

Étude et modélisation des processus physiques contrôlant les échanges d'eau entre les rues et les bâtiments lors d'une inondation urbaine

Cécile Choley

14 décembre 2023

Mme DELENNE Carole

M. LIPEME KOUYI Gislain

M. GARAMBOIS Pierre-André

M. GHENAIM Abdellah

M. MOSE Robert

M. FINAUD-GUYOT Pascal

Maître de conférences Polytech/Université de Montpellier

Professeur, INSA Lyon

Chargé de recherche, INRAE, Aix-Marseille Université

Professeur, INSA Strasbourg

Professeur, Université de Strasbourg

Maître de conférences Polytech/Université de Montpellier

Rapporteur

Rapporteur

Examineur

Examineur

Directeur de thèse

Directeur de thèse

I. Introduction

Contexte général

- inondation : submersion, rapide ou lente, d'une zone habituellement hors d'eau
- catastrophe naturelle dévastatrice, fréquente et qui touche tous les continents
- ville : lieu de concentration de la population et des activités économiques
 - gestion des inondations urbaines = enjeu majeur



Juillet 2021, Allemagne/Belgique
240 morts
des milliers de sinistrés
1 MD€ de dommages
(UNU-EHS et al. (2023))

Juillet/août 2022, Pakistan
1 700 morts
des millions de sinistrés
30 MD€ de dommages
(d'après Le Monde)

Septembre 2023, Libye
4 000 morts, des milliers de disparus
des centaines de milliers de sinistrés
plusieurs milliards d'euros de dommages
(d'après La Tribune Afrique)

L'inondation dans la ville

- phénomènes multiples et complexes
- modèles numériques 2D largement utilisés

pour simuler les inondations urbaines (Hunter

et al. (2008), Luo et al. (2022))



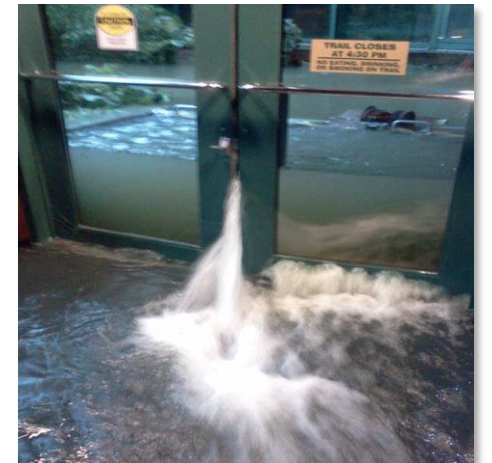
Carrefours, bifurcations



Obstacles



Échanges avec le réseau souterrain



Intrusion

En haut : Nîmes (France) en 1988. En bas : à Spa (Belgique) en 2021 à gauche, photo de l'INRAE d'après E. Mignot à droite

L'inondation et les bâtiments

- en zone rurale : négligés
- en ville : nombreux, effet potentiellement significatif sur l'écoulement
- Hingray (1999), Syme (2008), Smith et Wasko (2012), Huang et al. (2014) : essentiel de correctement prendre en compte les bâtiments dans la modélisation des inondations urbaines



Source : <https://www.youtube.com/watch?v=JleNlxYqbTo>

Effets des bâtiments sur l'inondation

- bloquent et stockent l'inondation
- dévient une partie des écoulements



Effet de blocage



Effet de stockage temporaire/définitif

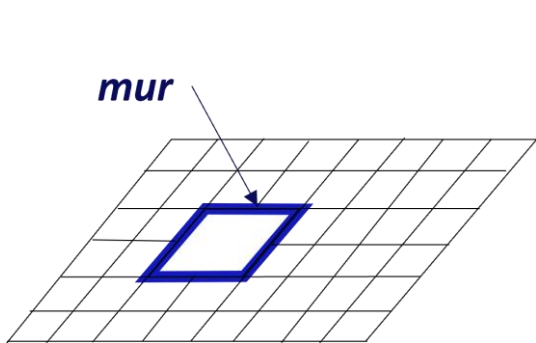
- pratiques classiques de prise en compte
des bâtiments dans les modèles fins
cohérentes avec ces phénomènes ?



Effet de court-circuit

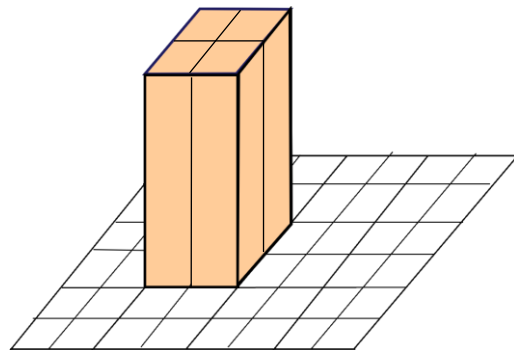
*En haut : le Gave d'Oloron en 2022, d'après le Figaro (à gauche), inondation 2021 en Ile-de-France, d'après La Marne (à droite)
En bas : à Vaison la Romaine en 1992, d'après Météo France à gauche et l'INA à droite*

Prise en compte des bâtiments dans les modèles fins



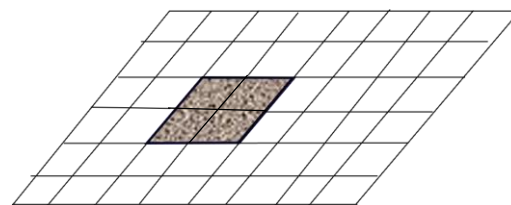
Bâtiment trou*

Condition limite « mur »



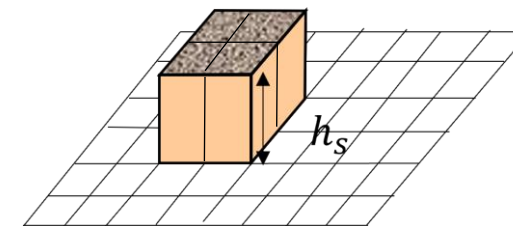
Bâtiment bloc*

Bâti surélevé jusqu'au toit



Bâtiment rugueux*

Rugosité locale augmentée



Bâtiment surélevé**

Élévation de quelques dizaines de cm
(+ rugueux)

Effet	Bâtiment trou	Bâtiment bloc	Bâtiment rugueux	Bâtiment surélevé
Blocage	✓	✓	~	~
Stockage temporel	✗	✗	~	~
Stockage définitif	✗	✗	✗	✗
Court-circuit	✗	✗	~	~

*Schubert et Sanders (2012)
Mustafa et Szydłowski (2021)

**Shen et al. (2018)
Iliadis et al. (2023)

➤ aucune approche ne tient compte de tous les effets, aucun stockage parfait

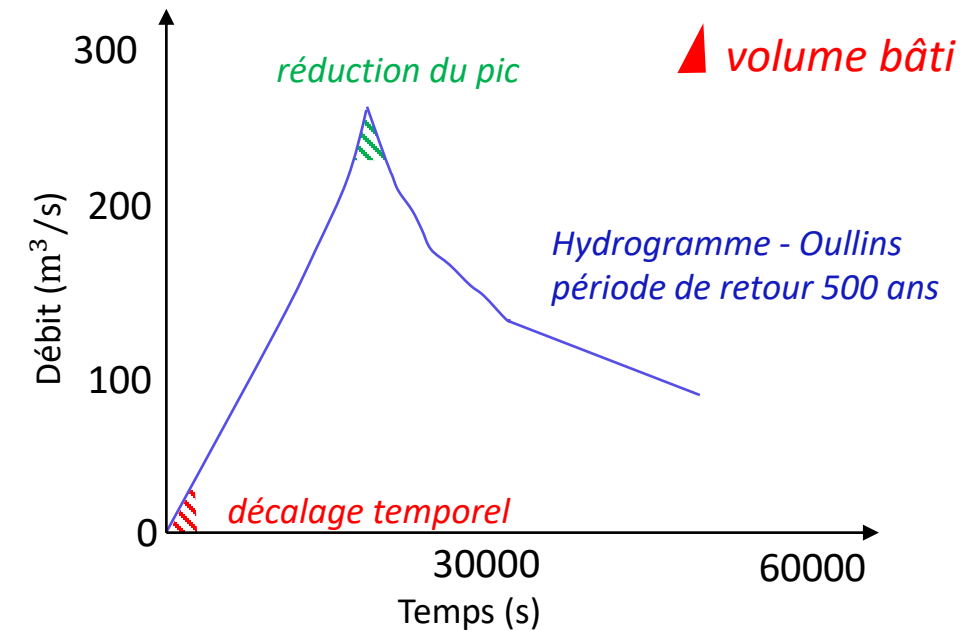
Rôle du stockage des bâtiments

- effet de stockage du bâti sur Oullins
- si les bâtiments se remplissent dès le début
= décalage de l'arrivée de l'hydrogramme (43 min)
- si les bâtiments se remplissent au moment du pic
= réduction du débit de pointe (12 %)
- influence potentiellement significative sur l'écoulement
- besoin de représenter simultanément les dynamiques de crue et de stockage = représenter les échanges rue-bâti

Enveloppe inondable et bâti Oullins



Hydrogramme et déduction du volume du bâti



Objectifs et méthode

Objectifs :

- Les échanges rue-bâti sont-ils importants ?
- Dans quelles configurations doit-on les modéliser ?

Méthode :

- étudier les effets des échanges rue-bâti à l'aide d'un outil opérationnel
 - construction d'un outil
 - études de cas réalistes + sensibilité des résultats

Plan

I. Introduction

II. Présentation du modèle

III. Effet des échanges rue-bâti dans une rue

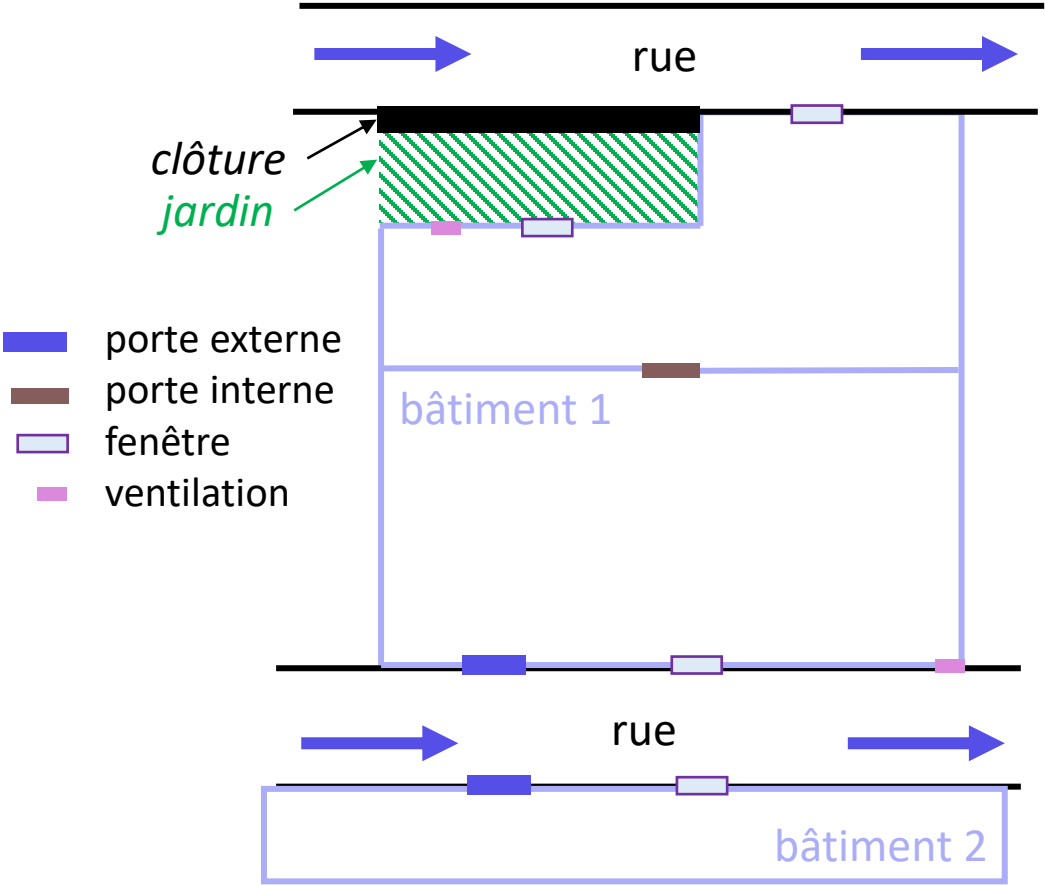
IV. Effet des échanges rue-bâti dans un quartier

