulnérables, etc) surtout en scénario de crue nocturne Q100 sans alerte ni évacuation et ce en rive gauche dans les quartiers de l'Yzeronne et en rive droite près du pont d'Oullins. Le Système d'information géographique (SIG) développé sur Oullins a été communiqué au SAGYRC. Il permet outre les scénarios exposés ci-dessus d'éditer des fiches pour chaque habitation ou ERP en zone inondable. Une storymap hébergée par ERSI ArcGIS online présente les résultats et le système de cartographie interactive lié au SIG à Oullins : <https://arcgis.is/qyG0O0>

**NIMES :** Sur Nîmes l'enquête part des plans de logement fournis par le programme Nim'ALABRI et par le cabinet Urbanis chargé de l'étude préalable de l'OPAH Richelieu. A partir de la disposition des logements et de la modélisation hydraulique à l'intérieur, des hypothèses ont été appliquées afin de déterminer le niveau de danger auquel sont exposées les occupants (voir travaux du WP2d).

## **WP3 – Simulations numériques**

- **WP3a - ICUBE**

Le travail d'ICUBE a porté sur la modélisation numérique 2D et 3D des écoulements au sein du dispositif expérimental d'ICUBE. Pour ce faire, deux codes de calcul bidimensionnels (Telemac2D et DassFlow) et un code tridimensionnel (OpenFOAM) ont été utilisés. Les données produites lors des expérimentations présentées au WP1c ont été utilisées pour tester la capacité de ces modèles numériques à reproduire les écoulements en cas d'inondation urbaine. Tout d'abord, les performances de ces modèles ont été testées en régime stationnaire. Ainsi, la capacité des modèles à reproduire les débits et les hauteurs d'eau au sein du quartier a été étudiée. Dans un second temps, les modèles numériques ont été testés en régime transitoire. Dans ce cas, des hauteurs d'eau mesurées localement et expérimentalement ont tout d'abord été confrontées à celles obtenus par modélisations numériques. Puis, les hydrogrammes de sortie obtenus par expérimentations et simulations ont été comparés. L'ensemble de ces résultats et les analyses sont présentés dans le rapport D3a1-ICUBE et ont été valorisés dans Dellinger et al. (2024, 2025).

- **WP3a - ULiège, RiverLy, INSA**

L'ULiège a contribué à de la modélisation numérique d'écoulements étudiés sur le pilote de laboratoire MURI de RiverLy. Afin de vérifier si les inondations urbaines peuvent être modélisées à l'aide d'outils numériques opérationnels, l'ULiège a analysé pour la première fois la capacité de modèles de type équations des eaux peu profondes (SWE) en 2D à reproduire les motifs d'écoulement à l'intérieur et autour de blocs urbains avec des ouvertures, c'est-à-dire impliquant des échanges d'écoulement entre les flux dans les rues et à l'intérieur des blocs urbains (par exemple, à travers des allées menant à des cours ou à travers des fenêtres ou des portes brisées). Les expériences en laboratoire idéalisées de M. Mejia (Mejia et al, 2021, 2022, 2023a, 2023b) ont été simulées à l'aide de deux modèles numériques académiques (Rubar 20 de RiverLy et WOLF d'ULiège), dont la différence la plus notable réside dans la paramétrisation de la viscosité turbulente. Treize configurations urbaines ont été considérées en régime permanent et cinq en transitoire. Le travail collaboratif entre l'ULiège, INRAE et le LMFA a été valorisé dans Dewals et al. (2023), nouveau livrable D3a3. Les simulations 3D et 2D de l'université de Liège sont également comparées aux résultats expérimentaux dans Li et al. (2024, 2025).

- **WP3a - ARTELIA**

L'approche de modélisation numérique tridimensionnelle d'inondation urbaine est toujours peu répandue. Ce constat est notamment lié aux moyens informatiques nécessaires pour modéliser ce type d'écoulement à l'échelle d'un quartier ou d'une ville. Pour ses études d'ingénierie, Artelia exploite couramment des modélisations bidimensionnelles (par exemple sur un linéaire de plusieurs centaines de kilomètres en incluant la traversée de Paris). Par rapport au niveau de détail que le projet DEUFI a voulu aborder, ces approches courantes sont toutefois limitées. Les ouvertures dans les façades, le mobilier urbain, les véhicules dans les rues ne peuvent être parfaitement appréhendés que par l'approche tridimensionnelle. En s'appuyant sur les données de la plateforme MURI (Mejia et al, 2021, 2022, 2023a, 2023b), deux approches de modélisation tridimensionnelle ont été validées. La première utilise la méthode classique des volumes finis alors que la deuxième (méthode SPH – Smoothed-Particle Hydrodynamics) s'affranchit d'un maillage. Différentes reproductions des configurations des écoulements ont été validées, avec des écarts sur les débits de l'ordre de 5% avec le modèle physique, en faisant varier la porosité du bâti et pour des conditions stationnaires ou instationnaires. Les résultats obtenus permettent de valider l'approche numérique qui permet de compléter l'expérimentation physique par l'analyse de nouvelles variables (par exemple la viscosité turbulente) ou de zones non instrumentées (à la proximité du fond, le long de la colonne d'eau, ou encore à proximité des parois...). L'intérêt de l'approche SPH est la possibilité de modéliser rapidement des objets mobiles en interaction avec l'écoulement, ouverture de porte, déplacement de mobilier urbain... Cependant cette approche a montré ses limites par l'utilisation d'une taille unique de particule sur l'ensemble du domaine, obligeant à considérer des particules très « petites » pour l'obtention d'une bonne estimation des niveaux d'eau. Les résultats de cette étude sont détaillés dans le livrable D3a1 – ARTELIA (chapitre 1). La faisabilité de la modélisation tridimensionnelle d'un quartier a été testée sur le site pilote de Nîmes (livrable D3a1 – ARTELIA (chapitre 2)). La construction du modèle sur la base d'image Lidar demande un traitement particulier pour supprimer le houppier des arbres ou des véhicules. La modélisation réalisée montre la faisabilité mais aussi les limites de l'approche tridimensionnelle. Les résultats obtenus sont similaires aux modèles plus simples, mais ils peuvent intégrer les passages sous immeubles (coursives) ou des écoulements en charge (à travers les ouvertures de façades) plus facilement. La contrepartie est un volume de données et de résultats important et un temps de simulation qui limite les calculs à la représentativité des événements brefs.



- **WP3a, 3b, 3d – HSM**

Les travaux conduits au sein du laboratoire HydroSciences Montpellier (UMR 5151) ont visé à proposer une méthodologie de modélisation des inondations urbaines permettant d'intégrer l'effet des échanges rue-bâti. En effet, la littérature indique que ces échanges pourraient être responsables (i) de modification des zones inondables par rapport à une modélisation classique, (ii) d'atténuation des pics de débit et de hauteur dans les rues et (iii) de connexions supplémentaires (l'eau pouvant traverser des bâtiments classiquement représentés comme étanches). Les travaux conduits à HydroSciences Montpellier dans le cadre de la thèse de Cécile Choley (soutenance prévue à la fin de l'année 2023) visent à évaluer, par la modélisation, si la prise en compte des échanges rue-bâti induit des modifications significatives des grandeurs caractérisant les inondations (principalement hauteur et champs de vitesse). Pour cela, un modèle d'écoulement en réseau de rues intégrant ces échanges est développé puis comparé à des approches classiques dans différentes configurations. Le modèle développé représente l'écoulement dans le réseau de rues avec une approche *shallow water 2D* et la dynamique dans chaque bâtiment à travers une loi de conservation de la masse. Les débits d'échange entre une maille de rue et un bâtiment (ou entre 2 bâtiments) sont déterminés à partir d'une loi d'ouvrage. La loi d'ouvrage employée utilise la formulation des lois de seuil et d'orifice. La limite entre ces lois et les coefficients de débits sont recalés sur la base d'environ 30 simulations 3D réalisées avec le logiciel OpenFoam. La loi développée permet de reproduire le débit simulé entre la rue et le bâtiment avec une erreur maximale de 30 %. Le nouveau modèle a été implémenté dans le code de calcul sw2d (<https://sw2d.inria.fr/>) et validé sur plusieurs dizaines de cas test analytiques. Le nouveau modèle est comparé à une approche de modélisation 2D classique excluant les bâtiments sur une configuration simplifiée. Prise en compte des échanges rue-bâti induit une réduction de 30 % du débit de pointe circulant dans la rue (avec un retard d'environ 0,5s / m) et de 18 % des hauteurs maximales (avec un retard de 1,25s / m). Cette comparaison a également été réalisée sur la géométrie du quartier Richelieu à Nîmes. Pour une inondation proche de celle de 1988 (avec une période de retour estimée entre 150 et 250 ans), la prise en compte des échanges rue-bâti induit des écarts significatifs sur la hauteur maximale atteinte dans la rue (de -40 à +60cm) montrant également une modification de la répartition des écoulements dans la zone modélisée. Une analyse de sensibilité sur le coefficient de débit (calé avec une précision de 30%) montre que cette incertitude n'influence pas significativement les caractéristiques maximales de l'inondation ce qui conduit à une cartographie des aléas et une estimation des dommages quasi-indépendantes de ce paramètre. Différents scénarios sont également comparés : prise en compte des caves et de l'ouverture (ou non) des ouvrants. Ils permettent de montrer la précision requise dans les données en fonction de l'étude envisagée. Enfin, la représentation des batardeaux devant l'ensemble des portes met en évidence un effet de protection pour de faible période de retour mais montre également des aggravations de l'aléa dans certaines rues par rapport à une configuration sans batardeau. Ainsi, l'emploi de ces dispositifs à grande échelle peut être à relativiser en induisant potentiellement des risques supplémentaires pour certains bâtiments. Les travaux conduits ont ainsi permis de développer un code de calcul prenant en compte les échanges rue-bâti lors d'une inondation. Cet outil de modélisation permet d'accéder à des informations nouvelles notamment sur la dynamique dans les bâtiments. Ces données permettent d'affiner l'estimation des dommages mais peuvent également être employées pour mettre en place un modèle d'évacuabilité des personnes. Une partie de ces travaux est présentée dans Choley et al (2021), et le reste sera détaillé dans les rapports D3a2, D3b1 et D3b2, dont la livraison est prévue pour fin 2023, et dans le manuscrit de thèse de C. Choley (Choley 2023).

- **WP3d – RiverLy, KICT**

Sur la topographie antérieure aux travaux sur l'Yzeron, les simulations menées grâce au logiciel KICT-UF montrent des différences notables par rapport à celles menées avec le logiciel Rubar 20 de RiverLy, différences qui semblent liées au maillage. Sur Nîmes, l'étude en



géométrie actuelle s'est focalisée sur la partie centrale du quartier Richelieu afin de tester différentes représentations des échanges rues-bâti dans le cas d'un habita dense. Les résultats des simulations avec le code KICT-UF sont présentés dans le nouveau livrable D3d3.

## C.5 REFERENCES

- **Externes au projet**

Mignot, E., Paquier, A., & Haider, S. (2006). Modeling floods in a dense urban area using 2d shallow water equations. *Journal of Hydrology*, 327(1), 186–199.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.11.026>

Neal, J. C., Bates, P. D., Fewtrell, T. J., Hunter, N. M., Wilson, M. D., & Horritt, M. S. (2009). Distributed whole city water level measurements from the Carlisle 2005 urban flood event and comparison with hydraulic model simulations. *Journal of Hydrology*, 368(1), 42–55.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.01.026>

Ishigaki, T., 2003. Hydraulic model tests of inundation in urban area with underground space. In: Proc. of 30th IAHR Congress, Greece, 2003, pp. 487–493.

Araud, Q., Finaud-Guyot, P., Lawniczak, F., François, P., Vazquez, J., Mos'e, R., 2014.

Modeling flood in an urban area: validation of numerical tools against experimental data. In: Gourbesville, P., Cunge, J., Caignaert, G. (Eds.), *Advances in Hydroinformatics: SIMHYDRO 2012*, pp. 207–220. [https://doi.org/10.1007/978-981-4451-42-0\\_18](https://doi.org/10.1007/978-981-4451-42-0_18).

Finaud-Guyot, P., Garambois, P.A., Araud, Q., Lawniczak, F., François, P., Vazquez, J., Mos'e, R., 2018. Experimental insight for flood flow repartition in urban areas. *Urban Water Journal* 15, 242–250. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2018.1433861>

- **Internes au projet**

Voir section E.2.