V. Conclusion et perspectives

II. Présentation du modèle

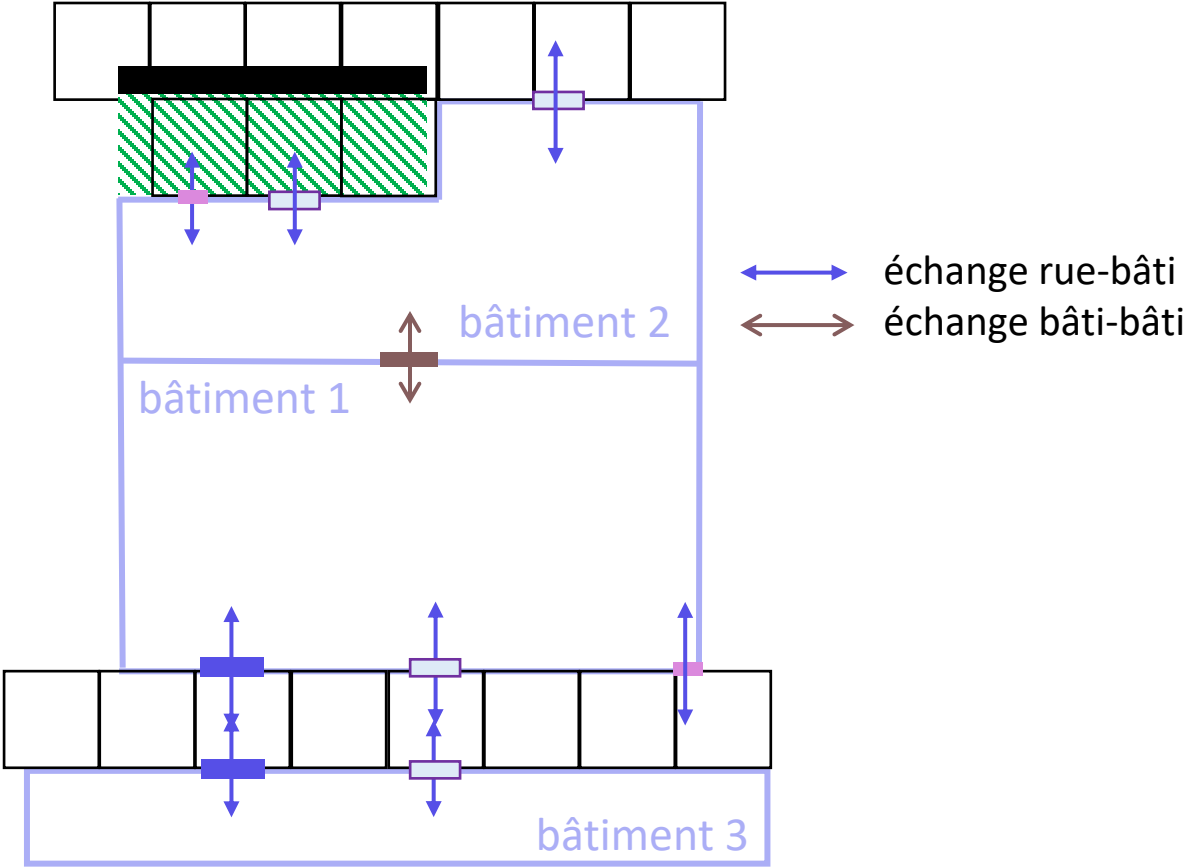
Concept

Réalité



Modèle

mailles + calcul 2D



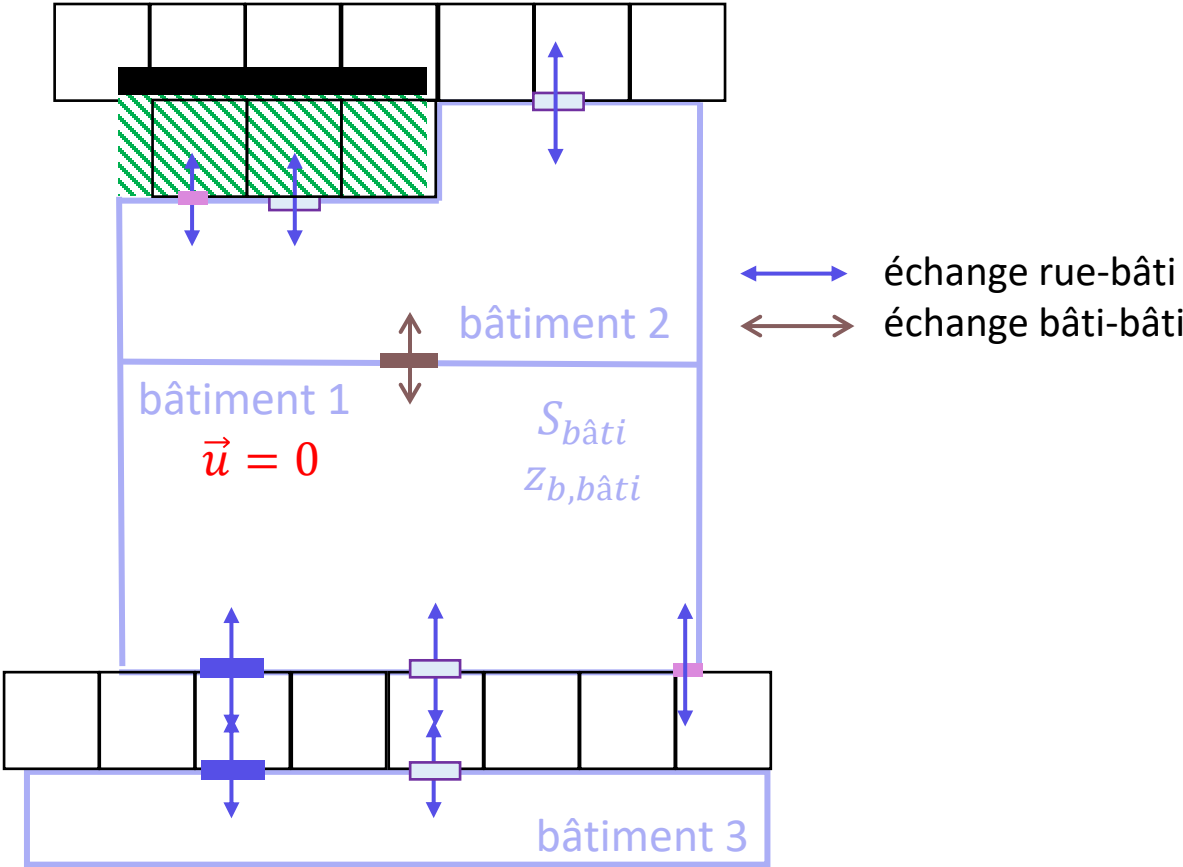
Concept

- hauteur dans le bâtiment : loi de conservation de la masse

$$\frac{dh_{b\hat{a}ti}}{dt} = \frac{\sum_{i \in N} Q_i}{S_{b\hat{a}ti}}$$

Modèle

mailles + calcul 2D



Modifications des équations de Saint-Venant

- équations Saint-Venant 2D décrivent l'écoulement dans la rue (code SW2D)
- ajout d'un **nouveau terme source B** dans un code existant

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = S - B$$

$$U = \begin{bmatrix} h \\ q \\ r \end{bmatrix}; F = \begin{bmatrix} q \\ \frac{q^2}{h} + \frac{1}{2}gh^2 \\ \frac{qr}{h} \end{bmatrix}; G = \begin{bmatrix} r \\ \frac{qr}{h} \\ \frac{r^2}{h} + \frac{1}{2}gh^2 \end{bmatrix}; S = \begin{bmatrix} 0 \\ gh(S_{0,x} - S_{f,x}) \\ gh(S_{0,y} - S_{f,y}) \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} q_b \\ \alpha_x q_b \\ \alpha_y q_b \end{bmatrix} \left. \vphantom{\begin{matrix} q_b \\ \alpha_x q_b \\ \alpha_y q_b \end{matrix}} \right\} \begin{matrix} \text{échange de masse} \\ \text{quantité de mouvement} \end{matrix}$$

$q_b = \frac{\sum_{i \in N} Q_i}{S}$: la somme des i débits échangés de la maille avec les bâtiments avec lesquels il est connecté par unité de surface

α_x et α_y dépendent du sens de l'échange :

	q_b	α_x	α_y
remplissage du bâtiment	$q_b > 0$	u	v
vidange du bâtiment	$q_b < 0$	0	0

- besoin de calculer Q , le débit d'échange à travers une ouverture

Débit vers le bâtiment

➤ Q dans la réalité :

- à travers différents chemins d'écoulement
- portes/fenêtres ouvertes = + grandes sections d'écoulement

➔ étudiées en priorité

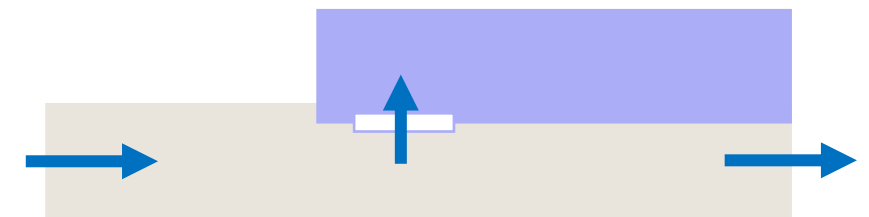
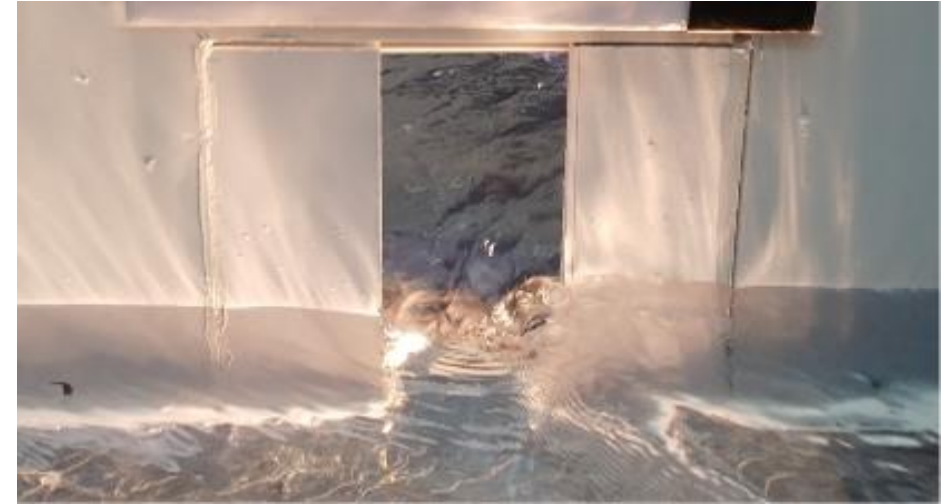
- pas de loi construite pour donner le débit à travers ces ouvrants dans la littérature



Sources (de gauche à droite) : INRAE, <https://www.youtube.com/watch?v=JleNlxYqbTo>, Le Parisien, Salagnac et al. (2014)

Débit entre rue et bâtiment

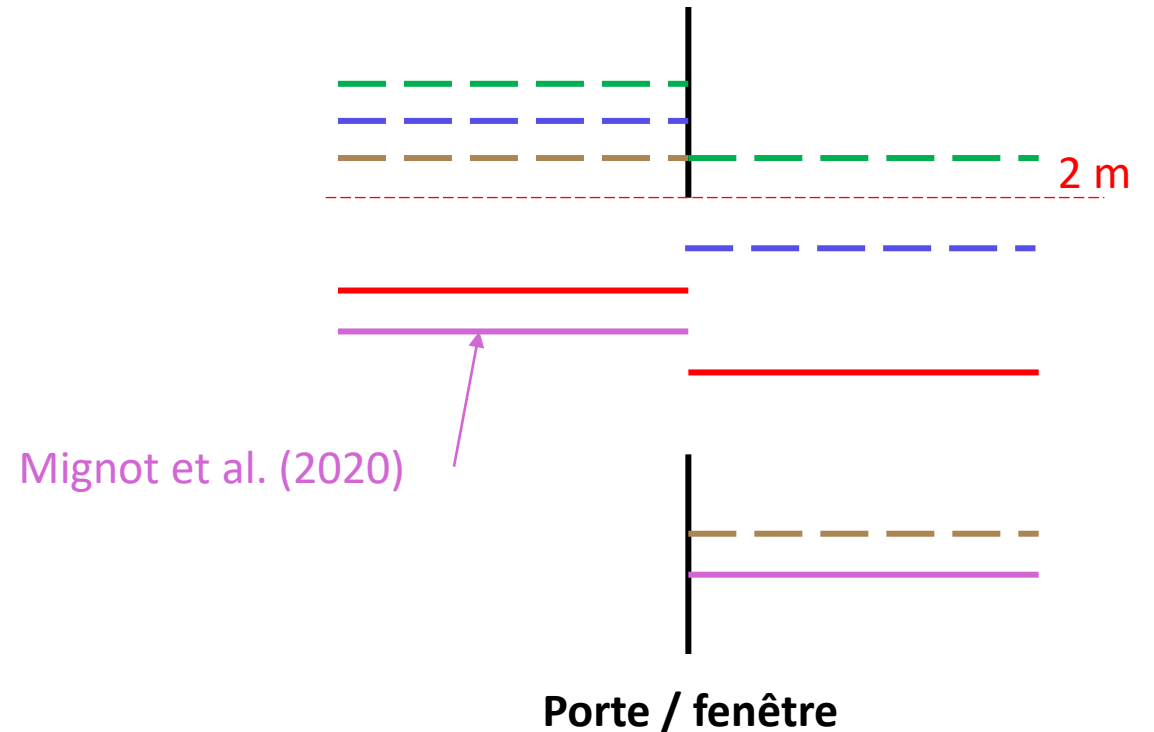
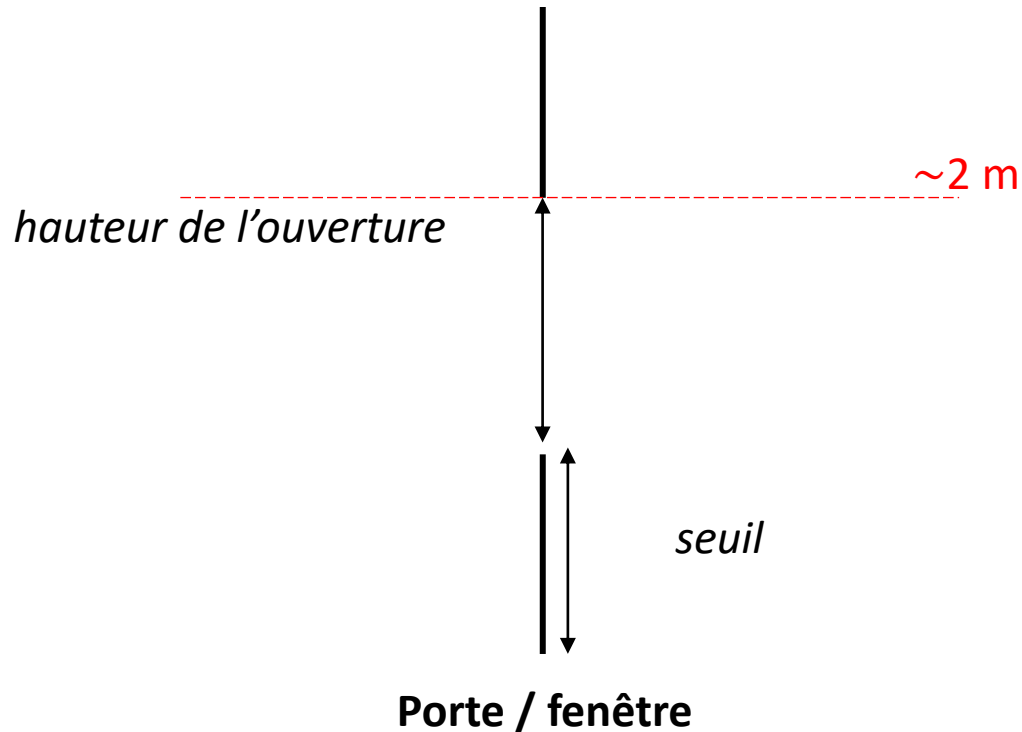
- un travail expérimental (Mignot et al. (2020))
 - rue connectée à un bâtiment par porte/fenêtre
 - débit mesuré à travers l'ouvrant ouvert
 - comparaison débit expérimental avec débit théorique calculé à partir de formules de seuil dénoyé
 - écart débit expérimental/théorique $\leq 10\%$
- ➔ configurations étudiées limitées



d'après E. Mignot

Configurations des niveaux d'eau aux abords d'une ouverture

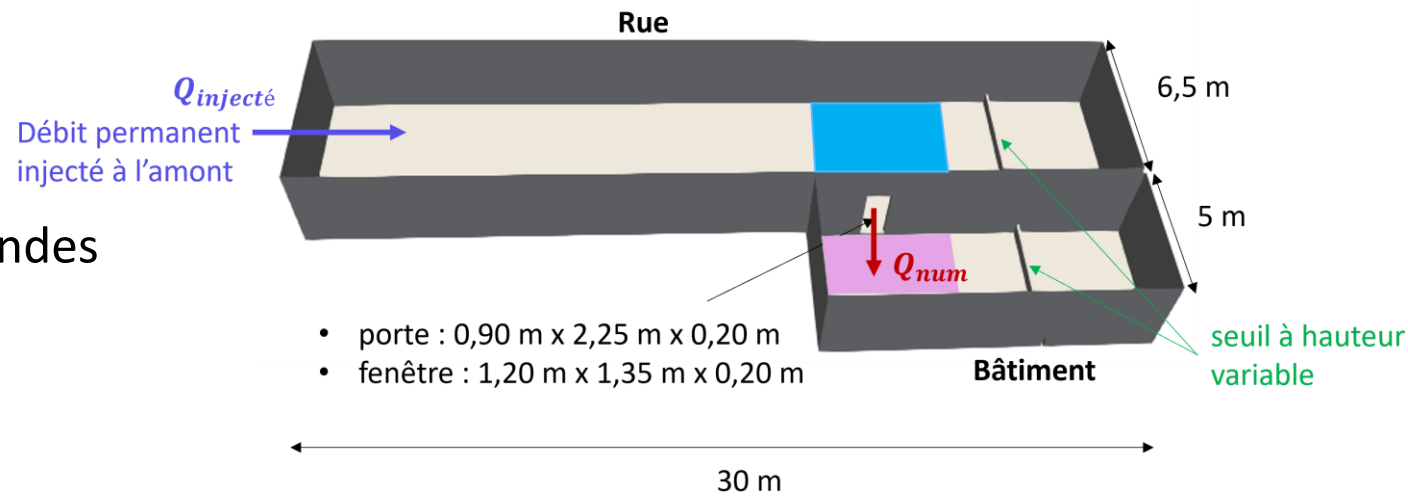
- porte/fenêtre : géométrie similaire
- dimensions variables selon l'ouvrant
- connaître l'écoulement à travers une ouverture
- ➔ nécessite de l'étudier dans les multiples configurations qui existent



Modélisation 3D des échanges à travers une ouverture

- simulations 3D pour balayer les différentes configurations
- logiciel OpenFOAM®, turbulence : RANS k-om SST
- paramètres validés sur expérience
- régime quasi-permanent atteint :
 - débit ouverture Q_{num} : moyenne du débit sortant du bâtiment sur les 5 dernières secondes
 - hauteur rue h_{am} : moyenne spatiale
 - hauteur bâti h_{av} : moyenne spatiale

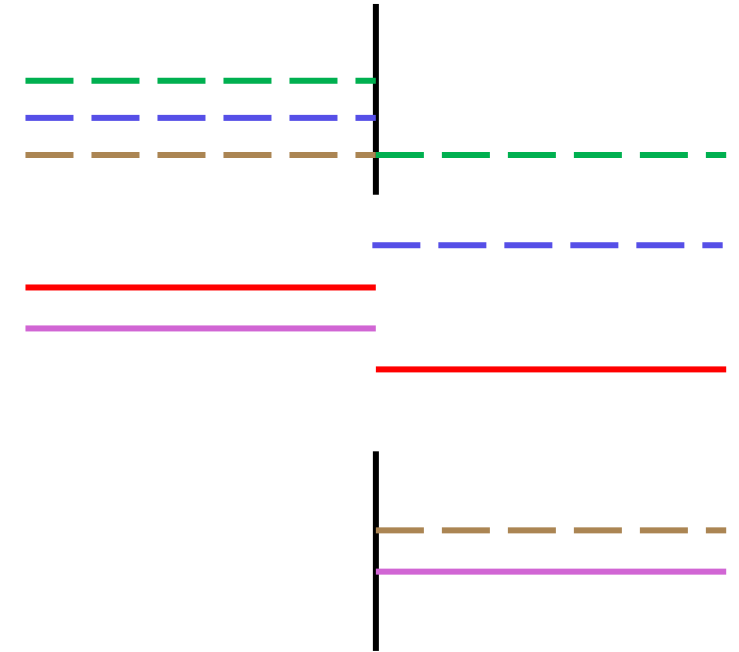
Nombre total de simulations	52
Débit injecté	[4 ; 60] m ³ /s
Hauteur des seuils à l'aval de la rue et du bâtiment	[0,25 ; 2,00] m
Hauteur d'eau dans la rue	[0,85 ; 3,40] m
Hauteur d'eau dans le bâtiment	[0,64 ; 2,53] m



Lois de débit de la littérature

- dans quelles mesures les lois de la littérature permettent-elles de bien représenter le débit échangé ?

Seuil dénoyé	$Q = C_d^{SD} L \sqrt{2g} h_{s,am}^{3/2}$
Seuil noyé	$Q = C_d^{SN} L \sqrt{2g} h_{s,av} \sqrt{h_{s,am} - h_{s,av}}$
Orifice dénoyé	$Q = C_d^{OD} L \sqrt{2g} \frac{2}{3} [h_{s,am}^{3/2} - (h_{s,am} - h_o)^{3/2}]$
Orifice partiellement noyé	$Q = C_d^{OPN} L \sqrt{2g} \left\{ \frac{2}{3} [h_{s,am}^{3/2} - (h_{s,am} - h_o)^{3/2}] + h_{s,av} \sqrt{h_{s,am} - h_{s,av}} \right\}$
Orifice noyé	$Q = C_d^{ON} L \sqrt{2g} h_o \sqrt{h_{s,am} - h_{s,av}}$



h_o est la hauteur de l'ouverture, $h_{s,am}$ et $h_{s,av}$ sont les hauteurs amont/aval au-dessus de la crête
 L est la largeur de l'ouverture, g est la constante gravitationnelle

- 5 coefficients de débit C_d à déterminer

Calage des coefficients de débit

- calage des C_d pour limiter le RMSE sur les débits calculés avec une même loi
- simulations portes et fenêtres regroupées
- erreur = $\frac{Q_{théo} - Q_{num}}{Q_{num}}$ (%) où $Q_{théo}$ est le débit calculé à partir des lois de la littérature

Loi	Nombre de simulations	Coefficient de débit calé	$\left \frac{Q_{théo} - Q_{num}}{Q_{num}} \right $
Seuil dénoyé	21	0,311	27 %
Seuil noyé	8	0,503	28 %
Orifice dénoyé	1	0,490	0 %
Orifice partiellement noyé	19	0,552	28 %
Orifice noyé	3	0,587	16 %

- lois intégrées dans le code 2D

Résolution de l'algorithme dans le bâtiment

- *time splitting* : résolution successive de la partie hyperbolique (calcul 2D dans la rue) et des termes sources
- pas de temps de la résolution du terme source B fixé par la partie hyperbolique
- calcul du débit Q pour toutes les ouvertures
- corrections du débit Q
- mise à jour des variables
- code validé sur 6 cas tests

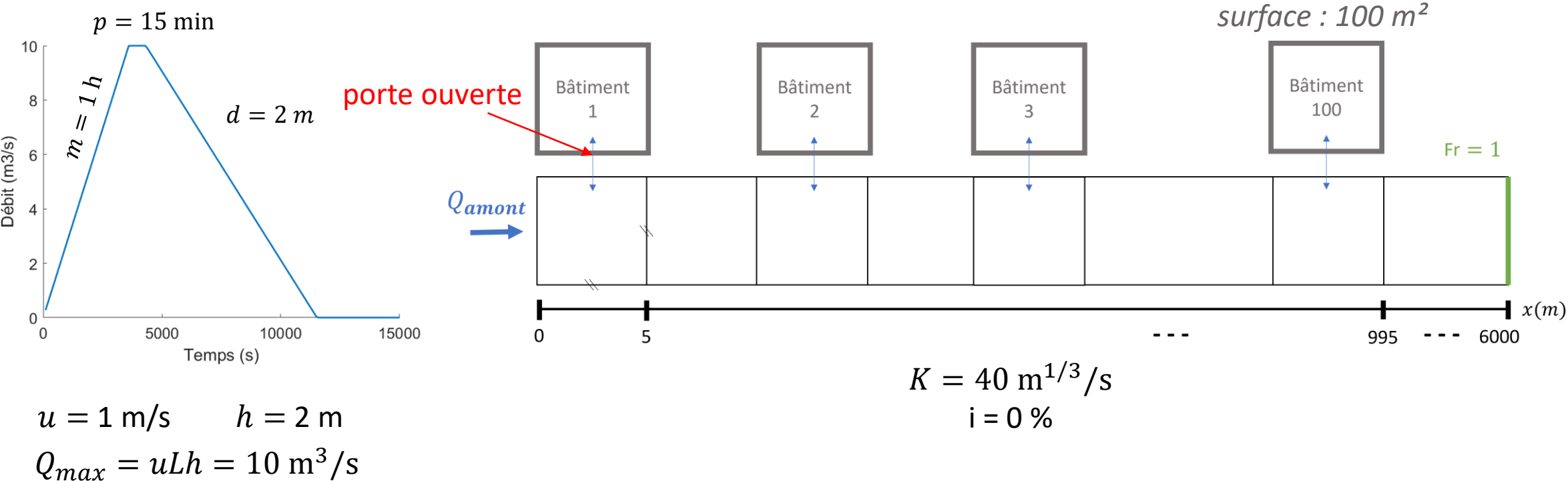
Bilan du modèle

- les équations de Saint-Venant sont modifiées pour intégrer les échanges avec les bâtiments
- les bâtiments sont des réservoirs qui échangent de l'eau avec la rue
- le débit d'échange est calculé via une combinaison de 5 lois
- l'erreur sur le débit échangé est estimée à 30 %
- intérêt à réduire cette erreur seulement si les résultats sont sensibles à cette erreur

III. Effet des échanges rue-bâti dans une rue

Géométrie simplifiée utilisée

- objectif : observer et comprendre les effets des échanges rue-bâti (RB) dans une rue
- rue longue avec de nombreux bâtiments (identiques) pour exacerber les effets

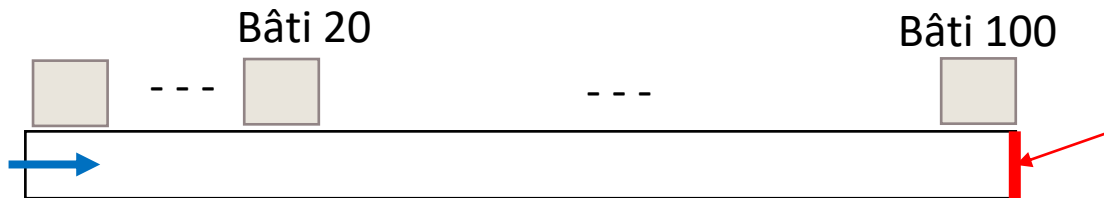
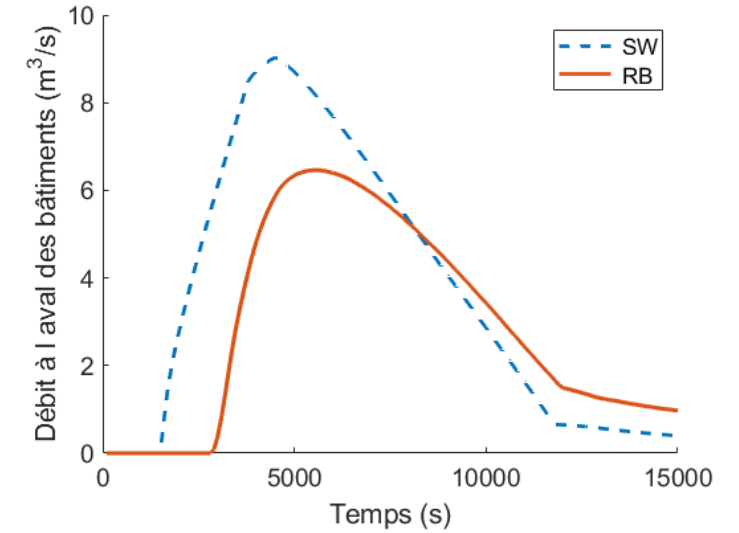


$$u = 1 \text{ m/s} \quad h = 2 \text{ m}$$

$$Q_{max} = uLh = 10 \text{ m}^3/s$$

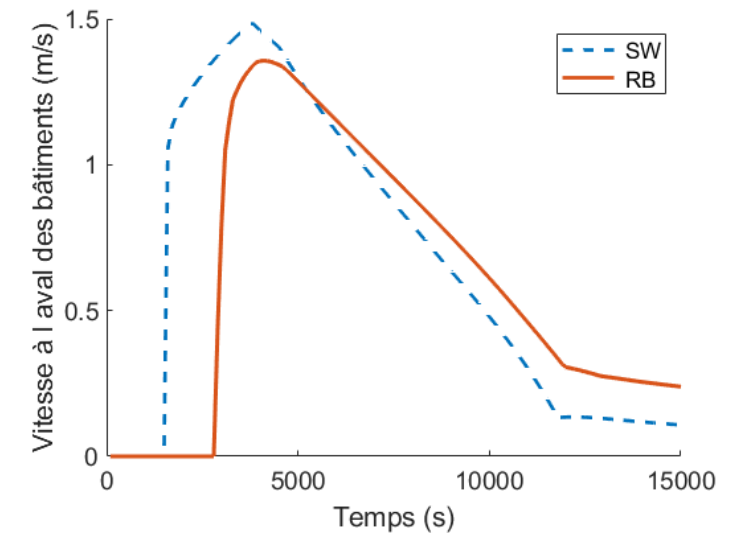
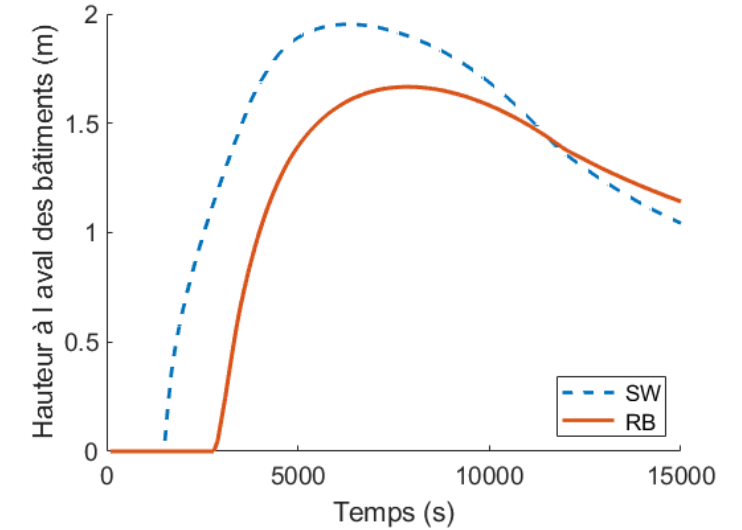
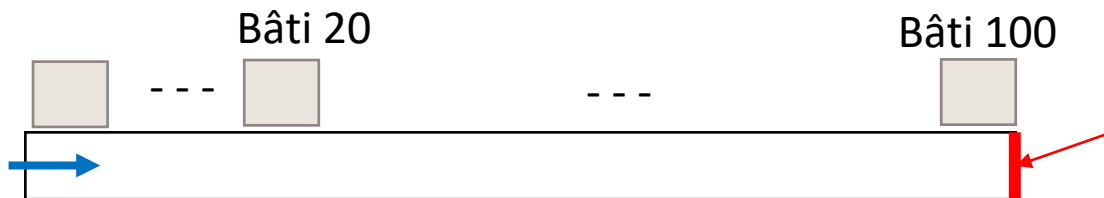
Effets des échanges rue-bâti à l'aval des bâtiments