## D LISTE DES LIVRABLES

Date de livraison	N°	Titre	Nature (rapport, logiciel, prototype, données, ...)	Partenaires* (souligner le responsable)	Commentaires
2019T3	D01	consortium agreement	document	Tous (P1)	Intégration au projet d'Hydrosiences Montpellier
2020T2	D02	intermediate report	rapport	Tous (P1)	
2023T2	D03	final report	rapport	Tous (P1)	The present report
2019T3	D1a1	sets of exchange discharge data	données	P7,P1,P6,P9	<a href="https://doi.org/10.57745/3ZYYV9">https://doi.org/10.57745/3ZYYV9</a>
2019T3	D1a2	catalogue of intrusion stage-discharge relationships	rapport	P7	
2019T3	D1a3	videos of experiments	données	P7	<a href="https://youtu.be/-tvz3C3j7qM">https://youtu.be/-tvz3C3j7qM</a>
2022T1	D1b1	sets of experimental data	données	P1,P7,P8,P9	2 sets : 1 for a variable conveyance porosity; 1 for a variable conveyance porosity distribution

Date de livraison	N°	Titre	Nature (rapport, logiciel, prototype, données, ...)	Partenaires* (souligner le responsable)	Commentaires
		(velocity and water depth) for conveyance porosity effects			<a href="https://doi.org/10.57745/UJOCJ8">https://doi.org/10.57745/UJOCJ8</a>
2023T1	D1b2	sets of experimental data (velocity and water depth) for storage porosity effects	données	P1,P7,P8,P9	2 sets : 1 for steady flows, 1 for unsteady flows conveyance porosity effects <a href="https://doi.org/10.57745/BFHGO3">https://doi.org/10.57745/BFHGO3</a>
2024T3	D1c1	sets of experimental data (discharge and water depth in streets) in steady state	données	P6	The data set will be uploaded on <a href="https://entrepot.recherche.data.gouv.fr">https://entrepot.recherche.data.gouv.fr</a> Once the related paper is published
2024T3	D1c2	sets of experimental data (hydrograph, water level) in transient configurations	données	P6	The data set will be uploaded on <a href="https://entrepot.recherche.data.gouv.fr">https://entrepot.recherche.data.gouv.fr</a> Once the related paper is published
2024T3	D1c3	patterns of disturbances due to openings	données	P6,P7,P1,P10	The data set will be uploaded on <a href="https://entrepot.recherche.data.gouv.fr">https://entrepot.recherche.data.gouv.fr</a> Once the related paper is published
2023T2	D1c4	Etude expérimentale des écoulements dans le pilote inondation du laboratoire ICube en régime stationnaire et instationnaire	rapport	P6	Nouveau livrable
2023T2	D1c5	Inundation features in an Idealized Urban Area Model due to Variation of River-Overflow and Precipitation	rapport	P8	Nouveau livrable
2020T3	D2a1	data collection about Nîmes field case	données	P5, P1,P4	Données de base confidentielles
2020T3	D2b1	data collection about Oullins field case	données	P1, P5	Données de base confidentielles
2019T2	D2a2	workshop with local actors (Nîmes)	réunion	P5, P1	
2019T2	D2a3	workshop with local actors (Nîmes)	réunion	P5, P1	
2019T2	D2b2	workshop with local actors (Oullins)	réunion	P5, P1	

Date de livraison	N°	Titre	Nature (rapport, logiciel, prototype, données, ...)	Partenaires* (souligner le responsable)	Commentaires
2020T1	D2b3	workshop with local actors (Oullins)	réunion	P5, P1	
2020T2	D2c1	literature about Image-based facade modelling	rapport	P3	Livrable abandonné
2023T2	D2c2	experimentation of automatic identification	rapport	P3,P1,P4,P5	
2023T2	D2c3	final implementation of automatic identification	logiciel	P3	On présente dans le livrable des exemples de traitement des ouvertures par le logiciel. Le développement du logiciel n'est pas assez finalisé pour qu'il puisse être diffusé
2023T2	D2d1	methodology for damage assessment based on interior flood characteristics (FLOODAM)	rapport	P4,P10	
2023T2	D2d2	application to both field cases studies and analysis of pertinence.	rapport	P4,P1,P2,P5	
2023T2	D2e	Population needs and perception	rapport	P5	Nouveau livrable
2023T2	D2e1	data base on population needs and perception of floods in urban context	données	P5	<a href="https://upvdrive.univ-montp3.fr/s/X7X86QejJHrLJZk">https://upvdrive.univ-montp3.fr/s/X7X86QejJHrLJZk</a>
2023T2	D2e2	new communication devices for end users	rapport	P5, P2, P4,P8,P9	<a href="https://upvdrive.univ-montp3.fr/s/X7X86QejJHrLJZk">https://upvdrive.univ-montp3.fr/s/X7X86QejJHrLJZk</a>
2023T2	D2f1	GIS database on human exposure criteria	données	P5	<a href="https://upvdrive.univ-montp3.fr/s/X7X86QejJHrLJZk">https://upvdrive.univ-montp3.fr/s/X7X86QejJHrLJZk</a>
2023T2	D2f2	loss of life model	rapport	P5,P1	<a href="https://upvdrive.univ-montp3.fr/s/X7X86QejJHrLJZk">https://upvdrive.univ-montp3.fr/s/X7X86QejJHrLJZk</a>
2023T2	D2f3	Mapping of human exposure on Nîmes case	rapport	P5,P1	<a href="https://upvdrive.univ-montp3.fr/s/X7X86QejJHrLJZk">https://upvdrive.univ-montp3.fr/s/X7X86QejJHrLJZk</a>
2023T2	D2f4	Mapping of human exposure for Oullins case	rapport	P5,P1	<a href="https://upvdrive.univ-montp3.fr/s/X7X86QejJHrLJZk">https://upvdrive.univ-montp3.fr/s/X7X86QejJHrLJZk</a>
2023T2	D3a1	2D and 3D model validated on selected experimental configurations	rapport	P6,P2,10	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Un livrable D3a1- ICUBE (P6)</li> <li>- Un livrable D3a1 ARTELIA (P2)</li> </ul>
2023T3	D3a2	exchange laws for unitary exchange length	rapport	P10,P1,P2,P7,P9,P10	Livraison fin 2023

Date de livraison	N°	Titre	Nature (rapport, logiciel, prototype, données, ...)	Partenaires* (souligner le responsable)	Commentaires
2023T1	D3a3, D3a4	Ability of 2D codes to model flow intrusion into buildings	article	<u>P9, P1, P7</u>	Nouveau livrable <a href="#">(hal-04007606)</a>  D3a4, voir F. Annexe
2023T3	D3b1	parsimonious street-exchange relationship for various types of openings relationship	rapport	<u>P10</u> , P1, P2, P7, P9, P10	Livraison fin 2023
2023T1	D3b2	two numerical software (Flood1D2D, RUBAR 20) involving D3b1 discretized relationships	logiciel	<u>P6</u> , P1, P10	
07/2023	D3c1	best practice guidelines for modelling urban floods at district scale	rapport	Tous ( <u>P6</u> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Voir chapitres 3 et 4 du livrable D3a1 –ICUBE (P6)</li> <li>- Voir chapitre 2 du livrable D3a1 – ARTELIA</li> </ul>
2023T2	D3d1	sensitivity analysis of flood risk results to the parameters of hydrodynamic modelling	rapport	<u>P6</u> , P1, P10	Voir chapitres 3 et 4 du livrable D3a1 –ICUBE (P6)
2023T3	D3d2	cost-benefit analysis of various methods to obtain flood risk information	rapport	P10	Livraison fin 2023
2023T3	D3d3	2D modelling of Nîmes and Oullins field cases	rapport		Nouveau livrable D3d3-KICT

\*Liste des partenaires : P1 : RiverLy; P2 : Artelia; P3 : Cerema; P4 : G-Eau; P5 : LAGAM; P6 : Icube; P7 : INSA Lyon ; P8 : KICT; P9 : Université de Liège , P10 : Hydrosiences Montpellier

## E IMPACT DU PROJET

### E.1 INDICATEURS D'IMPACT

#### **Nombre de publications et de communications (à détailler en E.2)**

		Publications multipartenaires	Publications monopartenaires
International	Revue à comité de lecture	14	6
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage		
	Communications (conférence)	8	3
France	Revue à comité de lecture		
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage		

	<b>Communications (conférence)</b>		
<b>Actions de diffusion</b>	<b>Articles – reportages vulgarisation</b>		3
	<b>Conférences vulgarisation</b>	4	
	<b>Dépôt de bases de données</b>	2	1

### **Autres valorisations scientifiques (à détailler en E.3)**

	<b>Nombre, années et commentaires (valorisations avérées ou probables)</b>
<b>Nouveaux projets collaboratifs</b>	Projet Carnot eau & environnement 'FIDEL' : Expansion des Flux Issus des Débordements de résEaux Lors des inondations urbaines (coordonné par le Laboratoire Déchets Eaux Environnement Pollutions – DEEP ; collaboration avec RiverLy, INSA, EDF, Alison-Environnement)
<b>Thèses</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Thèse de Clément Fagour 'Pollutions causées par les inondations urbaines : Modélisation expérimentale du transport de polluants issus de déversements locaux' financée par l'EUR H2O et l'Ecole Urbaine de Lyon</li> <li>- Thèse de Maylis Genouel sur 'Pollutions causées par les inondations urbaines : Re-connaissances et vécus des pollutions liées aux inondations urbaines' financée par l'EUR H2O et l'Ecole Urbaine de Lyon</li> </ul>
<b>Colloques scientifiques</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 1st Symposium on Urban Flood Experiments Venue: Lyon, France, 1-2 September 2022. Organisée par INSA et ULiège</li> <li>2. Restitution publique de l'ANR DEUFI, 15-16 juin 2023, Riverly</li> <li>3. Restitution de l'ANR DEUFI devant la mairie de Nîmes et la métropole de Nîmes, Université de Nîmes</li> </ol>
<b>Actions de vulgarisation - diffusion</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Livrable D1a3 : vidéo d'expérience d'inondation d'une rue inondée et du bâtiment adjacent</li> <li>2. Article dans le journal Le Monde dans le journal Le Monde du 5 mars 2023</li> <li>3. Article dans le journal Le Monde du 22 mars 2021</li> <li>4. Article dans le journal Le Point du 28 janvier 2023</li> <li>5. Storymaps décrivant le risque inondation et sa prévention sur les terrains de Nîmes et d'Oullins</li> <li>6. Supports de communication sur le risque inondation ont été produits sur l'étude de cas de Nîmes.</li> <li>7. Reportage France 5 du 9 mars 2023, dans l'émission « Science grand format ».</li> <li>8. Cahier ANR n°17 - septembre 2024 - Les défis de la ville en transition.</li> </ol>

## **E.2 LISTE DES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS**

### **• International**

#### **○ Revues à comité de lecture**

1. Dellinger, G., Guiot, L., Pujol, L., Lawniczak, F., François, P., Finaud-Guyot, P., Vazquez, J., Garambois, P.-A. (2025). Assessing 3D and 2D hydrodynamic models for urban flood simulations: a district scale analysis with experimental street-level discharge, height and velocity. Urban Water Journal, 22(9), 1084-1102. doi:[10.1080/1573062X.2025.2531460](https://doi.org/10.1080/1573062X.2025.2531460)
2. Li, X., Yu, S., Kitsikoudis, V., Dellinger, G., Chen, L., Erpicum, S., Guiot, L., Lai, C., Dewals, B. (2025). 3D numerical modelling of flow exchanges between flooded streets and residential blocks during urban flooding in an idealized district. Journal of Hydrology, 658, 133150. doi:[10.1016/j.jhydrol.2025.133150](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.133150)

3. Li, X., Dellinger, G., Erpicum, S., Chen, L., Yu, S., Guiot, L., Archambeau, P., Pirotton, M., Dewals, B. (2024). 2D and 3D Computational Modeling of Surface Flooding in Urbanized Floodplains: Modeling Performance for Various Building Layouts. *Water Resources Research*, 60(5), e2023WR035149. doi:[10.1029/2023WR035149](https://doi.org/10.1029/2023WR035149)
4. Nortes Martinez, D., Grelot, F., Choley, C., and Finaud-Guyot, P. (2024): Flood impact assessment in urban settings with porous buildings – insights from a fine-scale hydraulic-economic model, *Proc. IAHS*, 385, 247–252, doi:[10.5194/piahs-385-247-2024](https://doi.org/10.5194/piahs-385-247-2024).
5. Dellinger, Guilhem and Guiot, Léo and Pujol, Léo and Lawniczak, Fabrice and François, Pierre and Finaud-Guyot, Pascal and Vazquez, José and Garambois, Pierre-André. (2024). Benchmark of 3d and 2d Hydrodynamic Urban Flood Models Against Experimental Spatialized Data of Flow Structures and Signatures. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4890379> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4890379>
6. Miguel Angel Mejía-morales, Emmanuel Mignot, André Paquier, Sébastien Proust. Laboratory investigation into the effect of the storage capacity of a city block on unsteady urban flood flows. *Water Resources Research*, 2023a, 59 (e2022WR032984), pp.1-38. [10.1029/2022WR032984](https://doi.org/10.1029/2022WR032984) . [hal-04052550](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-04052550)
7. Benjamin Dewals, Vasileios Kitsikoudis, Miguel Angel Mejía-Morales, Pierre Archambeau, Emmanuel Mignot, et al.. Can the 2D shallow water equations model flow intrusion into buildings during urban floods?. *Journal of Hydrology*, 2023, 619, pp.129231. [10.1016/j.jhydrol.2023.129231](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129231) . [hal-04007606](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-04007606)
8. David Nortes Martínez, Frédéric Grelot, Cécile Choley, and Pascal Finaud-Guyot. Flood impact assessment in urban settings with porous buildings. Insights from a fine-scale hydraulic-economic model. *Proceedings of International Association of Hydrological Sciences*, vol. in press, p. in press, 2023, doi: 10.5194/piahs-100-1-2023.
9. Vinet F., Cherel J.P., Weiss K., Lewandowski M. & Boissier L. (2022) Flood related mortality in the French Mediterranean region (1980–2020), *LHB – Hydrosience journal*, 108:1. DOI: [10.1080/27678490.2022.2097022](https://doi.org/10.1080/27678490.2022.2097022). IF = 0.358
10. Monteil Ch. Foulquier P., Defossez S., Peroche M., Vinet F. (2022) Rethinking the share of responsibilities in disaster preparedness to encourage individual preparedness for flash floods in urban areas *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 67. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102663> IF = 4,84
11. Li, X., S. Erpicum, E. Mignot, P. Archambeau, M. Pirotton and B. Dewals (2022). "Laboratory modelling of urban flooding." *Scientific Data* 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01282-w>
12. Miguel Angel Mejía-Morales, Emmanuel Mignot, André Paquier, Darius Sigaud, Sébastien Proust. Impact of the porosity of an urban block on the flood risk assessment: A laboratory experiment. *Journal of Hydrology*, 2021, 602, pp.126715. [10.1016/j.jhydrol.2021.126715](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126715) . [hal-03573248](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03573248)
13. Li, X., V. Kitsikoudis, E. Mignot, P. Archambeau, M. Pirotton, B. Dewals and S. Erpicum (2021a). "Experimental and Numerical Study of the Effect of Model Geometric Distortion on Laboratory Modeling of Urban Flooding." *Water Resources Research* 57(10): e2021WR029666. <https://doi.org/10.1029/2021WR029666>
14. Li, X., S. Erpicum, E. Mignot, P. Archambeau, M. Pirotton and B. Dewals (2021b). "Influence of urban forms on long-duration urban flooding: Laboratory experiments and computational analysis." *Journal of Hydrology* 603: 127034. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127034>
15. Emmanuel Mignot, Loick Camusson, Nicolas Riviere. Measuring the flow intrusion towards building areas during urban floods: Impact of the obstacles located in the streets and on the facade. *Journal of Hydrology*, 2020, 583, pp.124607. [10.1016/j.jhydrol.2020.124607](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124607) . [hal-03234707](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03234707)
16. Pascal Finaud-Guyot, Pierre-André Garambois, Guilhem Dellinger, Fabrice Lawniczak, Pierre François. Experimental characterization of various scale hydraulic signatures in a



- flooded branched street network. *Urban Water Journal*, 2019, Urban Water Journal, 16 (9), pp.609-624. [\( 10.1080/1573062X.2020.1713173\)](#) . [\( hal-02381013\)](#)
17. Seong, H., D. S. Rhee and I. Park (2020). "Analysis of Urban Flood Inundation Patterns According to Rainfall Intensity Using a Rainfall Simulator in the Sadang Area of South Korea." *Applied Sciences* 10(3): 1158. [doi:10.3390/app10031158](#)
  18. Miguel Angel Mejía-Morales, Sébastien Proust, Emmanuel Mignot, André Paquier. Experimental and Numerical Modelling of the Influence of Street-Block Flow Exchanges During Urban Floods. *Advances in Hydroinformatics SimHydro 2019 - Models for Extreme Situations and Crisis Management*, pp.495-505, 2020, [\( 10.1007/978-981-15-5436-0\\_39\)](#) . [\( hal-03130113\)](#)
  19. Li, X., S. Erpicum, E. Mignot, P. Archambeau, N. Rivière, M. Pirotton and B. Dewals (2020). "Numerical Insights Into the Effects of Model Geometric Distortion in Laboratory Experiments of Urban Flooding." *Water Resources Research* 56(7): e2019WR026774. <https://doi.org/10.1029/2019WR026774>
  20. Vinet, F., V. Bigot, O. Petrucci, K. Papagiannaki, M. C. Llasat, V. Kotroni, L. Boissier, L. Aceto, M. Grimalt, M. Llasat-Botija, A. A. Pasqua, J. Rossello, Ö. Kılıç, A. Kahraman and Y. Trambly (2019). "Mapping Flood-Related Mortality in the Mediterranean Basin. Results from the MEFF v2.0 DB." *Water* 11(10): 2196. <https://doi.org/10.3390/w11102196>

○ **Communications (conférence)**

1. André Paquier, Bruno Bader, Olivier Bertrand, Guilhem Dellinger, Benjamin Dewals, et al.. DEUFI Project for Accurate Urban Flood Risk Assessment. *39th IAHR World Congress - 39th International Association for Hydro-environment Engineering and Research*, Jun 2022, Granada, Spain. [\( hal-03847258\)](#)
2. Miguel Angel Mejía-Morales, André Paquier, Sébastien Proust, Emmanuel Mignot. Influence of a porous urban block on urban flood flow patterns. *River Flow 2020*, Jul 2020, Delft, Netherlands. pp.7, [\( 10.1201/b22619-276\)](#) . [\( hal-03130134\)](#)
3. Emmanuel Mignot, Loick Camusson, Nicolas Riviere. Experimental analysis of urban flood intrusion into buildings. *10th Conference on Fluvial Hydraulics, River Flow 2020*, Jul 2020, Virtual, Online, France. [\( hal-03832418\)](#)
4. Miguel Angel Mejía-Morales, Sébastien Proust, Emmanuel Mignot, André Paquier. Influence of the urban block structure on the flow pattern along a flooded street. *38th IAHR World Congress*, Sep 2019, Panama City, Panama. pp.6066-6073. [\( hal-02610031\)](#)
5. David Nortes Martínez, Frédéric Grelot, Cécile Choley, Pascal Finaud-Guyot. Flood impact assessment in urban context: Coupling hydraulic and economic models for a fine scale damage assessment. *EGU General Assembly 2022*, May 2022, Vienna, Austria. [\( 10.5194/egusphere-egu22-3984\)](#) . [\( hal-03623946\)](#)
6. David Nortes Martínez, Frédéric Grelot, Cécile Choley, Pascal Finaud-Guyot. Flood impact assessment in urban context. How important is it to couple hydraulic and economic models at a fine scale?. *IAHS-AISH Scientific Assembly 2022*, May 2022, Montpellier, France. [\( 10.5194/iahs2022-71\)](#) . [\( hal-03814878\)](#)
7. David Nortes Martínez, Pierre Balzergue, Cécile Choley, Pascal Finaud-Guyot and Frédéric Grelot: Coupling of hydraulic and economic models at the building scale: A necessary innovation for flood adaptation assessment. *Forum innovation 2023 - Innover pour une gestion concertée et durable de l'eau*. 13–14 November 2023, Montpellier, France
8. Cécile Choley, Pascal Finaud-Guyot, Pierre-André Garambois, Robert Mose. An effective urban flood model accounting for street-building exchanges. *SimHydro 21: Models for complex and global water issues – Practices & expectations*, Jun 2021, Nice (sophia-antipolis), France. [\(hal-03992011\)](#)
9. Paquier, A., Mangara, C., Mignot, E., Dewals, B. & Li, X. 2021. 2-D simulation of flow entering a building. *Simhydro2021 conference proceedings*



10. Paquier A. 2021. Uncertainty estimate of flood hazard for an extreme flood. Flood Risk 2020 conference proceedings.
11. Monteil Ch. et al. (2021) Evolution et interactions des incertitudes dans les projets de réduction des risques de catastrophe. Colloque risque et incertitude Le Mans Nov. 2021

#### ○ Thèses

- Xuefang Li 2021. Urban flooding modelling: role of geometric distortion in scale models and influence of urban forms. Université de Liège. <https://hdl.handle.net/2268/262156>
- Miguel Angel Mejía-Morales. Influence of the flow exchanges between streets and a city block during urban floods: Laboratory experiments under steady and unsteady flow conditions. Fluid mechanics [physics.class-ph]. Université de Lyon - INSA Lyon, 2022. English. (NNT : ). (tel-03887990)
- Cécile Choley. Étude et modélisation des processus physiques contrôlant les échanges d'eau entre les rues et les bâtiments lors d'une inondation urbaine. Mécanique des fluides [physics.class-ph]. Université de Strasbourg, 2023. Français. (NNT : 2023STRAD042). (tel-04391846v2)

#### ○ Datasets

- Mignot, Emmanuel, 2023, "Dataset of the measured flow intrusion form a flooded street to an adjacent building", <https://doi.org/10.57745/3ZYYV9>, Recherche Data Gouv, V1
- Mejía-Morales, Miguel Angel; Mignot, Emmanuel; Paquier, André; Proust, Sébastien, 2023b, « Data set of a laboratory experiment on the impact of the conveyance porosity of an urban block on the flood risk assessment », <https://doi.org/10.57745/UJOCJ8>, Recherche Data Gouv, V1, UNF:6:Md2Yh9DNuCDyRI3U3kNGCw==
- Mejía-Morales, Miguel Angel; Mignot, Emmanuel; Paquier, André; Proust, Sébastien, 2022, « Dataset of a laboratory experiment on the effect of the storage capacity of a city block on unsteady urban floodwaters », <https://doi.org/10.57745/BFHGO3>, Recherche Data Gouv, V1, UNF:6:lih4BgXngcms3ZjPvaJy3A==
- Les données des expériences d'ICUBE seront mises en open access après publications des papiers de Dellinger et al (in prep.) et Guiot et al. (in prep.)

### E.3 LISTE DES ELEMENTS DE VALORISATION

✓ Cahier ANR n°17 - septembre 2024 - Les défis de la ville en transition. <https://anr.fr/fr/ressources/cahiers-thematiques/les-defis-de-la-ville-en-transition/>

✓ Une vidéo réaliste de maquette d'inondation de rue et bâtiment a été réalisée au laboratoire de l'INSA Lyon et est disponible : <https://youtu.be/-tvz3C3j7qM>

✓ Article dans le journal Le Monde du 5 mars 2023 (cahier des sciences : auteur : Rémi Barroux) présentant notamment les expériences conduites sur le modèle urbain MURI; [https://www.lemonde.fr/sciences/article/2023/03/15/des-inondations-simulees-en-laboratoire-pour-mieux-les-comprendre\\_6165509\\_1650684.html](https://www.lemonde.fr/sciences/article/2023/03/15/des-inondations-simulees-en-laboratoire-pour-mieux-les-comprendre_6165509_1650684.html)

✓ Article dans le journal Le Point du 28 janvier 2023 comment Nîmes se prépare aux inondations Interview de F. Vinet membre Lagam.

✓ Une interview de K. WEISS et F. VINET dans le journal Le Monde du 22 mars 2021. [La culture du risque pour les inondations, un combat de longue haleine à Nîmes](https://www.lemonde.fr/culture/article/2021/03/22/la-culture-du-risque-pour-les-inondations-un-combat-de-longue-haleine-a-nimes_1811111_3218.html) (lemonde.fr)

√ Storymaps hébergées par le site ESRI décrivent le risque inondation et sa prévention sur les terrains de Nîmes et d'Oullins et les apports du projet DEUFI dans le cadre du workpackage 2 du projet ANR DEUFI, livrable D2e2 : new communication devices for end Users :

- StoryMap Nîmes : <https://arcg.is/C5DaS>
- StoryMap Oullins : <https://arcg.is/qyG0O0>

Auteurs : Pierre FOULQUIER, Charlotte MONTEIL, Freddy VINET, Stéphanie DEFOSSEZ, Matthieu PEROCHE, Laura GUERIN, Romain DHIMOILA (Laboratoire Lagam), Karine WEISS (Laboratoire Chrome Nîmes), Chloé FRIBAUT (Laboratoire Chrome Nîmes)

√ Des supports de communication sur le risque inondation ont été produits sur l'étude de cas de Nîmes. Ces supports de communication sont disponibles via le livrable D2e2.