- comparaison des résultats sans (SW) et avec échanges rue-bâti (RB)
 - décalage de la date du début de l'inondation : 23 min
 - décalage de la date du pic de débit : 17 min
 - réduction du débit de pointe : 28 %



Effets des échanges rue-bâti à l'aval des bâtiments

- comparaison des résultats sans (SW) et avec échanges rue-bâti (RB)
 - décalage de la date du début de l'inondation : 23 min
 - décalage de la date du pic de débit : 17 min
 - réduction du débit de pointe : 28 %
 - décalage de la date du pic de hauteur : 27 min
 - réduction de la hauteur maximale : 15 %
 - décalage de la date du pic de vitesse : 5 min
 - réduction de la vitesse maximale : 18 %
- impact significatif des échanges RB sur la rue

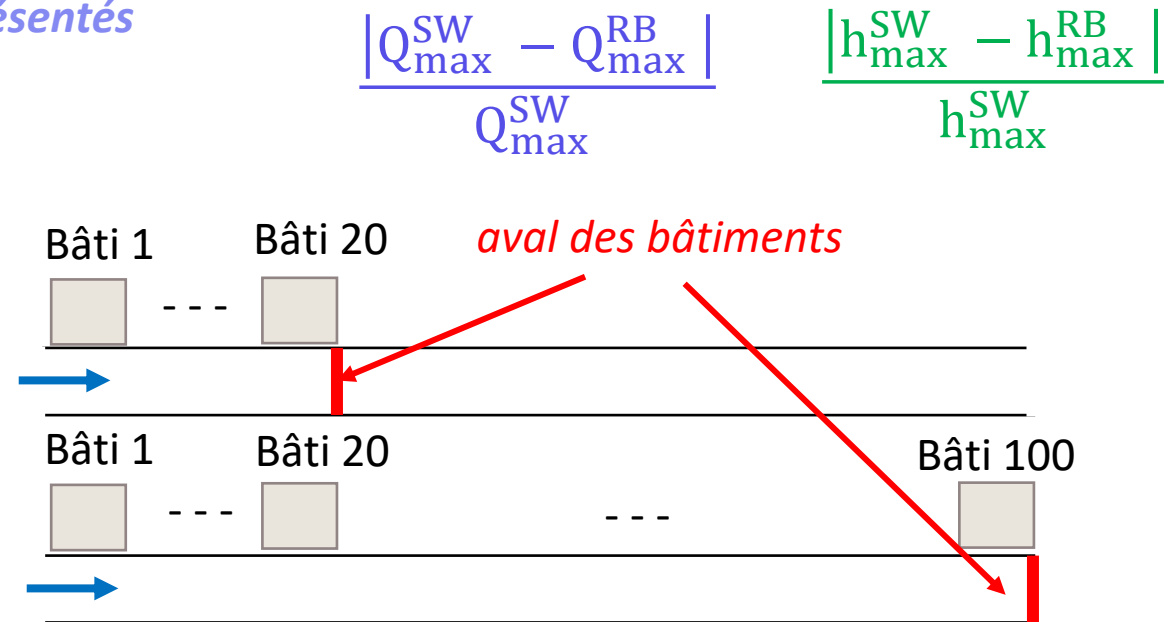


Analyse de sensibilité : méthode

- objectif : caractériser la sensibilité des effets des échanges RB aux paramètres hydrauliques et du modèle
- méthode : 1 paramètre varié à la fois
- comparaison : 1 simu avec échanges (RB) VS 1 simu équivalente sans échange (SW)
- paramètres étudiés dans le mémoire :

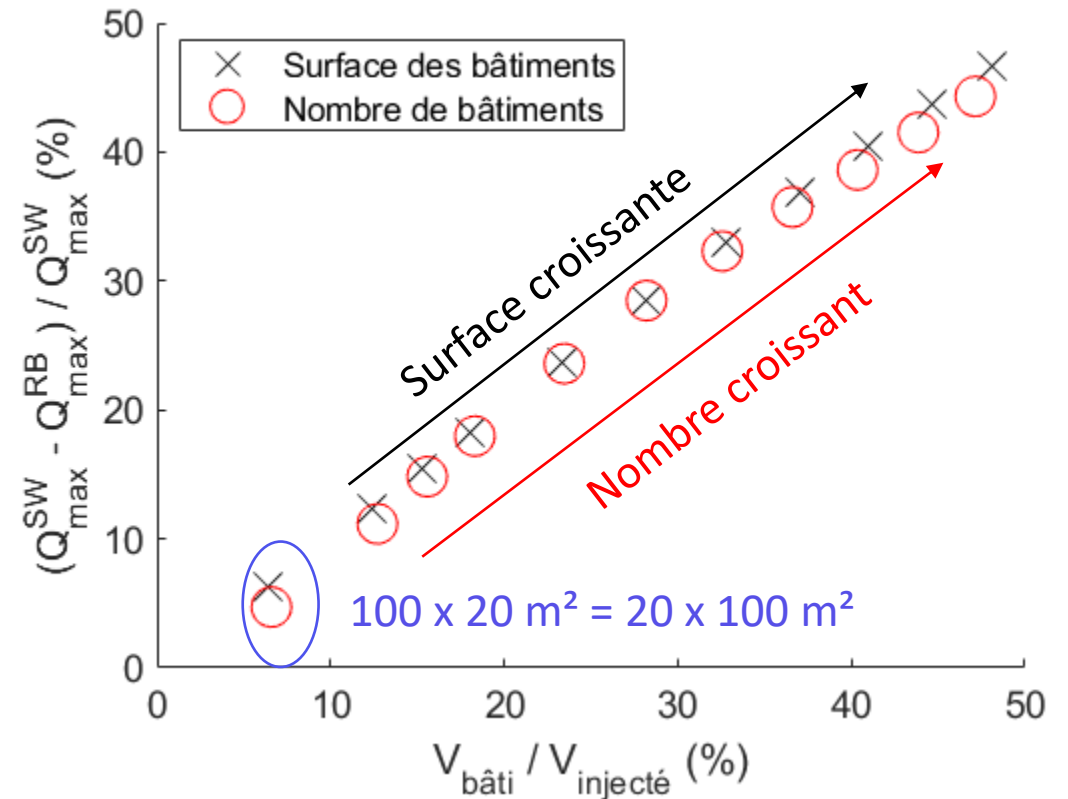
résultats présentés

- débit de pointe à l'aval des bâtiments
- hauteur maximale à l'aval des bâtiments
- hauteur maximale à l'amont des bâtiments
- vitesse maximale à l'amont des bâtiments
- inondation dans les bâtiments



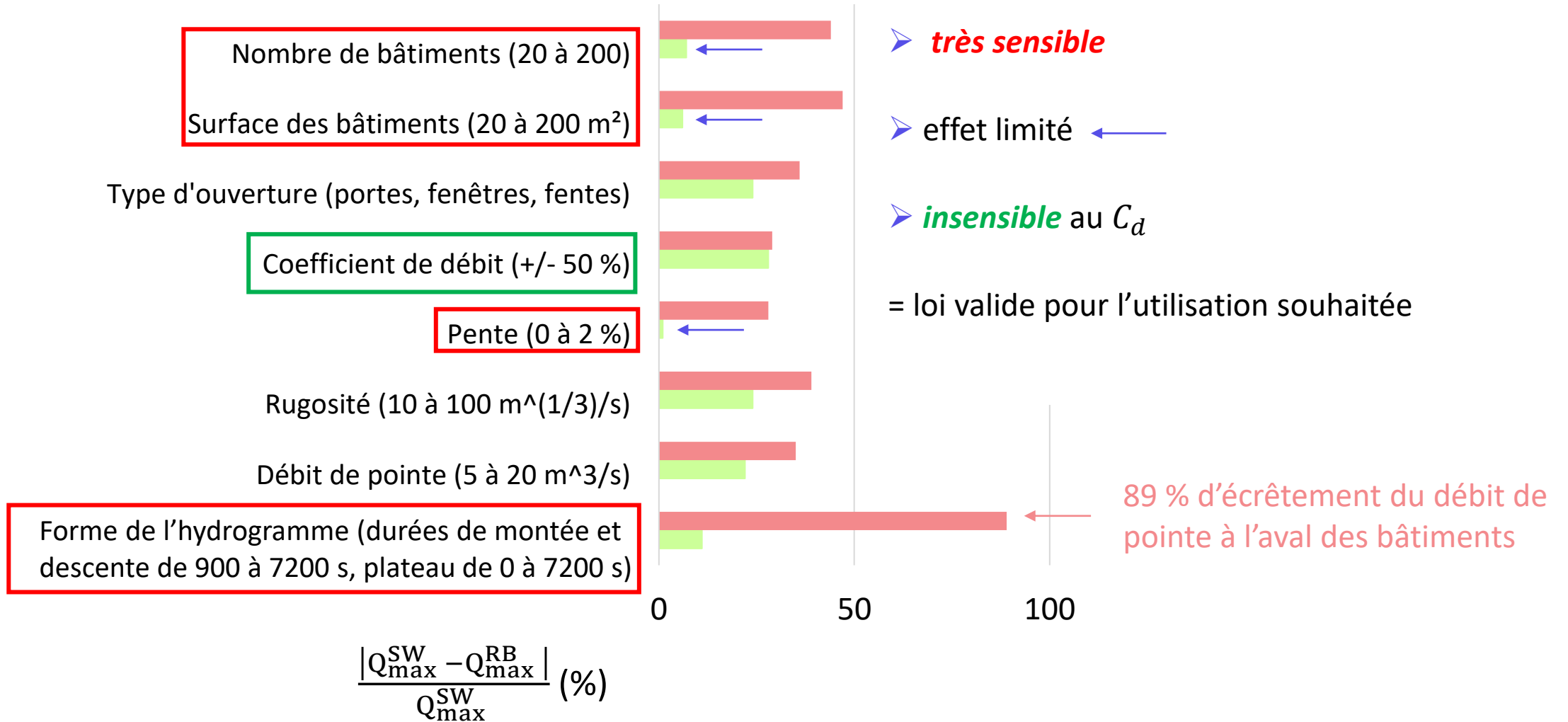
Sensibilité à la surface et au nombre de bâtiments

- surface de bâtiments : de 20 à 200 m² (nombre = 100)
- écrêtement croissant avec le volume stocké
- volume stocké augmente avec la surface
- nombre de bâtiments : de 20 à 200 (surface = 100 m²)
- écrêtement croissant avec le nombre
- même effet sur le débit de pointe à surface totale équivalente



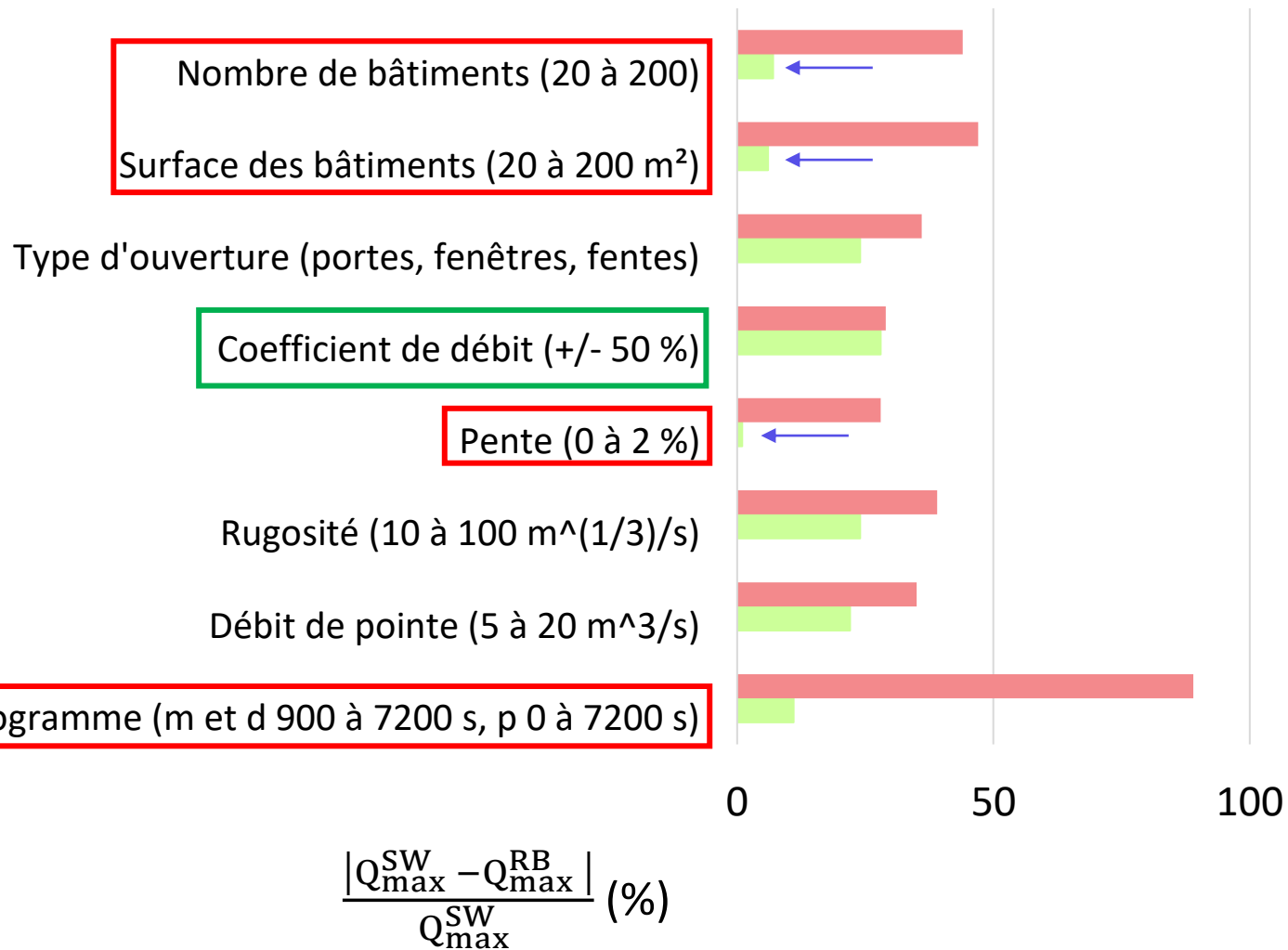
Bilan de l'analyse de sensibilité

■ Maximum ■ Minimum



Bilan de l'analyse de sensibilité

■ Maximum ■ Minimum



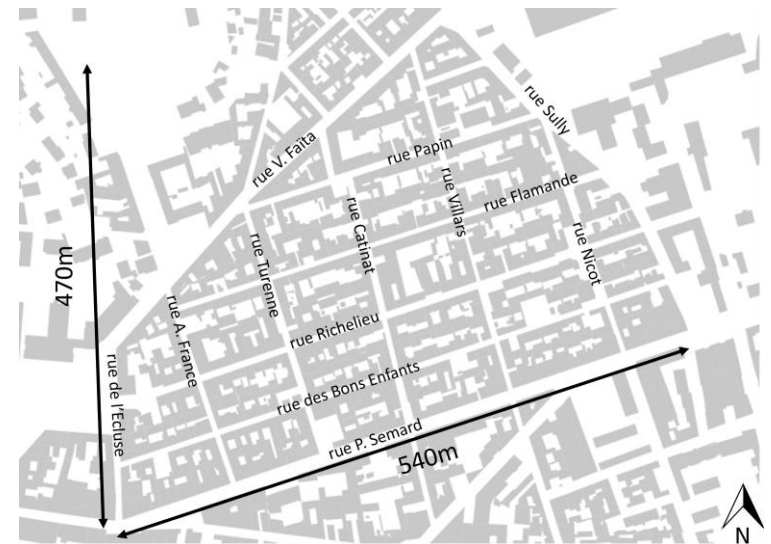
➤ mêmes observations sur la modification de la hauteur maximale à l'aval des bâtiments