√ Un reportage des expériences conduites sur le modèle urbain MURI, a été diffusé sur France 5, le 9 mars 2023, dans l'émission « Science grand format », le documentaire s'intitulant 'Quand la Seine débordera' (Réalisation : Mathieu Schwartz ; Production : Tournez S'il Vous Plaît (TSVP)) : <https://www.france.tv/documentaires/science-sante/4656856-quand-la-seine-debordera.html>

## E.4 BILAN ET SUIVI DES PERSONNELS RECRUTES EN CDD (HORS STAGIAIRES)

Identification				Avant le recrutement sur le projet			Recrutement sur le projet				Après le projet				
Nom et prénom	Sexe H/F	Adresse email (1)	Date des dernières nouvelles	Dernier diplôme obtenu au moment du recrutement	Lieu d'études (France, UE, hors UE)	Expérience prof. Antérieure, y compris post-docs (ans)	Partenaire ayant embauché la personne	Poste dans le projet (2)	Durée missions (mois) (3)	Date de fin de mission sur le projet	Devenir professionnel (4)	Type d'employeur (5)	Type d'emploi (6)	Lien au projet ANR (7)	Valorisation expérience (8)
Mejia Morales Miguel Angel	H	miguel.a.mejia@outlook.com		Master 2	France	8 ans	RiverLy	Doctorant	41	31/03 /2022	CDI	PME/TPE	ingénieur	non	oui
Sigaud Darius	H	darius.sigaud@gmail.com		Licence pro	France	0	RiverLy	Technicien	12	30/09/2020	Sans nouvelle				
Bonazzi Chloé		chloe.bonazzi@inrae.fr			France		RiverLy	Technicien	3		CDD	Grande entreprise		non	non
Chloé Fribault	F	chloe.fribault@gmail.com		Master 2	Université de Nîmes	0	UR Lagam univ montpellier 3	Ingénieur d'étude	6	31/3/2020	CDD	Public	ingénieur	non	oui
Cécile Choley	F	cecile.choley@inria.fr		Diplôme ingénieur ENGEEES	ENGEEES, Strasbourg	3 ans	ENGEEES - Icube	Doctorante	42	28/2/2023	Encore sur le projet			oui	oui
harlotte Monteil	F	charlotte.monteil@univ-montp3.fr		doctorat	University of East Anglia, UK	3	UR Lagam Univ montpellier 3	Post doctorat	12	30/11/2021	CDI	Public	Professeur des écoles	non	oui
David Nortès Martinez	H	david.nortes-martinez@inrae.fr		doctorat	Université de Montpellier	2	UMR G-eau	Post-doctorat	15	30/06/2023	CDD	EPST	IR	OUI	OUI
Rémi Bouju	H	rbouju@engees.eu		Diplôme ingénieur ENGEEES	ENGEEES, Strasbourg	0	ICube	Ingénieur d'étude	5	01/03/2023	CDD	BE	Ingénieur	Oui	Oui

## **F ANNEXE : DELIVERABLE D3A4**

# Summary of numerical simulations performed using Rubar 20 during Deufi project

A. Paquier  
July 2023

## Introduction

Five series of cases could have been simulated using Rubar 20 during Deufi project. Because of lack of time, were only simulated:

1. most of the experiments of WP1a (LMFA experiments) with the “door” opening and some of the ones with the “window” opening
2. all the experiments of WP1b (RiverLy experiments) for which are provided a full set of measurements
3. Nîmes case with two spatial extents: only central part of Richelieu district, Hoche and Richelieu districts nearly as in previous calculations
4. Oullins case with two spatial extents: same extent as for previous calculations for simulations of situation before works, increase of the extent in the upstream direction to include a supermarket and corresponding left bank dwellings for the simulation of the situation after works

Moreover, during DEUFI project, the Fortran code of Rubar 20 was modified several times in order to try solving numerical instabilities and to correct minor errors particularly for the parallel version that was necessary for the calculation of Oullins case using the selected refined mesh. Then, all the results retained for the project conclusions come from various versions of Rubar 20 and cannot be compared easily. This latter remark stands particularly for the various simulations of the Oullins case and for a comparison between two series of cases (for the same event, two different representations of obstacles). Unless specified, all the calculations were performed with the same turbulence model defined by a diffusion coefficient equal to  $hu^*$  in which  $h$  is the water depth and  $u^*$  the shear velocity calculated from the slope of the free surface. The reason of this choice was that it provided the best results for the preliminary experiments on MURI presented at conference Simhydro 2019 (Mejia et al., 2019) and provided a convenient velocity pattern in the block for the first series of the WP1b experiments.

## WP1a experiments

First, only the experiments with the “door” opening were used.

The calculations were performed in three steps:

1. preliminary calculations in parallel to calculations using Wolf in order to investigate if the choice of the solver was a key factor or not and to set the more convenient parameters (grid and boundary conditions); only eight experiments with a lot of measurements were used;
2. identifying if the effect of the obstacles in the street is produced (most experiments with the door opening are used);

3. answering if the change of representation of the flow through the opening (from shallow water equations to weir type equation) modifies the conclusions (some experiments with the door opening are used).

The conclusions of the steps 1 and 2 were summed up in a paper (Paquier et al. 2021) presented to the conference Simhydro 2021. The flow discharge through the opening was generally underestimated and the difference increases with the faster flows. A more refined mesh on a shorter domain seems to provide a slightly higher flow (still underestimated) but the difference may be also due to the change in the boundary conditions that slightly modify velocity pattern and flow depth at the opening.

Step 3 was carried out in two sub-steps: first, finding the weir coefficient to obtain the measured flow discharge through the opening in the case without obstacle; second, for three obstacles, checking if the effect of the obstacle on the flow discharge is conveniently estimated.

Instead of a standard weir coefficient of 0.4, without obstacle, the “best” coefficient was respectively 0.7, 0.57, 0.62 and 0.51 for F1, F2, F3 and F4 flows. These latter values (as well as the other results retained for the calculation of the WP1a experiments) were obtained setting the upstream and downstream points for water elevation used in the weir equation at one opening width of the central point of the opening; closer settings produced more unstable results and points far from the opening make impossible the representation of the effect of an obstacle. The key result is that one single coefficient value cannot be used and thus an equation to calculate the coefficient should be found. This latter conclusion agrees with the conclusions of the experimental team (Mignot et al., 2020) and the calibrated weir coefficients are the same ones as those calculated by them from the water elevations at the middle of the channels.

Figure 1 shows that the effect of the obstacle is found by 2-D calculation as well for calibrated coefficients as for standard coefficient. The adequacy seems equivalent to the one calculated using representation of the flow through the opening by shallow water equations I.E. the trend is fair but results are not accurate (deviation can be above 10%).

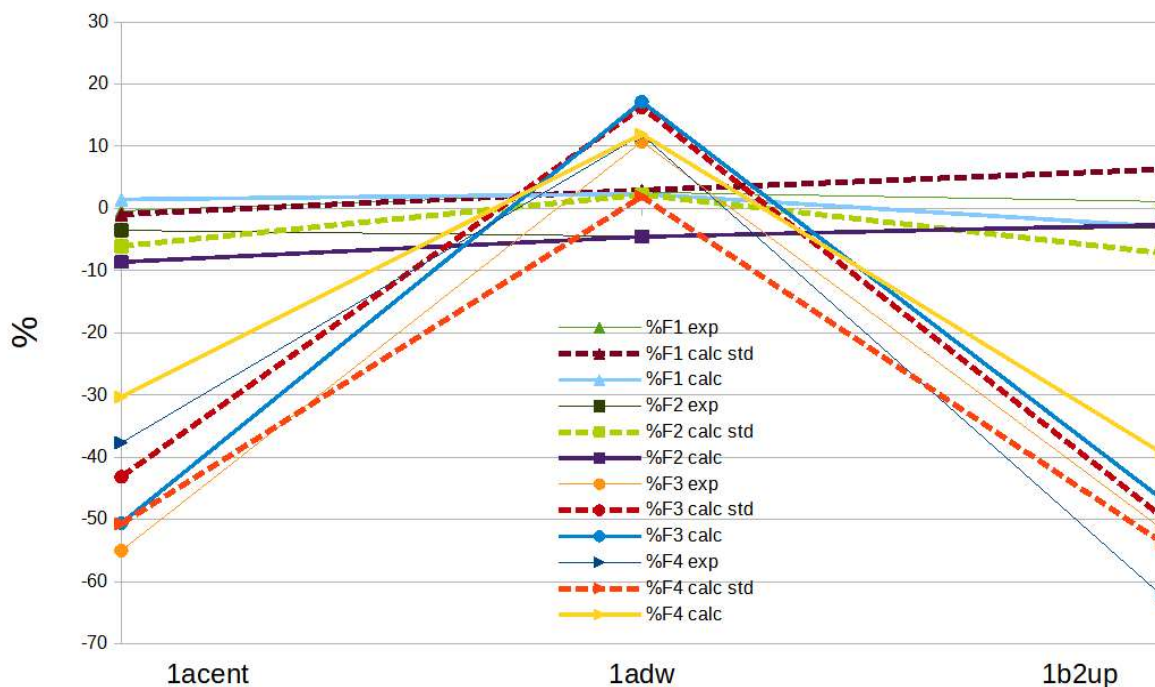


Figure 1 Effect of the obstacles respectively 1acent, 1adw and 1b2up represented as the difference in percentage of discharges without and with obstacle (exp = experimental values; calc = calculated with calibrated coefficients, calc std = calculated with 0.4 coefficient)

The results with the “door” opening are confirmed by some calculations with the with the “window” opening. These latte calculations were performed with the same mesh except that at the location of the opening, the limits of the cells were adapted to the limits of the opening. The flow discharge through the opening is still underestimated either using shallow water equations or the weir equation with standard coefficient. The underestimate is even increased (going up to 50% for F2 flow instead of 20 to 30% for door). Similarly to door, the calibrated weir coefficient (in 2D calculation calculated from points at same x-coordinate as the middle of the opening and respectively at 7.5 cm upstream and downstream from this middle) equals the experimental one calculated from the middle of the channels. The effect of the obstacles I also qualitatively fairly simulated. This latte result means that including the obstacles in the calculation is interesting to obtain an estimate of the effect (that depends of the location of the obstacle and of the flow parameters) but this estimate should be kept only if it is high ( $> 20\%$ ) as, without obstacle, the rror for the flow discharge through the opening can be up to 50% and ofteh as high as 20%.

## WP1b experiments

(Dewals et al., 2023) details the results simulated with the codes Wolf and Rubar 20. The cases are more complex than the ones of WP1a without obstacle but the part of the simulation corresponding to the entry in the block from the right street are quite similar. Calculations using the weir equation for the doors could not provide suitable results because the velocity pattern inside the block was not simulated correctly ; moreover, the weir coefficient should be calibrated, which complicates the task to perform. Using only the shallow water equations, the trend seems a slight under estimation of the discharges through the openings similarly to WP1a results. Results from the two codes are similar on steady cases ; particularly, the turbulence model used for Rubar 20 (one equation) seems to provide similar results as the k-epsilon turbulence model (two equations); however, using zero turbulence or a constant coefficient prevents obtaining the right velocity pattern in the blocks and reduces the quality of the flow discharges through the openings. The unsteady calculations (using Rubar 20 only) show that the quality of the results is maintained even starting from zero water depth and passing to supercritical flow. However, the underestimate of the flow through the openings lead to a wrong velocity pattern inside the block during the filling stage and a too low peak water elevation inside the block.

## Nîmes study

Calculations preceeding DEUFI project concern Hoche and Richelieu districts representing the network of streets with a description of the street cross sections using 5, 7, 9 or 11 points. The calculations were performed for the 1988 and 2002 floods for which flood marks were available.

For DEUFI project, it was decided to simulate the four typical floods proposed by the Nîmes municipality for mitigation planning (called “1988”, “2005”, “PPCI”, “L4”). These four floods were calculated from rainfall considering three different protection levels (corresponding approximately to year 1988, 2008 (set as present) and 2028) so, for our area, twelve discharge hydrographs sets entering the simulated area (Hoche + Richelieu). Only the results for the 1988 flood (the highest one) are presented herebelow because the results for the three other floods show too small flooded areas and thus do not permit to comment the differences between simulations of the same event with various calculation parameters.



First, a calculation was performed in the previous model with 11 points describing a street cross section (8 cells for the flow and two cells for the walls) and the municipality hydrographs for the flood 1988 (that has the highest peak flows but has different hydrographs than the 1988 flood used for previous calculations) in present situation. The results are provided at the (5) upstream and (11) downstream streets of the central part of the Richelieu district (later on called “Richelieu district”). These data (limited to 10 outlets) were used by Hydrosiences for their calculation of Richelieu district. They were used also for calculations using Rubar20 on the same area but with a different topography and a different description of buildings.

Second, a new Rubar 20 model was built for the whole Richelieu and Hoche districts on the basis of the present topography and buildings. The extent of the model was slightly different from the previous model, particularly at the upstream end of the model (with 3 entries instead of two located more upstream). The new mesh included the whole area (streets and buildings) on the basis of a 2 m mesh size cell (except in the upstream part in which the cell size was 3 m). Bottom elevation was interpolated from the topography of the previous model except for the parts in which either municipality provided detailed data or INRAE levelled new data for DEUFI project. In the parts on which the various topographies should be identical, differences existed but are limited to 20 cm. Yet, these differences should lead to compare results of water depth rather than results of water elevation. The extent of the blocks or of the buildings was simplified from the one of the BD topo (which was not used for bottom elevation). For description of the blocks, two main options were used: either the water is restricted to the streets (I.E. limits of the blocks do not let water pass through) or the water flows everywhere entering the blocks through openings (according to a statistical distribution: door (0.19 m above ground level) 1,05 m wide and 2 m high every 14 m and window (1.12 m above ground level) 1 m wide and 1.1 m high every 9 m) described by weir-type equations (and inside the blocks, the water flows freely because the walls of the buildings and inside the buildings are not represented). The Strickler friction coefficients were set to 40 for the streets (to represent the situation in which there is no car in the streets) and 5 inside the blocks (there are a lot of obstacles (not explicitly represented) to the flow). Model for Richelieu district was extracted from the total model in order to have same limits as the Hydrosiences model.

In a general way, adding openings has two opposite effects:

1. for the downstream areas, part of the flow was deviated and should arrive later so the coming hydrograph has lower discharge and is delayed except if the deviation brings more water in that area
  2. deviation of part of the flow by the openings create head losses, which means that for the same discharge, the water depth across the street should be more varied and have a higher average.
- However, 2-D model and particularly 2-D model with the selected mesh (which involves two or three cells across a street) cannot represent this process in a suitable way. More over, the calculations for WP1b show that the weir type representation of openings in Rubar 20 cannot catch the velocity pattern near the openings.

In order to estimate the effect of the various parameters, the comparison was focused on the Richelieu district. The synthetic indicator was the difference of water depth at the 49 flood marks of the 1988 flood inside the streets of Richelieu district, which are quite well distributed over the area, except that they are generally on buildings walls and near the crossroads (which means that the calculated peak water depth at the closest centre of a street cell cannot be compared exactly).

A first comparison was performed between results of the total model and results of the Richelieu district with upstream hydrographs coming from results of the total model.

Table 1 sums up the results for the 49 flood marks inside Richelieu district for which the average peak water depth is 1.37 m.

Table 1. Comparison of calculated peak water depth with 1988 flood marks inside Richelieu district. The average difference and RMS deviation are in metres.

Type of calculation	Average	RMS	ref
Streets only	0.340	0.908	se7c6
With openings (statistical distribution)	0.160	0.884	se7c10
With openings (statistical distribution except INRAE field survey = 1 street + 1 block)	0.160	0.883	se7c17
With openings and reduced flow coefficient (0.1 instead of 0.4)	0.286	0.866	se7c11
With openings and reduced flow coefficient (0.29 instead of 0.4)	0.164	0.868	se7c12
With openings as in Hydrosiences model	0.101	0.839	se7c21
With openings as in Hydrosiences model and additional walls in blocks (between houses)	0.396	0.747	se7c23
With openings and Strickler 20 in inside streets	0.179	0.859	Se7c16
With openings and critical flow downstream, free flow west	-0.216	0.686	Se7c15
With openings and upstream flow hydrographs from Deufi total model	0.018	0.826	se7c13
Deufi total model with openings only in Richelieu district (streets only elsewhere)	-0.151	0.665	p11c191988mun2008ouver
Deufi total model with all openings	-0.322	0.673	p11c191988mun2008ouvtot
Deufi total model with all openings and 1988 upstream hydrographs	-0.307	0.667	p11c191988mun1988ouvtot
Deufi total model with all openings and 2028 upstream hydrographs	-0.343	0.700	p11c191988mun2028ouvtot
Deufi total model with all openings and rainfall everywhere	-0.253	0.643	p11c191988mun2028ouvtotpluie
Deufi total model streets only	-0.003	0.686	p11c191988mun2008murs
Refined mesh streets only	0.399	0.980	sed710murs
Refined mesh with openings	0.140	0.859	sed710ouver

It appears that the downstream boundary conditions as rating curves provide (Figure 4) too high water depths (compared to the total model which provides more suitable downstream conditions to Richelieu district). At the upstream ends, a slight change is also noted due to a change in the distribution of the flow and the lack of transversal velocity imposed at the upstream ends of the Richelieu district. But this change is much smaller than the effect of the change in model upstream (from previous model to new model both with only streets but with different dates (1988 against present) for situation); figure 3 shows that the flows in the two main streets become nearly equal in present situation while the upstream difference was kept with the previous model (Figure 2).

However, the flows are rapidly redistributed inside the Richelieu district by the network of streets and even more rapidly if a flow through the building blocks is taken into account. Generally, inside Richelieu district, the flow is accelerated (and thus the water depth is lower) if flow passes across the blocks while if openings are opened and water is stored inside the blocks (because of walls without openings inside the blocks), flow is slower and water depth is higher. Nevertheless using the total model instead of reinjecting the hydrographs inside the Richelieu model creates a mean difference of about 17 cm and introducing openings upstream an additional 17 cm while taking into account measures proposed for 2028 creates a difference of only 2 cm. The other parameters (including friction coefficients) have little influence (a few centimetres on the average) and their influence remains inside a usual uncertainty interval. So that, the main conclusion stands in: due to the limited extent of the Richelieu district, suitable boundary conditions are difficult to set as well upstream (difficulty to share flow between the two main inlets) and downstream (neither rating curves nor critical flow are optimal). Moreover Figure 5 shows that adding openings modify local peak water depths (in addition to an eventual change in the general flow pattern) and Figures 6 show that a refined mesh should be preferred as stability to mesh refinement is not reached (but a bias exists because the main difference seems to be the distribution of flow entries). Figure 7 compares the statistical distribution of the openings everywhere and the same distribution but with locally the levelled data for openings (Rue Catinat and a block on its Eastern side): the differences are localized in the streets in which the openings are changed while elsewhere (and thus the average on the Richelieu district) there is nearly no change.

Finally, concerning the effect of the openings, one can conclude:

- the effect is significant only for the 1988 flood;
- the general effect depends on the representation of the openings (parameters of the openings between streets and blocks and inside blocks),
- a local effect is always significant near one opening, which means a refined mesh is necessary to simulate this local effect correctly and the status of the opening (closed or opened) and of the nearest openings are necessary (and considering results of WP1a, obstacles in the street should be simulated)

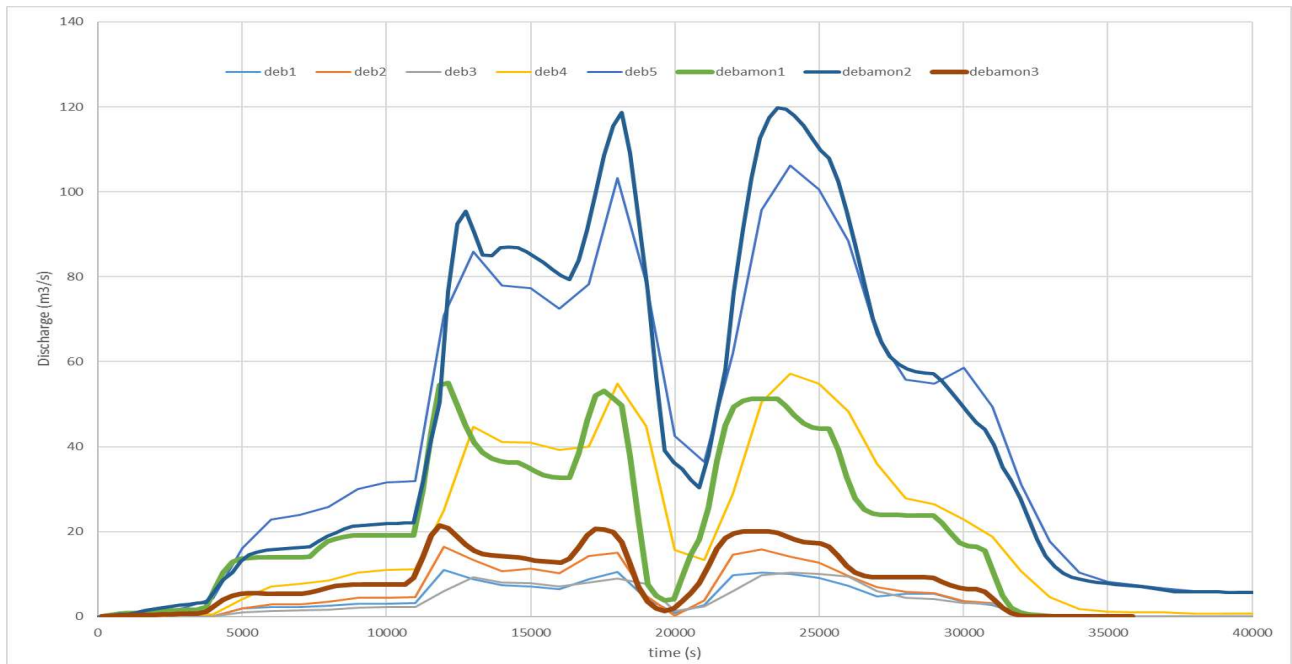


Figure 2. Comparison of the three upstream flow hydrographs with the five flow hydrographs entering Richelieu district for the 1988 (2008) flood (calculation of previous model).

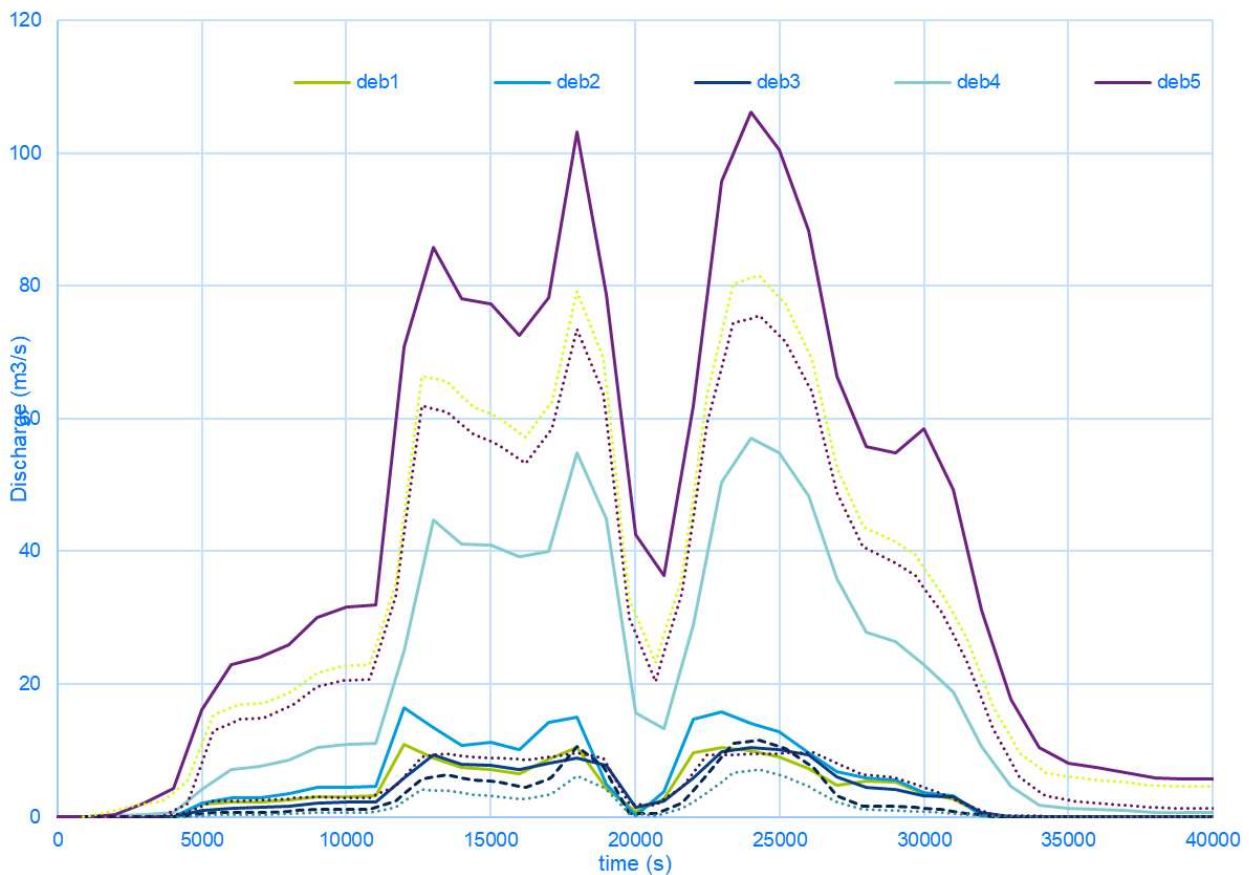


Figure 3. Effect of the Hoche district representation on Richelieu district upstream hydrographs for the 1988 (2008) flood (calculations with only flow in streets; previous model compared to DEUFI model)