IV. Effet des échanges rue-bâti dans un quartier

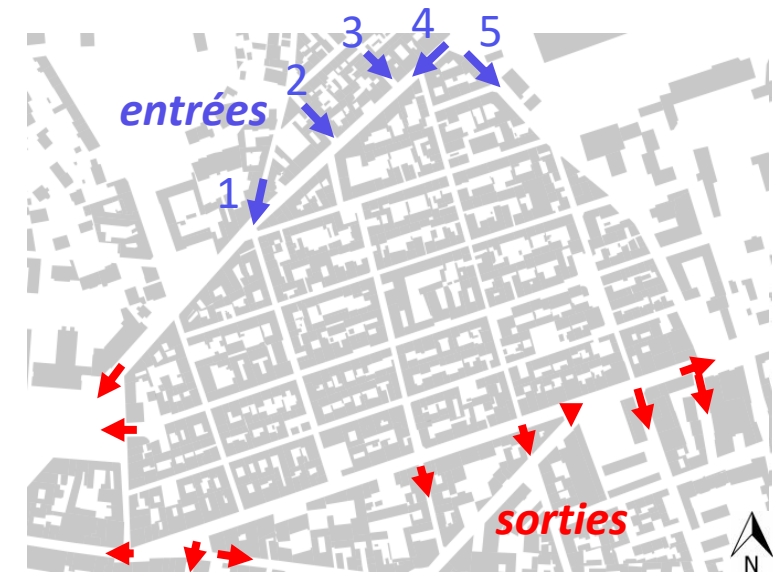
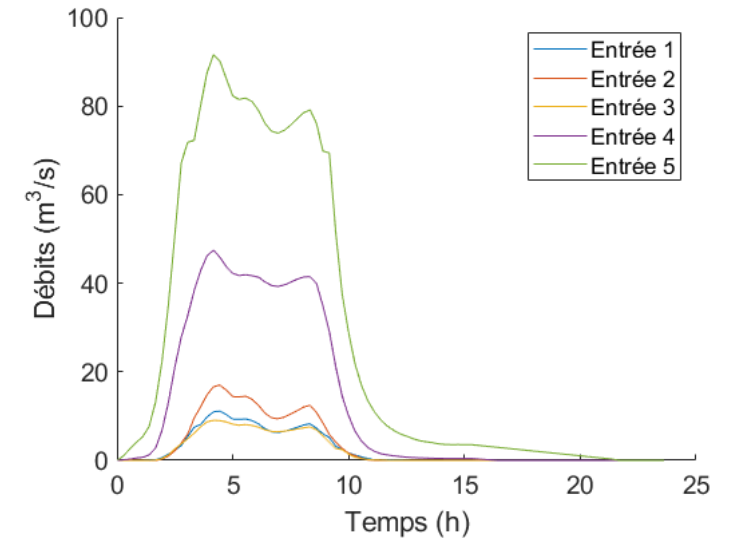
Présentation du quartier

- objectif : observer les effets des échanges RB dans un quartier réaliste
- simulation d'une partie du quartier Richelieu (Nîmes)
 - géométrie complexe
 - façades bâtiments adjacentes à la rue
 - site d'étude ANR : données disponibles
- évènement majeur : inondation 1988
 - période de retour : 150 – 200 ans
 - 3,35 m d'eau à l'amont



Modélisation des rues

- maillage du réseau de rues autour des blocs : 1452 cellules
- côte de chaque maille à partir du RGE ALTI® (13/02/2020)
- $K = 40 \text{ m}^{1/3} / \text{s}$
- hydrogrammes injectés à l'amont
 - volume : 4 M de m^3
 - pic de débit : $176 \text{ m}^3 / \text{s}$ ($92 \text{ m}^3 / \text{s}$ r. Sully, $47 \text{ m}^3 / \text{s}$ amont r. Faïta)
 - durée du pic : 12 h
 - durée de l'inondation : 24 h
- cotes de la surface libre fixées à l'aval



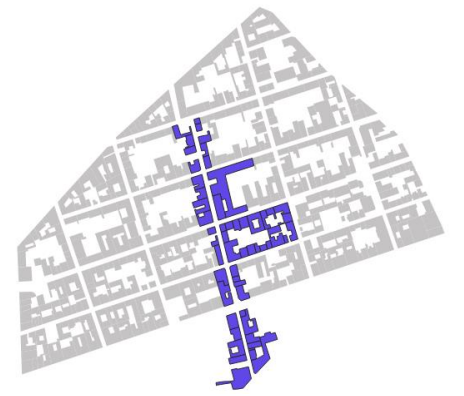
Modélisation des bâtiments

- empreinte de la BD TOPO® (2020-12-15)
- bâtiments adjacents au réseau de rues : 438 bâtiments
- pas de données sur la topographie des bâtiments
 - 1 bâti = 1 pièce vide
 - cote sol : moyenne du RGE ALTI® dans l'empreinte



Ouvertures réelles

- bâtiment réel contient des ouvertures
 - position et dimensions non capitalisées
- sortie terrain : deux agents de l'INRAE ont collecté les dimensions de 763 ouvertures rue Catinat + un bloc (1 j)
- estimation toute la zone : 8 j (endroits inaccessibles)



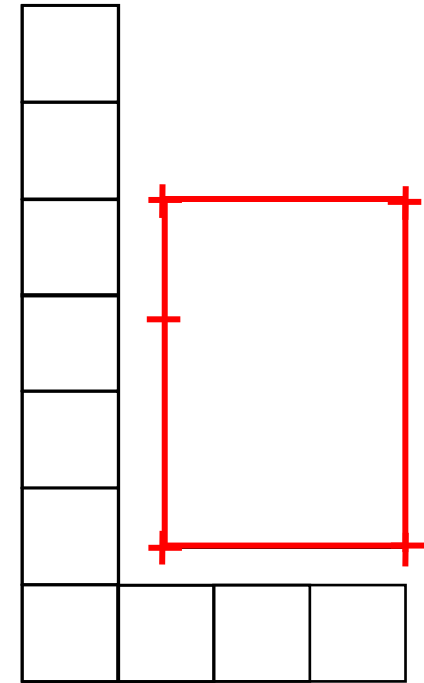
Source : INRAE

	Largeur moyenne +/- écart-type (m)	Hauteur de seuil moyenne +/- écart-type (m)	Hauteur d'ouverture moyenne +/- écart-type (m)	Nombre d'ouvertures moyen par mètre +/- écart-type (m^{-1})
Fenêtre	1,10 +/- 0,38	1,12 +/- 0,27	1,83 +/- 0,39	0,12 +/- 0,10
Porte	1,05 +/- 0,26	0,19 +/- 0,13	2,52 +/- 0,32	0,07 +/- 0,08

Ouvertures modélisées

➤ Positions :

- empreinte bâtiment BD TOPO®
- façade découpée en segments



 *segment*

Ouvertures modélisées

➤ Positions :

- empreinte bâtiment BD TOPO®
- façade découpée en segments
- façades adjacentes : milieu de segment
- associé à une maille
- un couple porte/fenêtre
- total : 1360 ouvertures

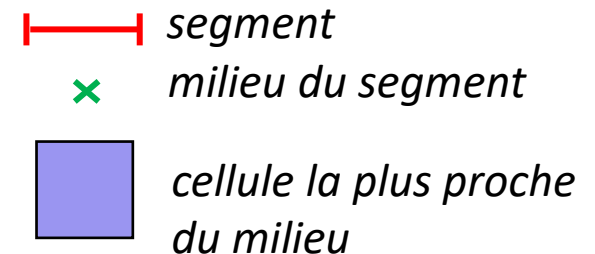
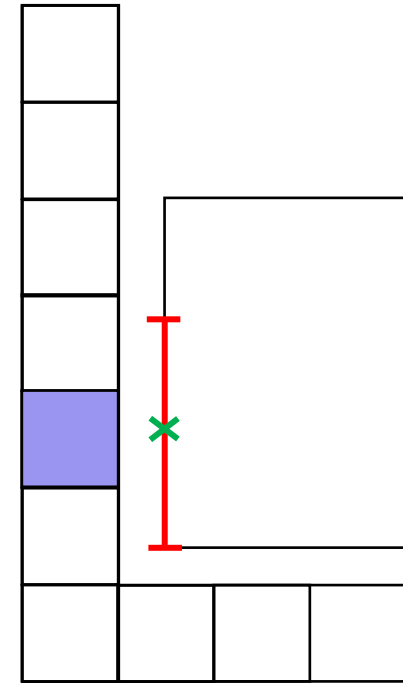
➤ Dimensions :

- largeur d'un ouvrant selon la longueur du segment (L_{seg}) :

$$L_{seg} \times \bar{l} \times nb$$

\bar{l} : largeur moyenne des portes ou fenêtres
 nb : nombre de portes ou fenêtres par m

- hauteur du seuil et de la porte/fenêtre : moyennes relevées sur le terrain



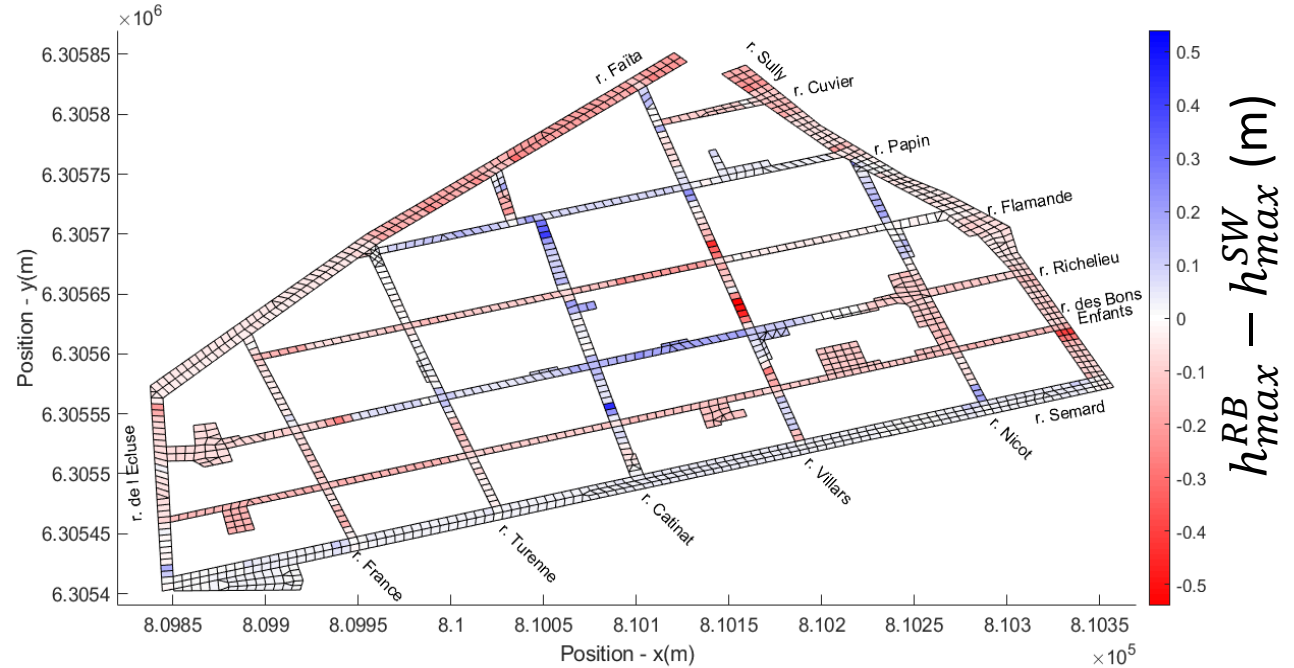
Effet des échanges rue-bâti avec des ouvrants ouverts

- comparaison avec échanges rue-bâti à travers des ouvrants ouverts (RB) et sans échange (SW)

- $\Delta h_{max} = h_{max}^{RB} - h_{max}^{SW} \in [-0,54 ; 0,43] \text{ m}$

$|\Delta h_{max}| > 10 \text{ cm} : 32 \% \text{ des cellules}$

Différence des hauteurs maximales SW et RB (m)