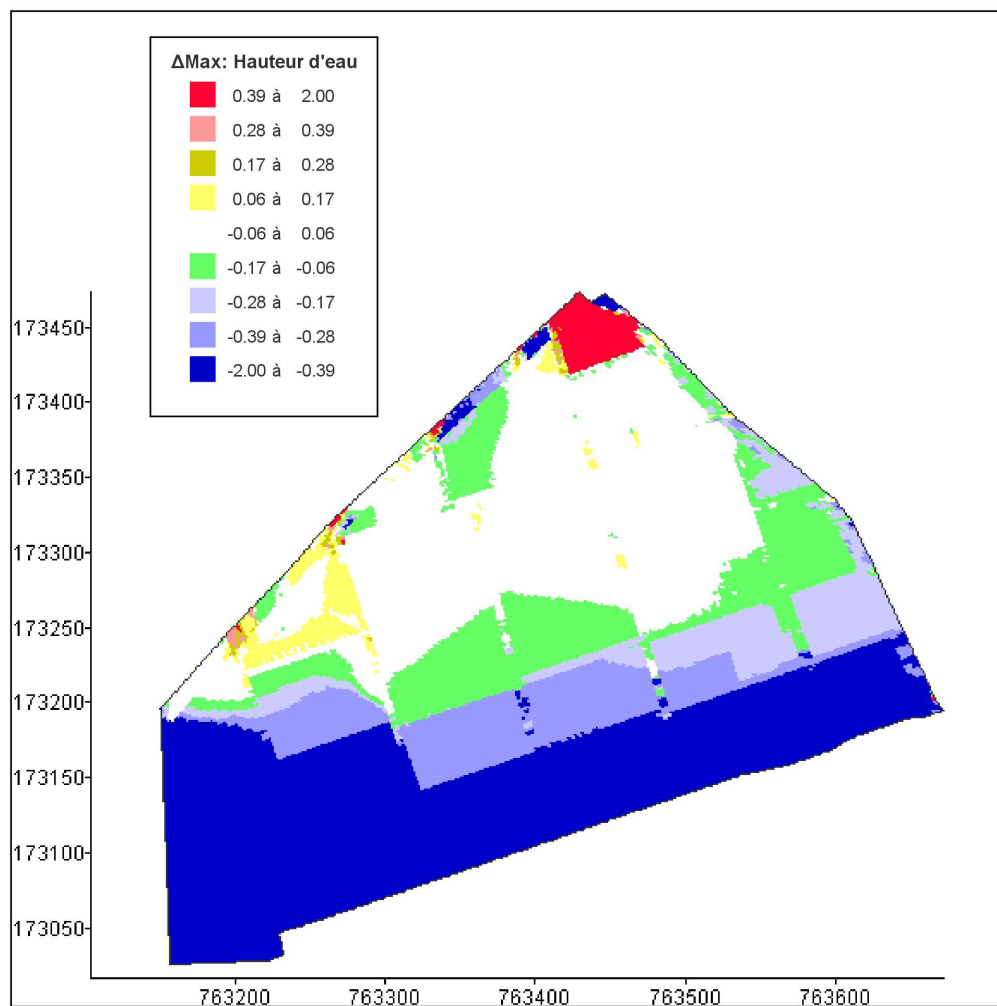


Figure 4. Difference of peak water depths in Richelieu district between total model and local model with rating curves (both with openings in Richelieu district).

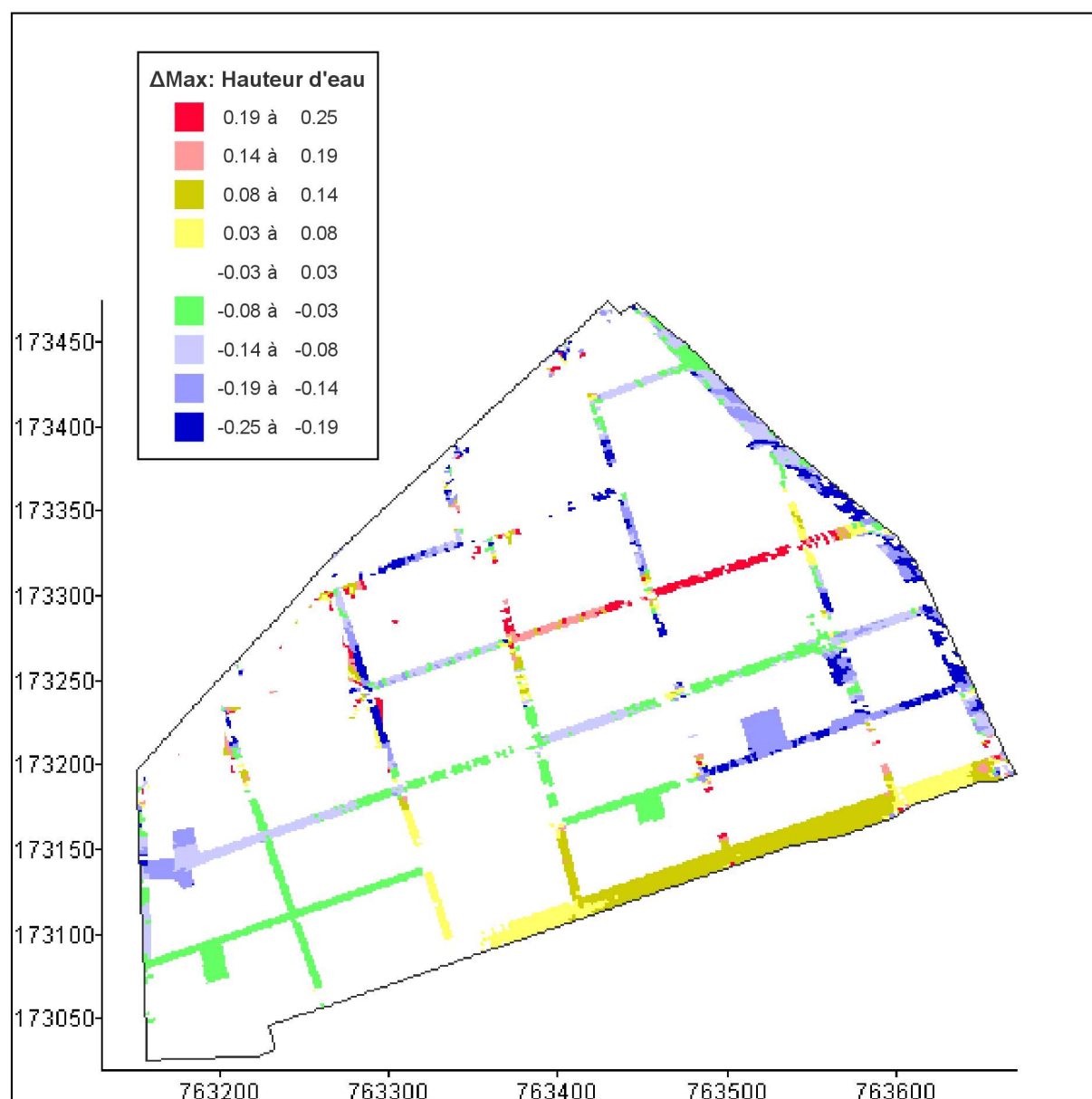


Figure 5. Difference of peak water depths in the streets of Richelieu district between local model with and without openings.

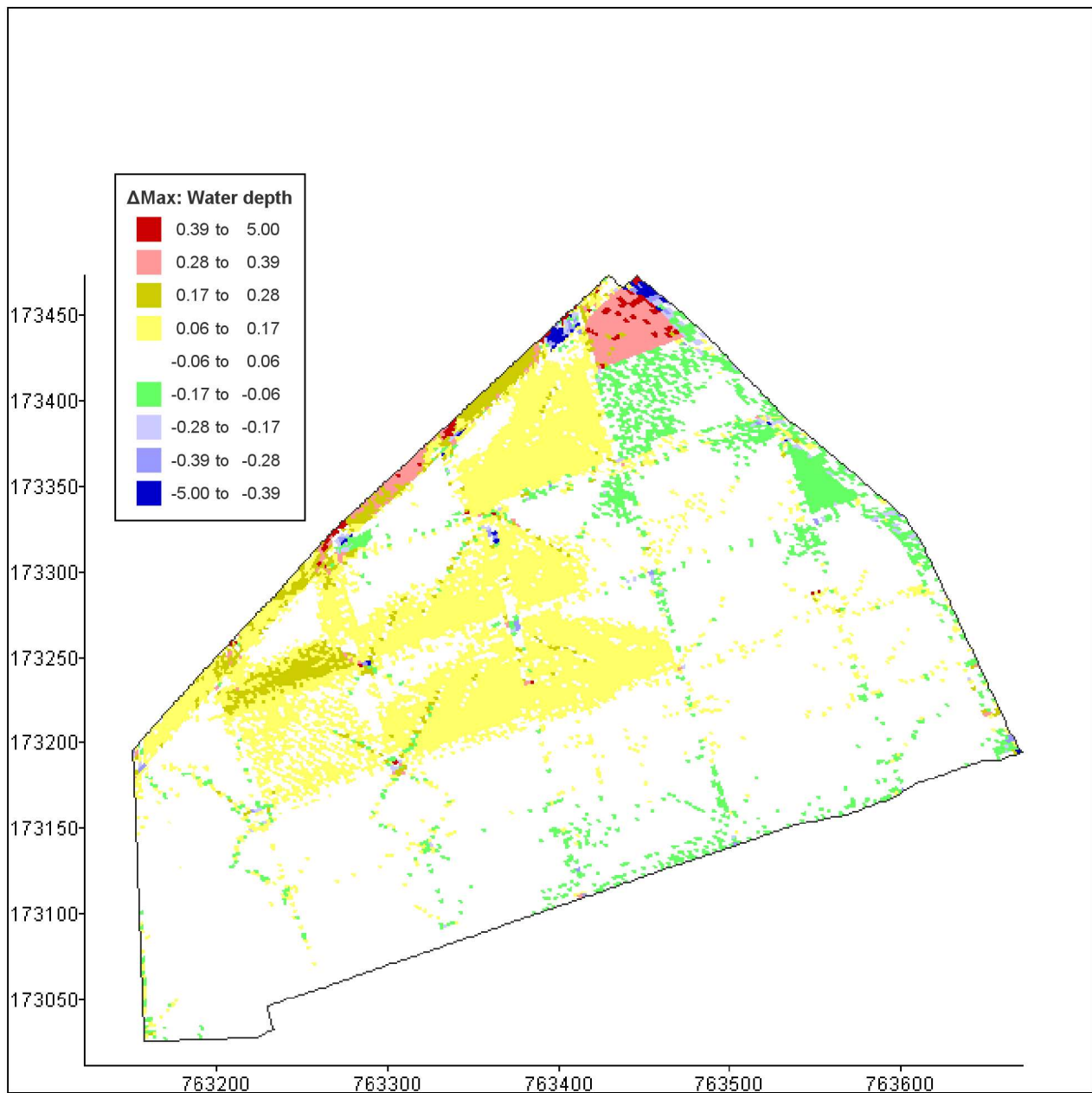


Figure 6a. Difference of peak water depths in Richelieu district between refined model and usual local model with openings.



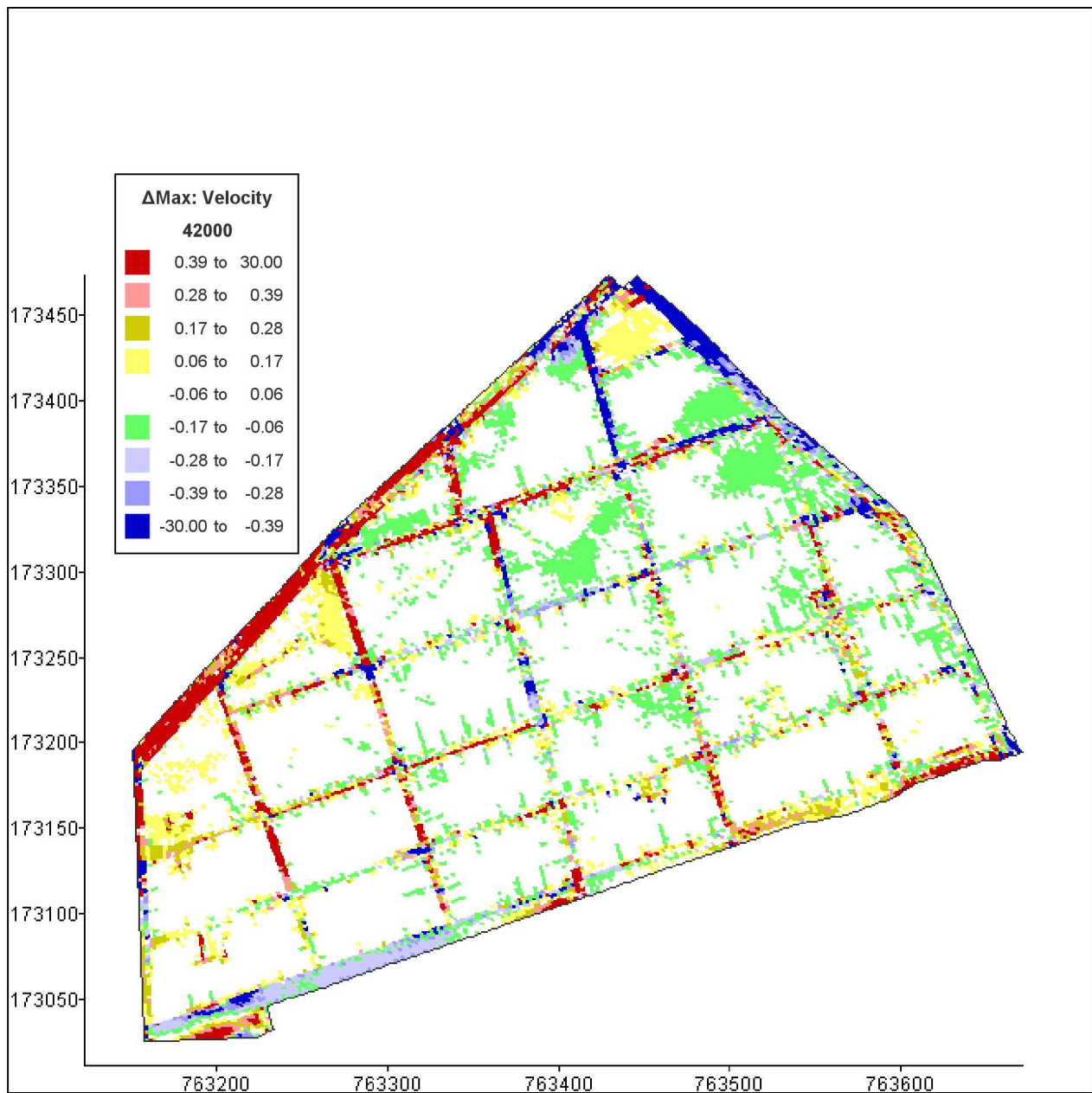


Figure 6b. Difference of peak velocities in Richelieu district between refined model and usual local model with openings.