Effet des échanges rue-bâti avec des ouvrants ouverts

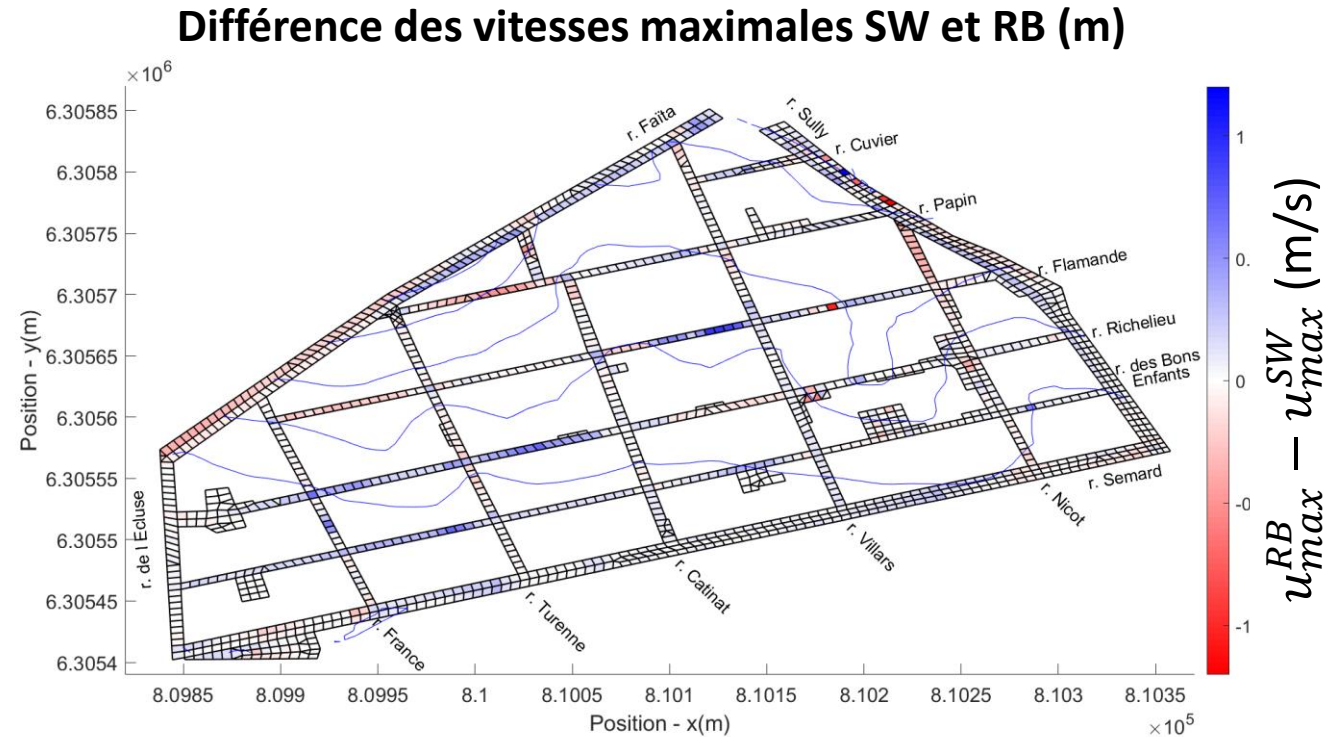
- comparaison avec échanges rue-bâti à travers des ouvrants ouverts (RB) et sans échange (SW)

- $= h_{max}^{RB} - h_{max}^{SW} \in [-0,54 ; 0,43] \text{ m}$

$|\Delta h_{max}| > 10 \text{ cm} : 32 \% \text{ des cellules}$

- $\Delta u_{max} = u_{max}^{RB} - u_{max}^{SW} \in [-1,18 ; 1,23] \text{ m/s}$

$|\Delta u_{max}| > 0,2 \text{ m/s} : 16 \% \text{ des cellules}$



Effet des échanges rue-bâti avec des ouvrants ouverts

- comparaison avec échanges rue-bâti à travers des ouvrants ouverts (RB) et sans échange (SW)

- $\Delta h_{max} = h_{max}^{RB} - h_{max}^{SW} \in [-0,54 ; 0,43]$ m

- $|\Delta h_{max}| > 10$ cm : 32 % des cellules

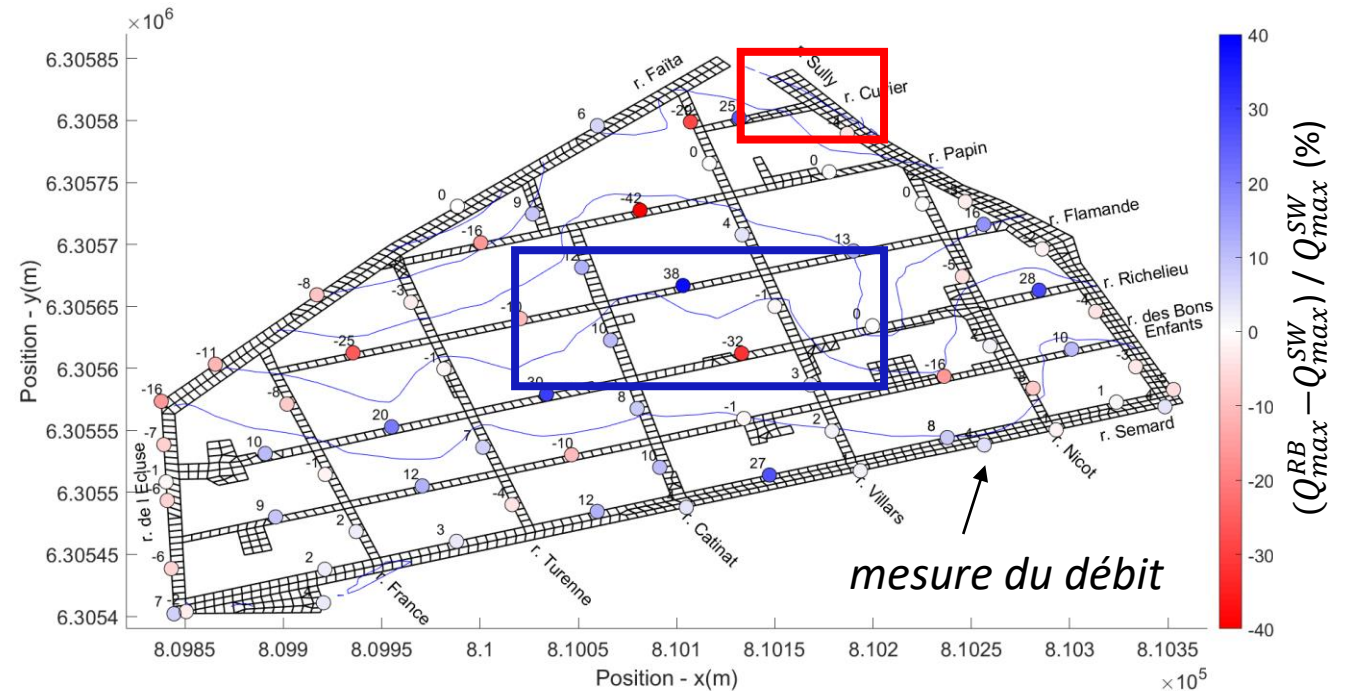
- $\Delta u_{max} = u_{max}^{RB} - u_{max}^{SW} \in [-1,18 ; 1,23]$ m/s

- $|\Delta u_{max}| > 0,2$ m/s : 16 % des cellules

- $e_{Qmax} = (Q_{max}^{RB} - Q_{max}^{SW}) / Q_{max}^{SW} \in [-42 ; 37]$ %

- $|e_{Qmax}| > 10$ % : 34 % des hydrogrammes

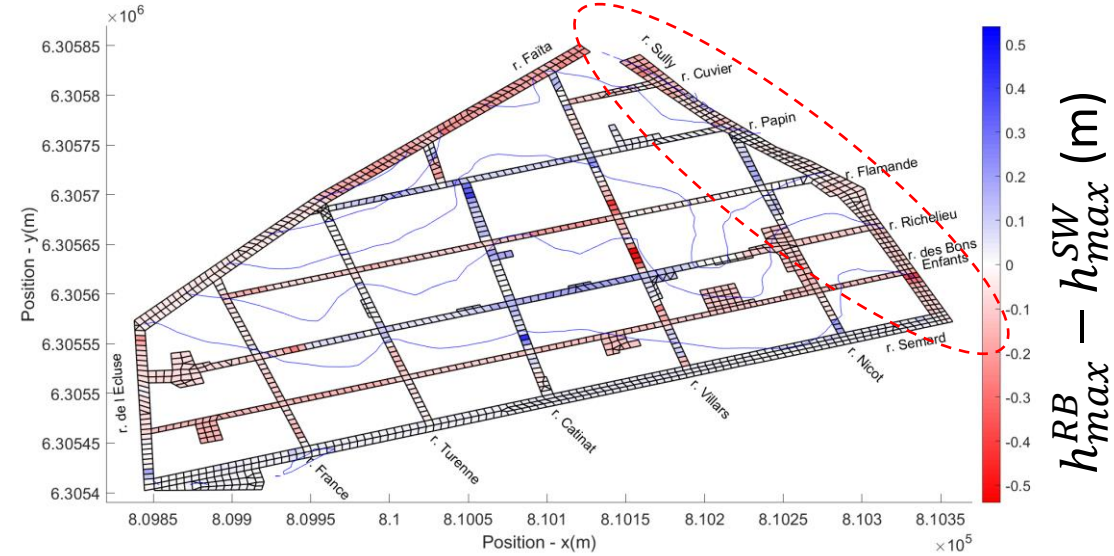
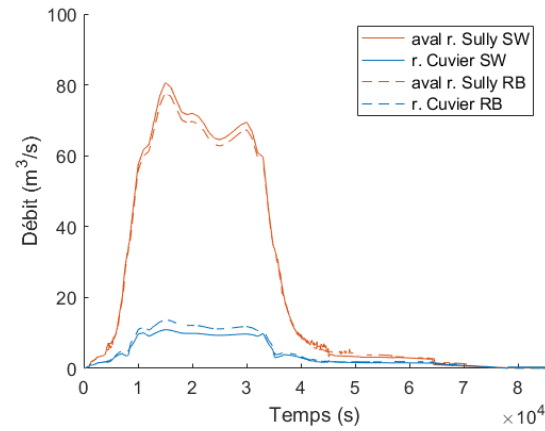
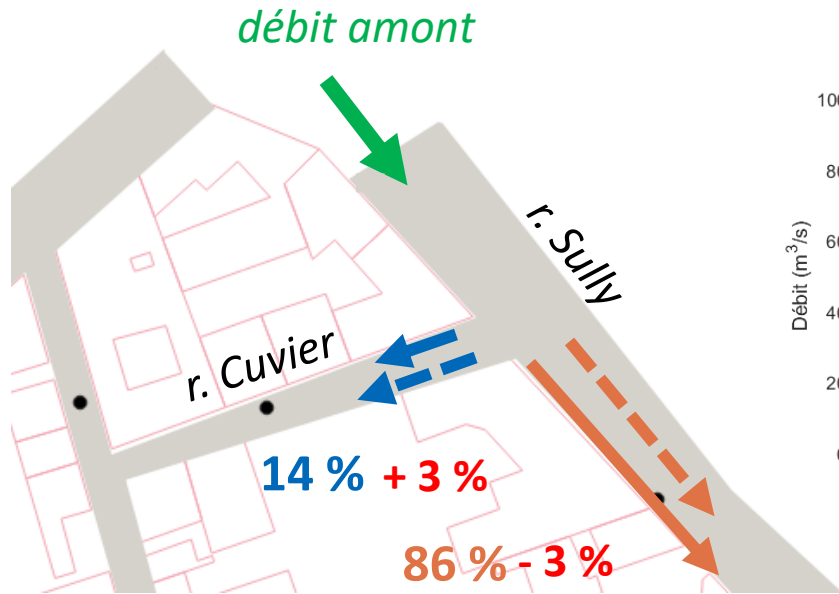
Écart relatif du débit de pointe par rapport au modèle SW (m)



- des différences significatives sur les 3 variables observées et qui concernent 1/3 des cellules/hydrogrammes
- volume des bâtiments : 1,8 % du volume de l'inondation → ce qui compte c'est la dynamique du remplissage par rapport à la crue et non le volume total stocké

Modification de la répartition des écoulements

- répartition des écoulements à l'amont de la rue Sully

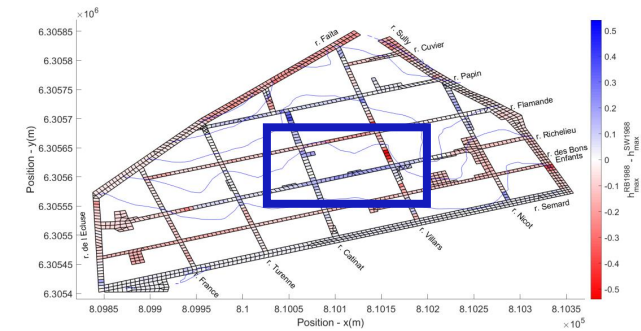


- nouvelle répartition des écoulements avec les échanges RB : déficit de masse vers l'aval de la r. Sully

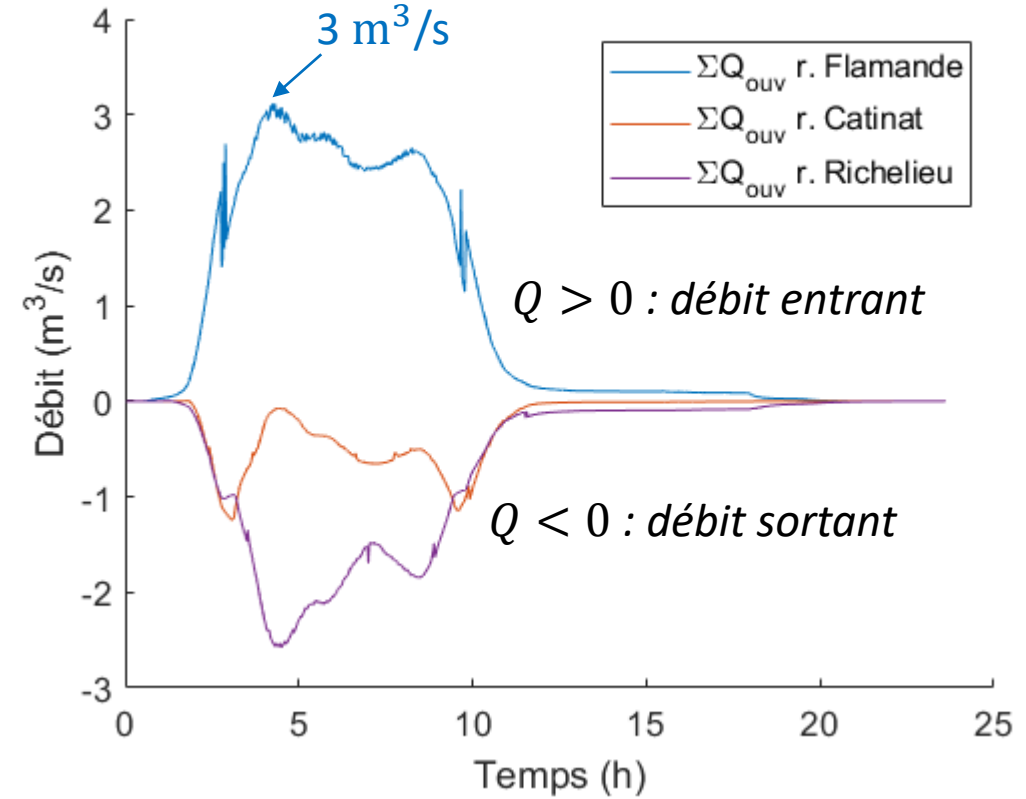
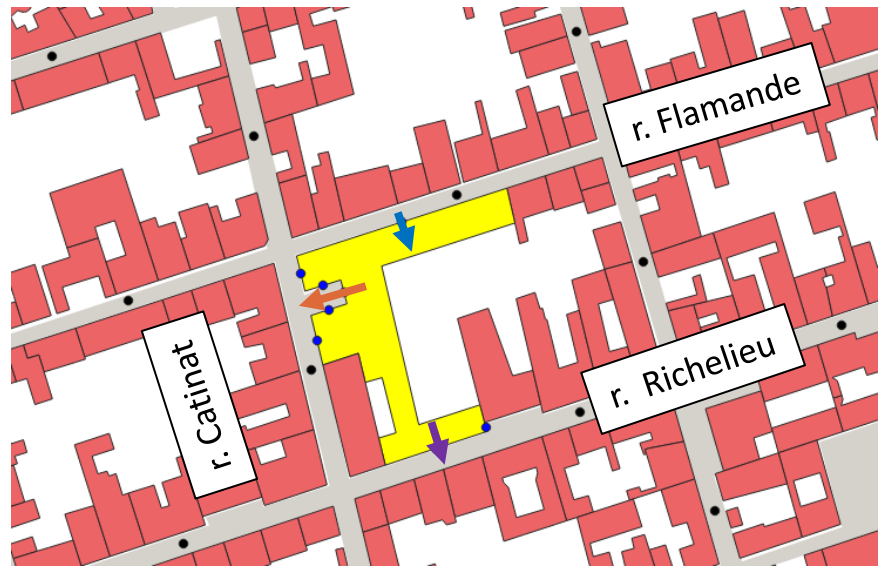
➔ influence sur les max

Bâtiment traversant

- bâtiment connecté à 3 rues

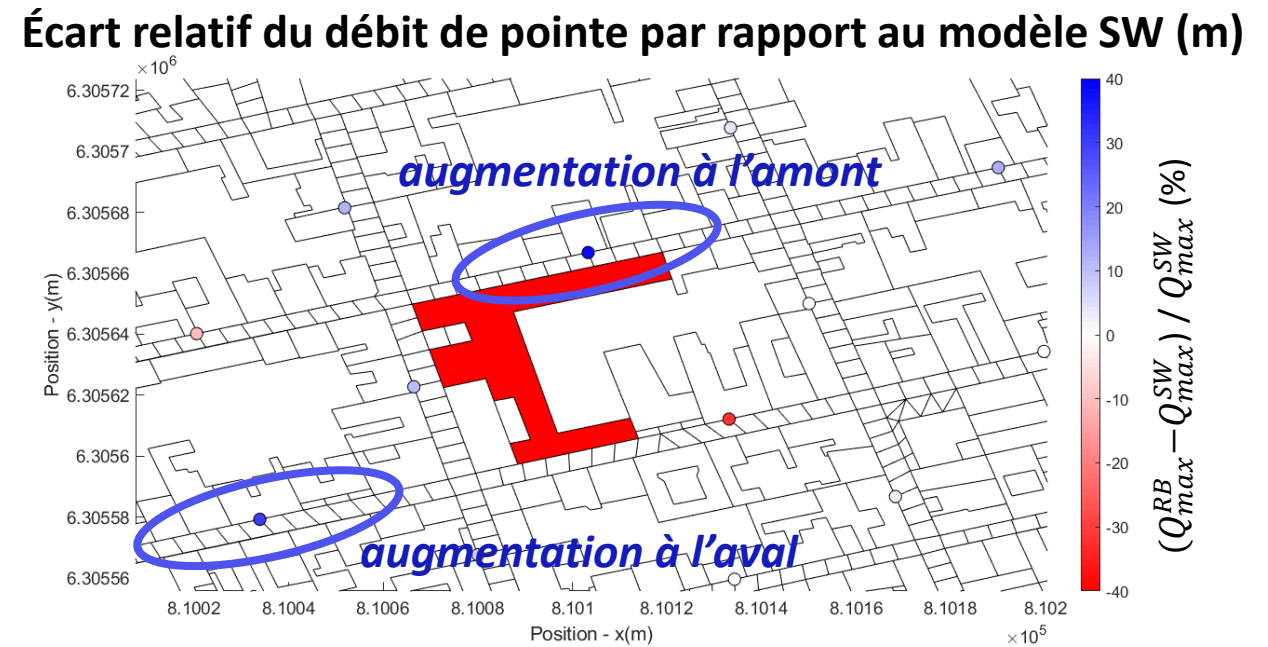
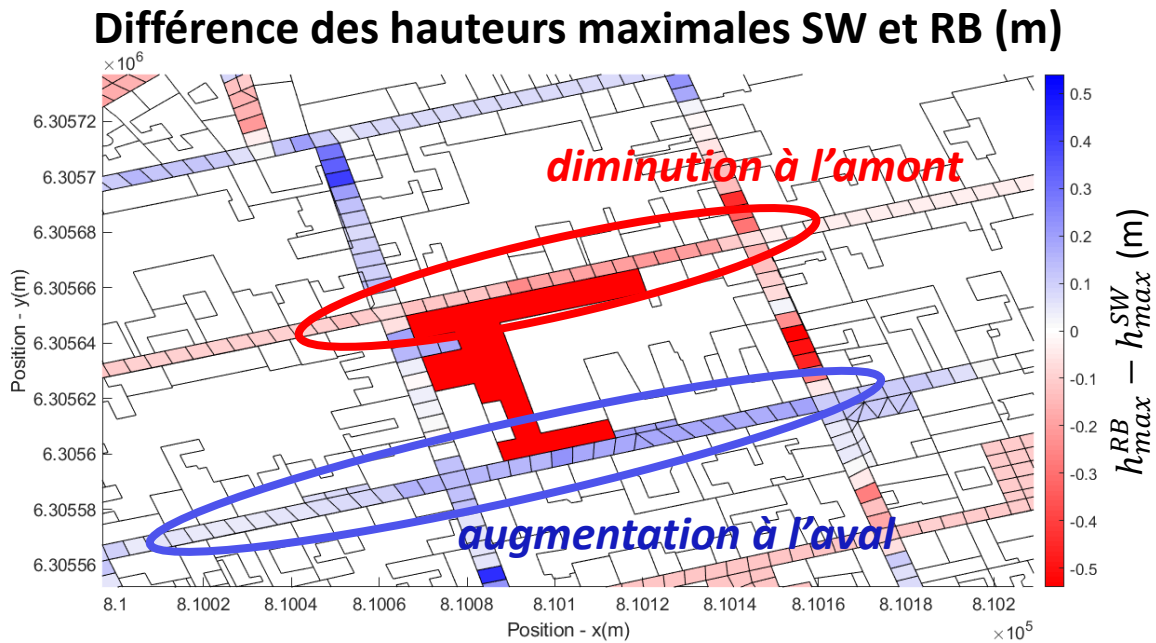


Somme des débits des ouvrants aux façades du bâtiment 283 (m)



Bâtiment traversant

- bâtiment connecté à 3 rues
- impact significatif sur les hauteurs maximales et les débits de pointe
- traversants : 1/3 des bâtiments du quartier

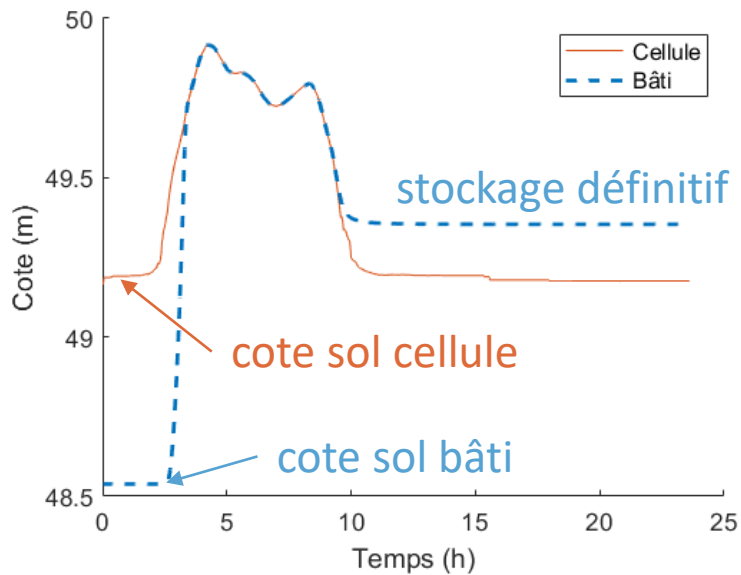


Inondation des bâtiments

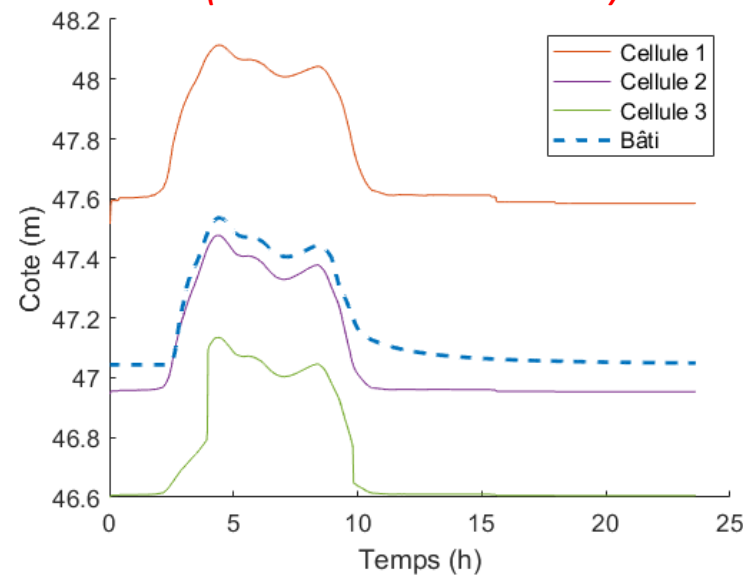
➤ évolution rue-bâti :

- courbes superposées : 73 % des bâtiments
- courbes non superposées : 27 % des bâtiments (26 % traversants)

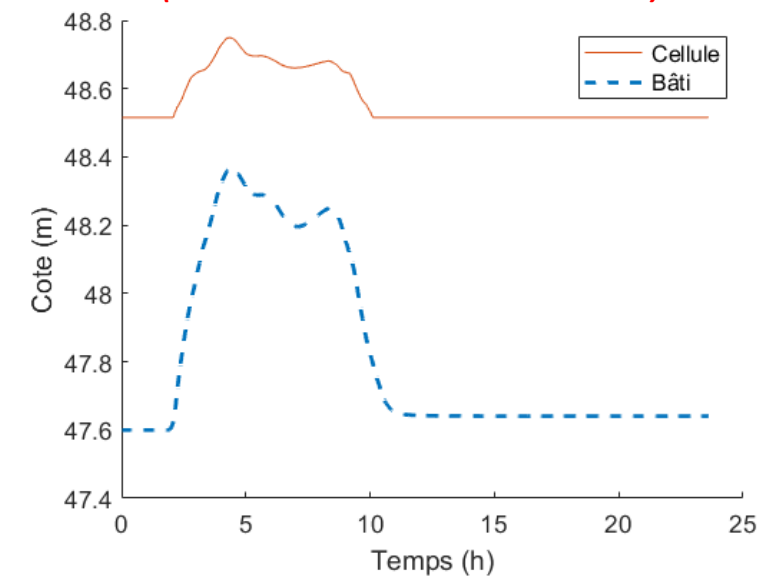
Cote dans le bâtiment 415



Cote dans le bâtiment 295 (bâtiment traversant)



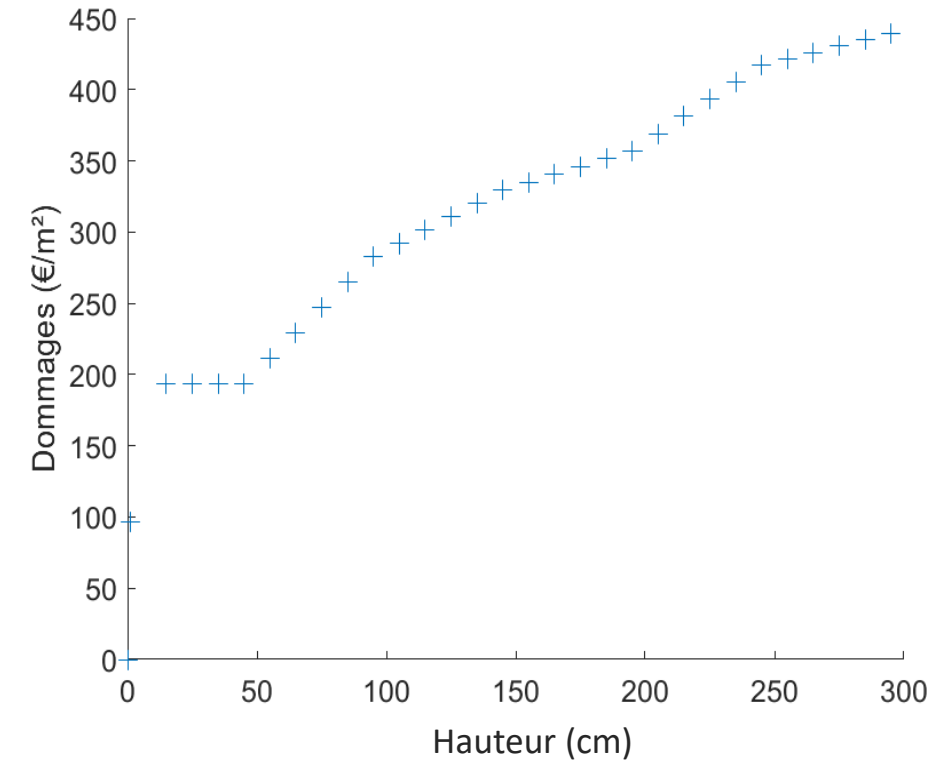
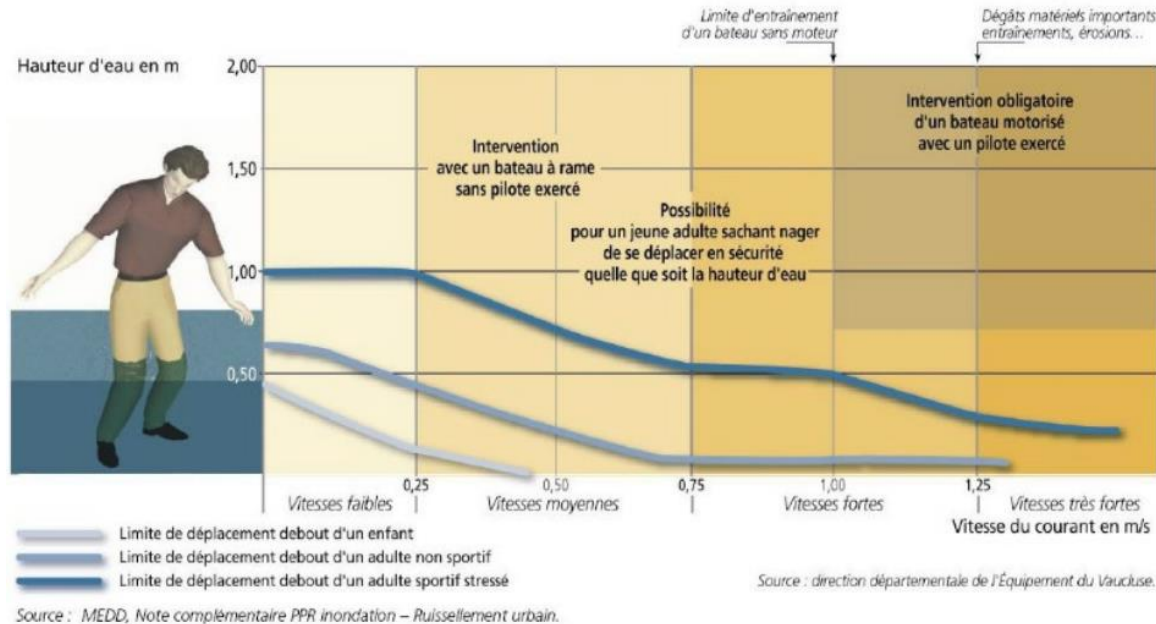
Cote dans le bâtiment 146 (bâtiment non traversant)



Inondation des bâtiments

- vitesse de remplissage → lien avec la gestion de crise
 - durée avant qu'il n'y ait plus d'électricité ?
 - durée avant que les enfants ne puissent plus se déplacer seul ?
 - durée avant qu'un adulte ne puisse plus se mettre à l'abri en marchant ?