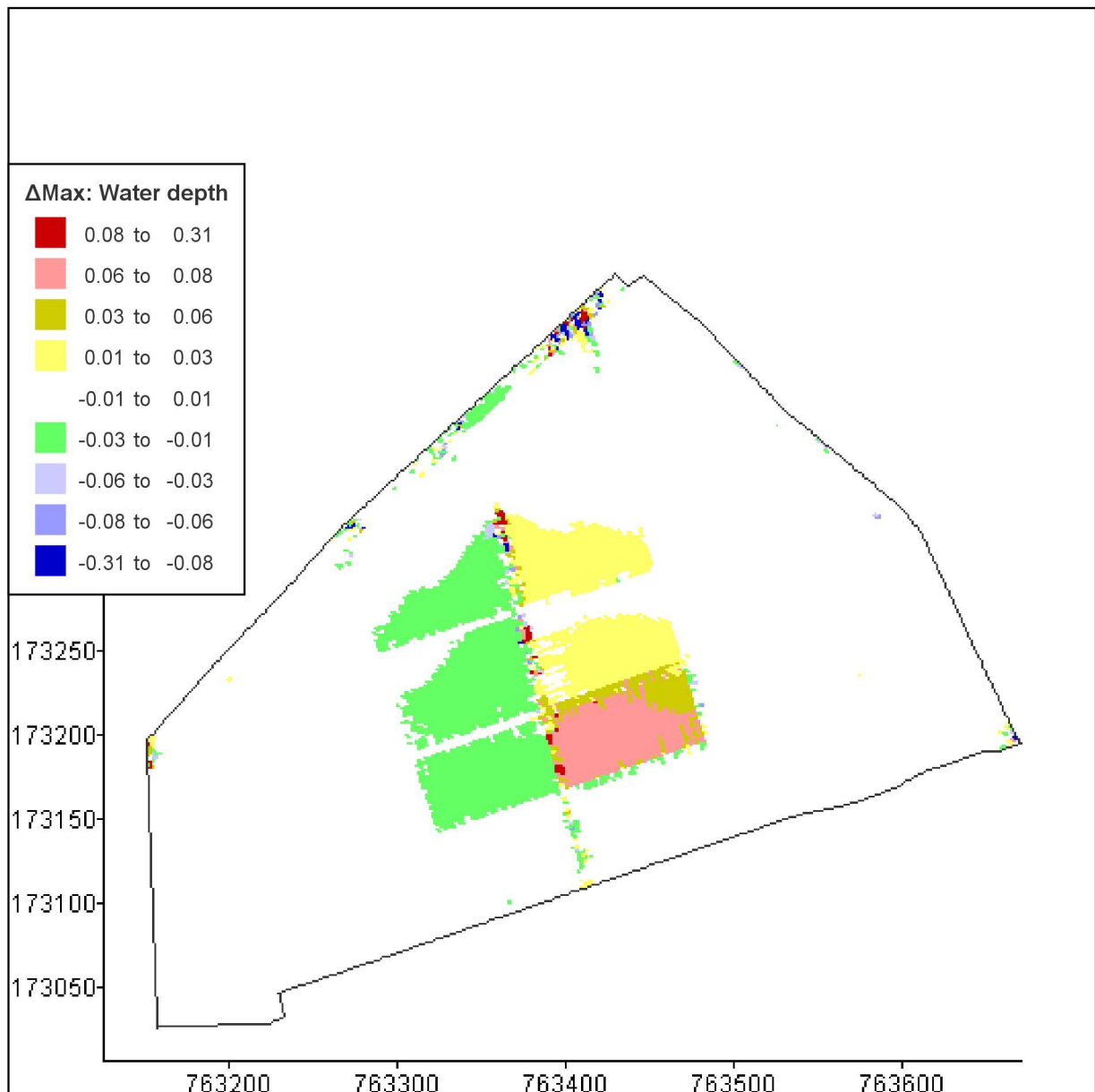


Figure 7. Difference of peak water depths in Richelieu district between statistical location of openings and levelled one.

## Oullins study

Calculations preceeding DEUFI project concern the Oullins centre and the historical floods. Various models were built including some ones with the simulation of the main branches of the sewer model (1D-2D coupled model). For the 2008 flood, (Paquier et al., 2019) studied the sensitivity to various parameters including the representation for the built-up area. Buildings were supposed to receive no water but various hypotheses were set for the building blocks.

During Deufi project, a new model (new mesh with mean cell dimension of 2 m), new calculation code, called “313”) was set on the 2008 model topography with the hypothesis of water coming into the blocks through openings (the ones surveyed by P.H. Bazin) represented as weir-type structures. The calculations were performed for synthetic hydrographs built at the location of Pont d’Oullins in order to have one single return period for one hydrograph. The selected return periods were 30, 50, 100 and 500 years.

The calculation for 500 years showed that the extent of the model was too small to cover the whole flooded area. So the model describing the present situation was built with a larger extent both in the upstream part (extension to the downstream end of the recreation area) and in the downstream end (extension to the flooded area upstream pont d’Oullins). Because the geometry of the main channel was completely changed, no calibration of the model was possible. Usual values of Strickler coefficients were used. The topography was completely modified and used the lidar data provided by the Sagyrc except for the area in which works were recently carried out for which the topography of the works was used, the main channel downstream from Pont d’Oullins in which the previous topography was kept and upstream from Pont Blanc in which the geometry of the main channel resulted of an interpolation of lidar data (the only ones available upstream) and the works data. Three gauges measuring the water elevation after works in the main channel close to Oullins centre permitted to check that, in that part, there was no trend in water elevation for the higher measured flow discharges and that the calculated water elevation at these three points agree with measurements.

Calculations with this new model showed that, for selected floods, the flooding started upstream from Pont Blanc and the description of this upstream flooding is essential particularly for the flooding of the left bank. Several descriptions of the built-up area were implemented: blocks are limited by walls (called “fences”, with or without openings) or not and buildings are limited by walls (with or without openings) or not. The openings are represented by weir type equations with discharge coefficient of 0.4. For blocks, the location of the walls and the openings (location) are set from BD topo maps and field observations while dimensions of the openings are systematically 2m wide and 1 m high above ground level. For buildings, walls are set from BD topo maps and openings are virtual ones (dimensions are: windows 1.5 m wide and 1 m high one metre above house elevation and doors 2m high and 1 m wide, at house elevation and location is on the first edge of each wall numbered 2, 12, 22, ... for the door and 4, 6, 8,10, 14, 16, ... for the window).

The various runs were then the following ones:

- The calculation 317b43 is a calculation without buildings and fences.
- The calculation 317b47 is similar to 317b43 but the mesh was slightly changed in order to avoid putting water inside buildings (walls are created for each building)
- The calculation 317b48 is similar to 317b47 but the mesh was slightly changed in order to avoid putting water inside block of houses (and buildings): walls are created for each block for which fences containing walls exist.
- The calculation 317b49 is similar to 317b48 but to be more realistic, openings are created for some fences
- The calculation 317b50 is similar to 317b49 but to be more realistic, openings are created for the houses

- The calculation 317b51 is similar to 317b50 but fences were destroyed

The comparisons of results between 313 (before works) and 317b49 (similar after works) show that the works reduce flooded areas strongly for return periods of 30 and 50 years and slightly for 100 years. For the 500 years return period, the differences are weak. The works are efficient to limit flooding up to a return period of 50 years; for the 100 years flood, the flooded area is reduced but the flooding is generalized (Figure 8) and the uncertainty of upstream condition and of the distribution of overflows between left and right banks does not permit to determine the real efficiency of the works; for the 500 years flood it seems that the additional flow capacity of the main channel is compensated by the effect of obstacle of the protection walls but a further analysis is required.

After works, for the 30 years return period, the right bank is not flooded so that the various calculations are not carried out for this return period. For the 50 years flood, the right bank is nearly not flooded (and if a breach occurs in the defence wall, the flooded area is smaller than the one before works) and similarly for all the descriptions of the buildings; on left bank, the differences seem to come partly from the upstream boundary because the distribution of flow in the upstream part of the model depends on the description of the buildings; however the trend (that is confirmed by results of the 100 years flood in the 80% downstream area) is that adding fences (with openings) reduces the peak water depths in some places (water cannot go there so easily) and adding openings in buildings reduces the peak water depths (water has more storage volume). For the 100 years flood (figures 9 to 11), the trend upstream is opposite to the general trend because of the effect of the upstream distribution controlled by fences and flow through buildings. For the 500 years flood, the calculations are unstable generally because the structures are not conveniently defined so that the comparisons between various runs cannot be trusted; particularly, if fences with openings are present, one block is filled with water but water cannot go out, which is wrong. However, despite this uncertainty on the comparisons, the lack of openings in the fences produces lower peak water depths (confirmed by the 100 years flood results) which maybe means that the flow passes more rapidly through the built-up areas (less head losses because less flow bifurcations, which is confirmed by the fact that the peak water depths are similar as the ones without fences). Adding openings in the buildings reduces the peak water depths as for weaker floods while openings in the fences increases the peak water depths oppositely to weaker floods.

Finally, for both Oullins and Nîmes, adding openings will reduce peak water depths if it permits to provide more ways to downstream. This effect is reduced and even opposite if the openings that are always creating additional head losses do not permit additional flow (because it leads only to storage). The location and dimensions of the openings are important for a detailed hazard map but a statistical distribution of the openings seems enough to get the average effect of the openings. If this conclusion is confirmed, it means that it will be important to define a statistical status of the opened openings (status certainly depending of the degree of flooding).

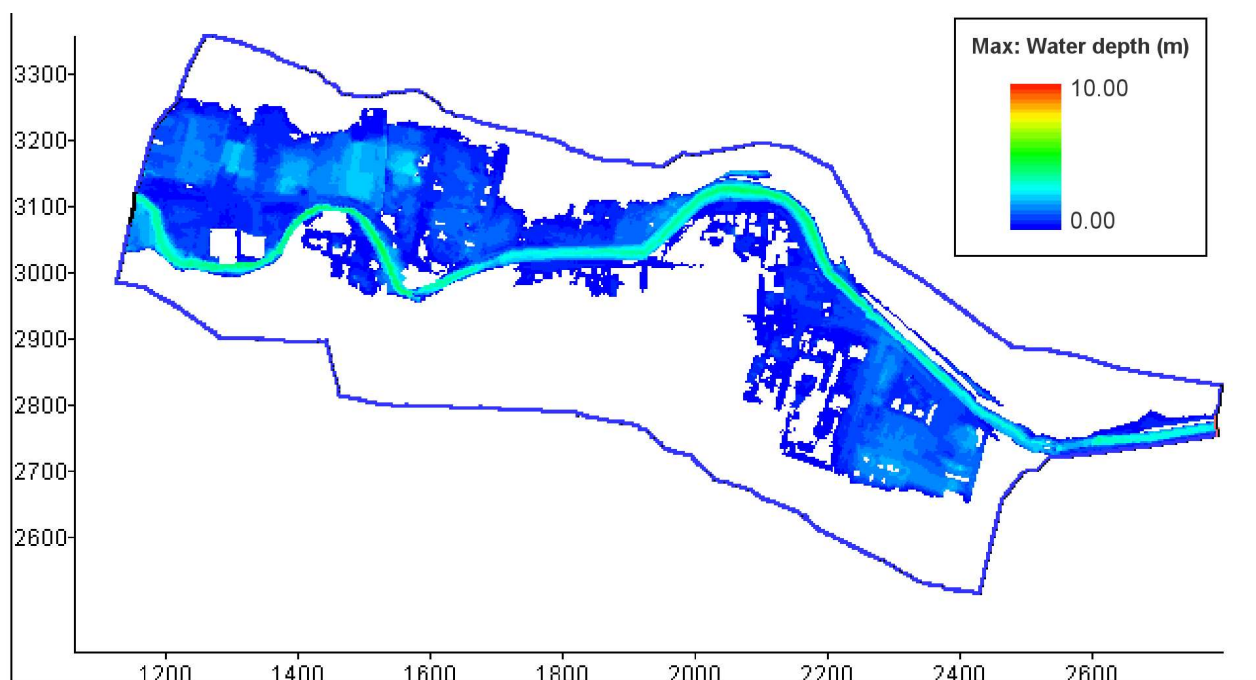


Figure 8. Peak water depths in Oullins for the 100 years flood ( calculation 50 with fences with openings with buildings with openings).