- hauteur maximale
 - ➔ estimation des dommages

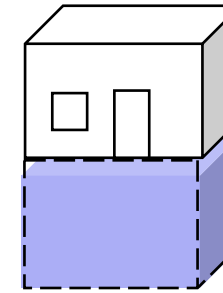


Sensibilité des résultats aux paramètres

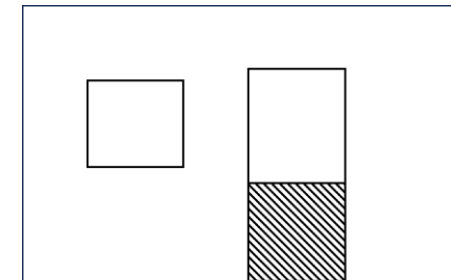
- résultats qui dépendent des choix de modélisation
- plusieurs simulations pour évaluer l'influence de certains choix

Hypothèse :	Simulation réalisée :
altitude des bâtiments	caves : abaissement de 2 m de l'altitude
erreur sur la loi de débit	coefficient de débit : +/- 30 %
connexion avec la cour des blocs	modélisation d'une cour comme un réservoir
positions/dimensions des ouvertures	atardeaux de 1 m devant les portes
état inconnu des ouvertures	ouvrants fermés (fentes horizontales de 1 cm de large)

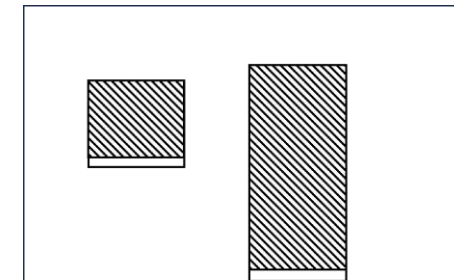
caves



échanges avec un bloc



atardeau devant une porte ouverte



ouvrants fermés

Bilan de la sensibilité des résultats hydrodynamiques

- comparaison des variables de l'écoulement par rapport à la simulation avec des ouvrants ouverts
 - hauteurs maximales : +/- 40 cm, jusqu'à 20 % du domaine concerné par des différences significatives
 - débits de pointe : +/- 30 %, jusqu'à 30 % des hydrogrammes concernés par des différences significatives
 - les modifications significatives sur les débits de pointe touchent plus largement la carte que pour les hauteurs

Simulation	$h_{max} - h_{max}^{RB}$	$ \Delta h_{max} > 10 \text{ cm}$	$(Q_{max} - Q_{max}^{RB})/Q_{max}^{RB}$	$ e_{Q_{max}}^* > 10 \%$
$C_d + 30 \%$	[-0,07 ; 0,10] m	< 1 %	[-5 ; 6] %	0 %
$C_d - 30 \%$	[-0,29 ; 0,26] m	9 %	[-14 ; 39] %	18 %
Cour	[-0,41 ; 0,35] m	4 %	[-23 ; 12] %	4 %
Batardeaux (ouvrants ouverts)	[-0,40 ; 0,23] m	2 %	[-17 ; 32] %	15 %
Batardeaux (ouvrants fermés)	[-0,59 ; 0,40] m	21 %	[-31 ; 60] %	30 %
Ouvrants fermés	[-0,54 ; 0,41] m	19 %	[-30 ; 66] %	30 %
Caves	[-0,31 ; 0,08] m	< 1 %	[-11 ; 35] %	8 %

$$*e_{Q_{max}} = (Q_{max} - Q_{max}^{RB})/Q_{max}^{RB}$$

V. Conclusion et perspectives

Conclusion

- Problématique de départ
 - ✓ non consensus scientifique sur la nécessité de prendre en compte ou non les échanges rue-bâti
 - ✓ approches classiques de modélisation des inondations urbaines qui ne permettent pas d'intégrer tous les effets des bâtiments (blocage, stockage, court-circuit)
- Solution apportée : modèle 2D développé
 - ✓ élaboration d'un nouveau modèle intégrant de façon plus exhaustive les effets des bâtiments
 - ✓ modification des équations de Saint-Venant dans un code existant : nouveau terme source tenant compte des échanges rue-bâti reposant sur une loi de débit
 - ✓ débit à travers porte/fenêtre calculé à partir d'une combinaison de 5 lois de la littérature dont le coefficient de débit est calé grâce à la modélisation 3D
 - ✓ erreur sur le débit (30 %) insignifiante dans les configurations envisagées

Conclusion

- Effets significatifs des échanges rue-bâti dans la rue
 - dans une rue : bassin écrêteur classique (réduction Q_{max} , h_{max} , u_{max} à l'aval et décalage temporel)
 - en présence des carrefours : modification de la répartition des débits
- approches classiques non justifiées

- Influence variable de ces effets selon les paramètres (analyse de sensibilité)

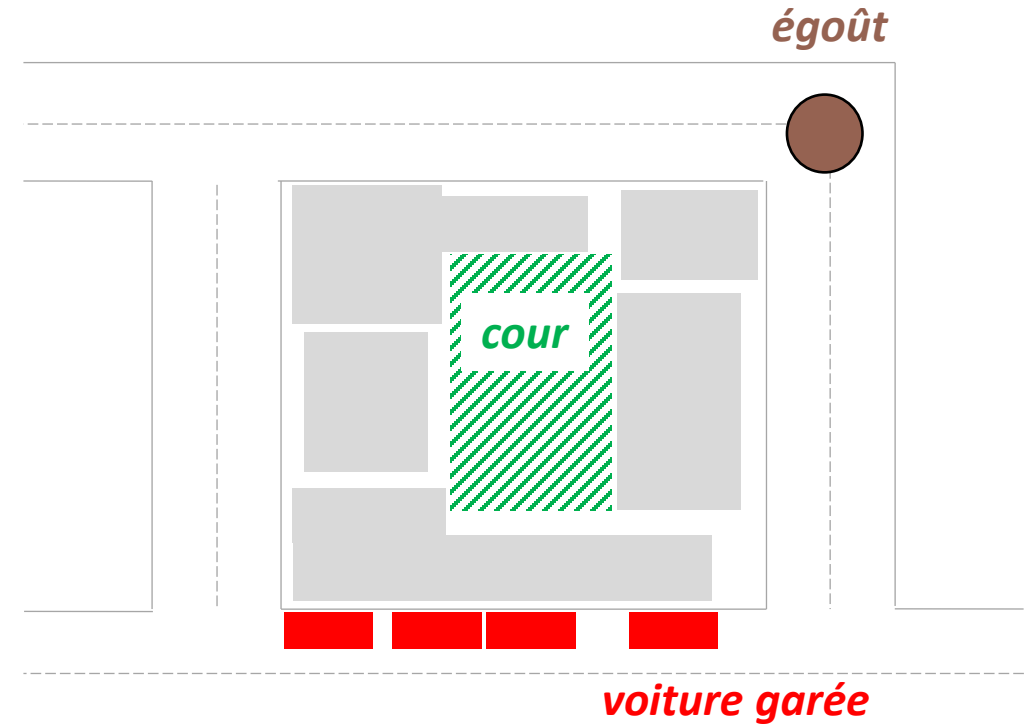
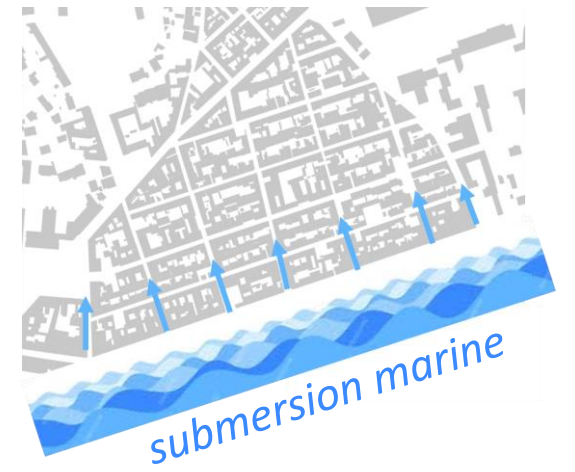
- Choix des modélisateurs influencent: l'hydrodynamique dans la rue et de l'inondation des bâtiments

- Accès à l'inondation des bâtiments : perspectives dommages et évacuation des personnes

- nouveau modèle au service d'une meilleure gestion des inondations urbaines

Perspectives

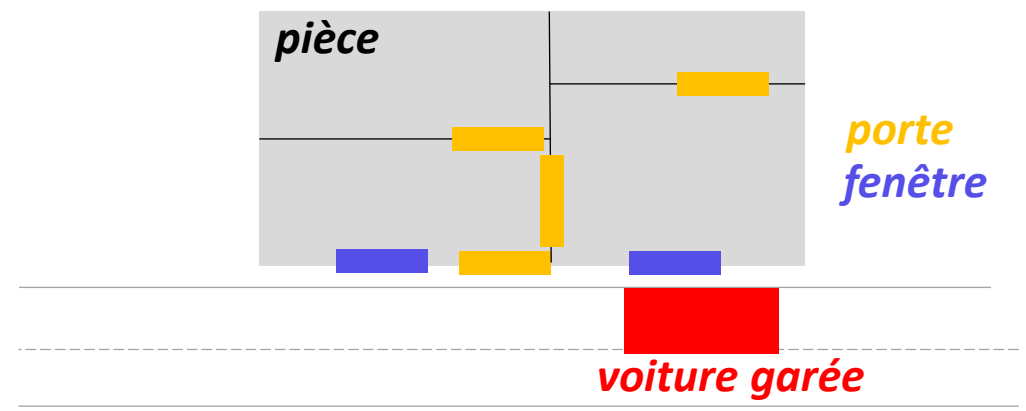
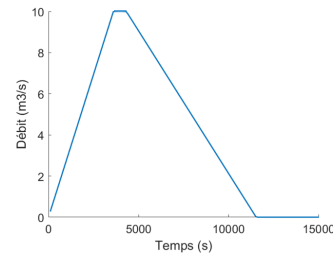
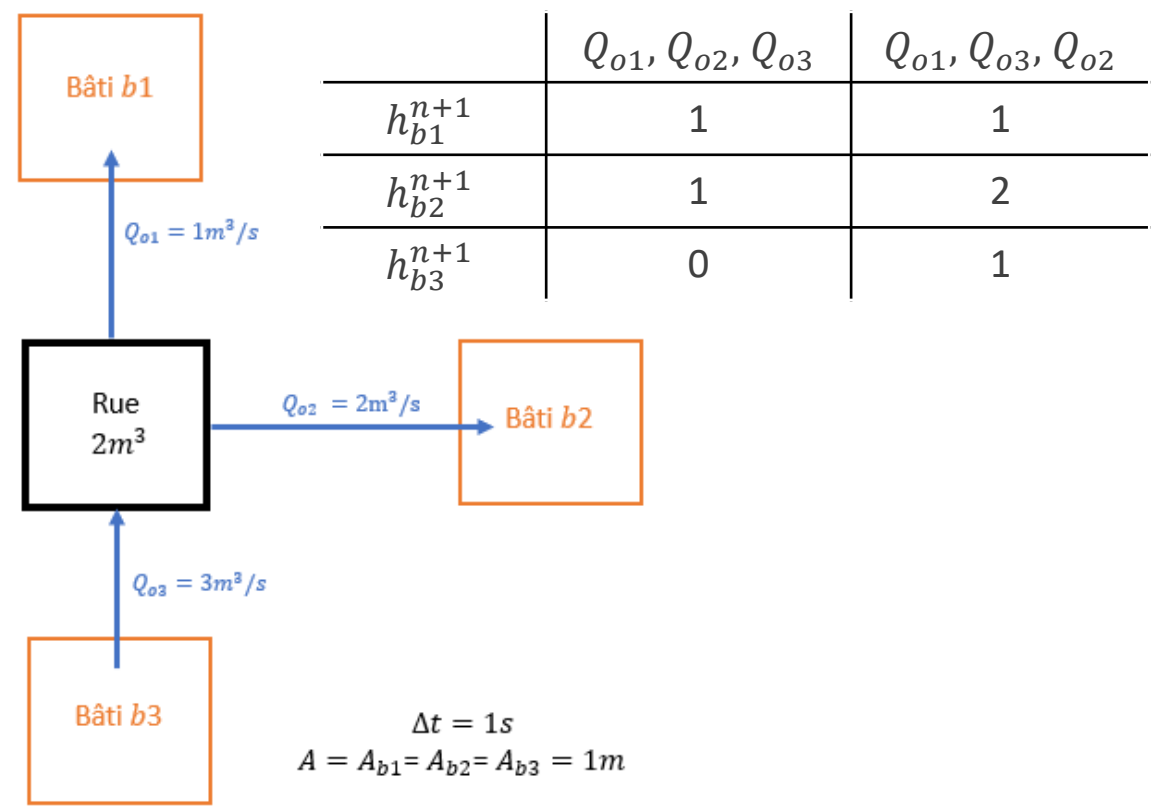
- Q : Dans quelles configurations les échanges rue-bâti doivent être pris en compte ? → réponse partielle
- aborder d'autres configurations :
 - hydrogrammes : forme, crue de plus faible ampleur, submersion marine
 - sites : quartier résidentiel, quartier industriel, pente faible
- améliorer la représentation des bâtiments
 - influence de la topographie, dimensions des ouvrants, représentation des ouvrants, de leur position, pièces
- prise en compte des autres phénomènes
 - échanges avec les cours
 - obstacles dans la rue
 - échanges avec le réseau souterrain



Perspectives

- algorithme de résolution :
 - problèmes liés à la discrétisation → corrections
 - influence de l'ordre des ouvertures
 - hypothèses :
 - ✓ pas de vitesse
 - ✓ répartition instantanée à l'intérieur du bâti

- améliorer le calcul des échanges
 - influence des ouvertures proches
 - régime transitoire
 - occupation de la rue
 - occupation du bâtiment



Merci pour votre attention

Cécile Choley

cecile.choley@gmail.com