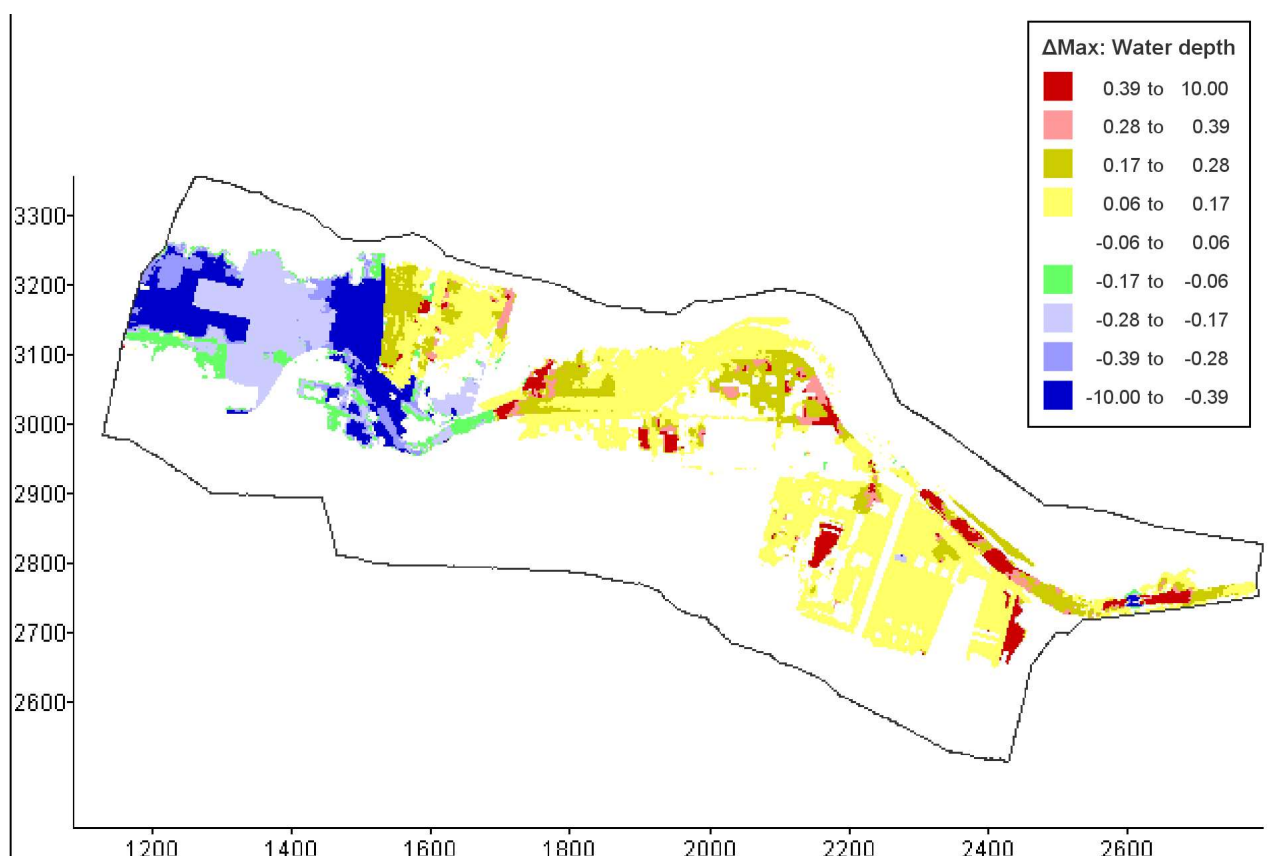


Figure 9. Difference of peak water depths in Oullins for the 100 years flood (calculation 51 without fences with buildings with openings less calculation 50 with fences with openings with buildings with openings).

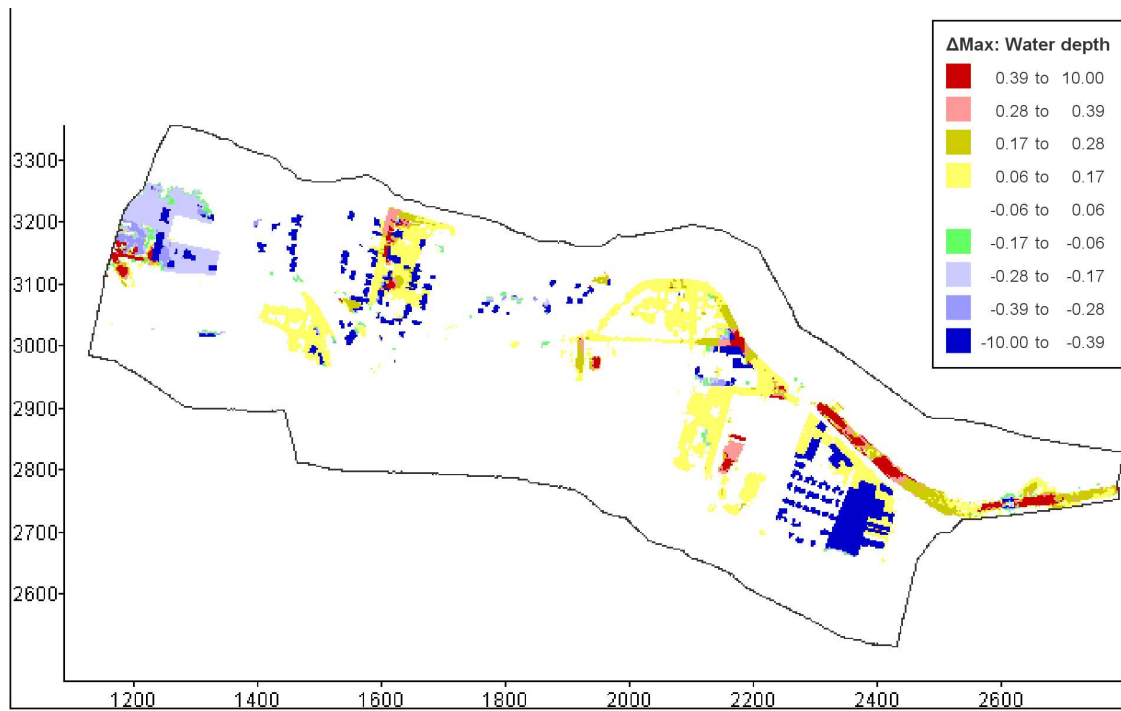


Figure 10. Difference of peak water depths in Oullins for the 100 years flood (calculation 49 with fences with openings with buildings with openings less calculation 50 with fences with openings with buildings with openings).

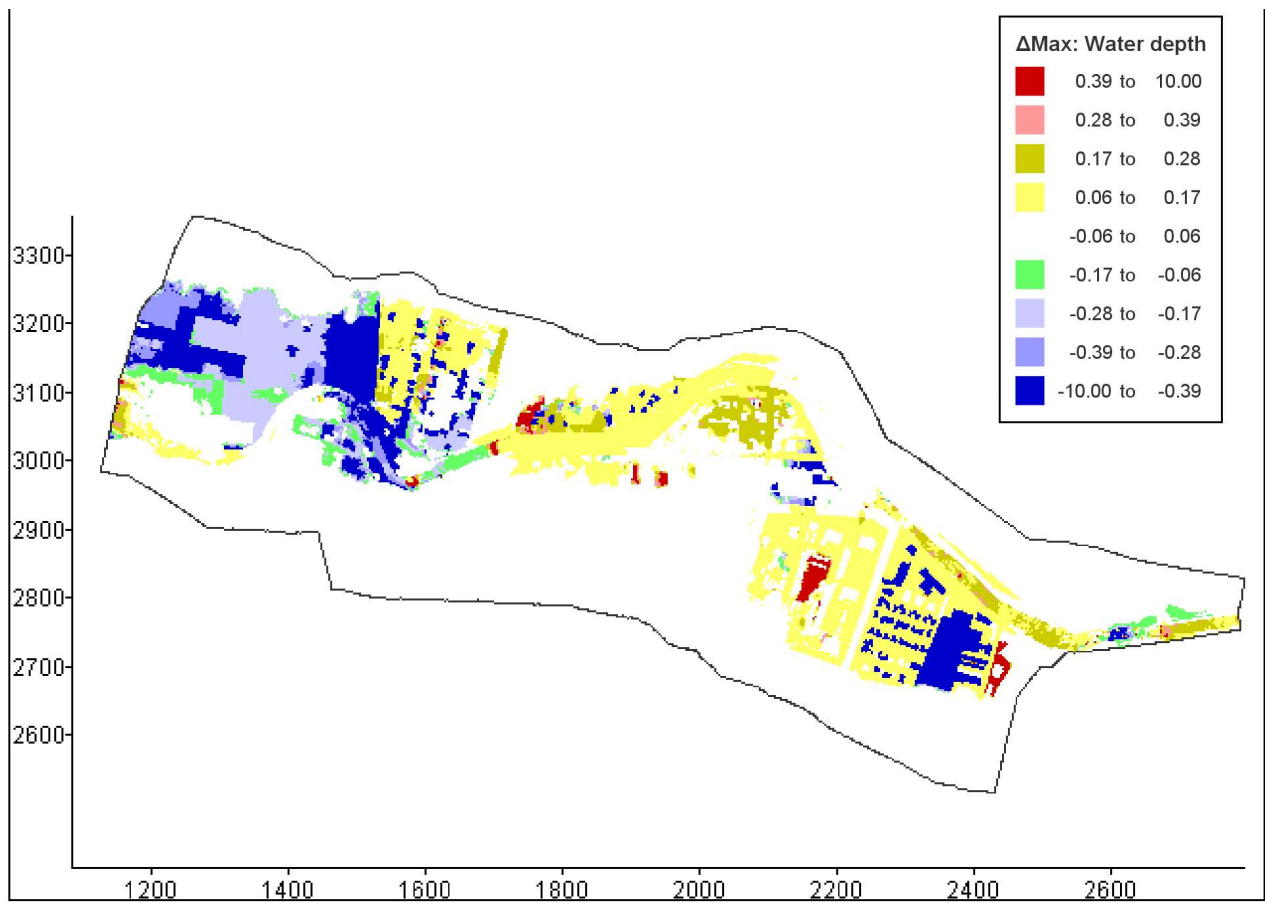


Figure 11. Difference of peak water depths in Oullins for the 100 years flood (calculation 47 without fences with buildings without openings less calculation 50 with fences with openings with buildings with openings).

## References

Benjamin Dewals, Vasileios Kitsikoudis, Miguel Angel Mejía-Morales, Pierre Archambeau, Emmanuel Mignot, et al.. Can the 2D shallow water equations model flow intrusion into buildings during urban floods?. Journal of Hydrology, 2023, 619, pp.129231. [⟨10.1016/j.jhydrol.2023.129231⟩](#). [⟨hal-04007606⟩](#)

Emmanuel Mignot, Loick Camusson, Nicolas Riviere. Measuring the flow intrusion towards building areas during urban floods: Impact of the obstacles located in the streets and on the facade. Journal of Hydrology, 2020, 583, pp.124607. [⟨10.1016/j.jhydrol.2020.124607⟩](#). [⟨hal-03234707⟩](#)

[Mejia Morales, M.A., Paquier, A., Proust, S., Mignot, E. 2020. Experimental and numerical modelling of the influence of street-block flow exchanges during urban floods. 5th International Conference SimHydro 2019 Advances in Hydroinformatics.](#)

Paquier, A., Bazin, P.H., El kadi Abderrezzak, K. 2019. Sensitivity of 2-D hydrodynamic modelling of urban floods to the forcing inputs: Lessons from two field cases. Urban Water Journal.

Paquier, A., Mangara, C., Mignot, E., Dewals, B. & Li, X. 2021. 2-D simulation of flow entering a building. Simhydro2021 conference proceedings. [Advances in Hydroinformatics](#).