

# Risque hydrologique pluvial urbain

## Un outil de simulation des écoulements superficiels

### RÉSUMÉ

La recrudescence des inondations en milieu urbain s'est accompagnée ces dernières années de dégâts importants et de pertes de vies humaines. Dans le but d'améliorer la compréhension des phénomènes de propagation des crues en milieu fortement urbanisé, un modèle monodimensionnel maillé, basé sur les équations de Saint-Venant, a été mis au point avec pour objectif de prendre en compte la complexité des écoulements dus à la présence de carrefours et à la concomitance d'écoulements sub- et supercritiques.

Ce modèle a été appliqué à l'événement catastrophique du 3 octobre 1988 sur le quartier Richelieu de Nîmes. La comparaison des résultats obtenus avec une dizaine de mesures de laisses de crues donne des résultats encourageants qui montrent que l'outil est prometteur pour évaluer le risque en milieu urbain. Des applications sont envisageables en termes d'annonce des crues mais également d'aménagement du territoire, pour évaluer par exemple l'impact de bassins de rétention ou de constructions nouvelles sur la propagation des crues.

**MOTS CLÉS :** 15 - Zone urbaine - Hydrologie - Risque - Inondation - Modèle numérique - Écoulement (fluide) - Aménagement du territoire.

**Jean-Michel TANGUY**

Chargé de mission Eau  
Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement Méditerranée

**Ouacim AL MIKDAD**

Centre de recherche de Royallieu  
Université de Technologie de Compiègne

**Bainian ZHANG**

Association Gradient  
Groupe Université de Technologie de Compiègne

### Le risque hydrologique pluvial urbain

Durant les deux dernières décennies, les efforts de l'hydrologie en milieu urbain ont essentiellement porté sur la simulation du fonctionnement des réseaux d'assainissement pluviaux pour les événements d'une période de retour de dix ou vingt ans. Ces progrès se sont concrétisés par la mise au point des modèles dont s'inspirent les logiciels opérationnels actuellement utilisés (par exemple, CANOE et PAPHYRUS en France). Mais les réflexions qui ont suivi les événements pluvieux aux conséquences catastrophiques, tels que Nîmes en octobre 1988 ou plus récemment Marseille en septembre 2000, ont mis en évidence l'importance de se préoccuper également des événements pluvieux plus rares, d'une période de retour excédant la période de retour de dimensionnement. Il apparaît en effet que de telles pluies intenses menacent un certain nombre d'agglomérations (rapport Ponton, 1990). De plus, on ne dispose actuellement que de connaissances très limitées concernant la réponse hydrologique de petits bassins versants, urbains ou péri-urbains à des événements pluvieux très intenses.

Ce risque concerne non seulement les villes méditerranéennes (Marseille, Nîmes) mais également les grandes agglomérations (Bordeaux, Nancy, région parisienne, Saint-Valéry-en-Caux) et certains sites plus continentaux comme Clermont-Ferrand.

La recherche d'une quantification des écoulements en période d'événement intense répond essentiellement à un besoin de protection des lieux habités. L'urbanisation galopante des quartiers périphériques se traduit par des

apports de plus en plus importants de volumes d'eau.

Les réseaux d'évacuation, anciennement dimensionnés pour de petits centres urbains, ne peuvent alors évacuer les nouveaux débits et se retrouvent sous-dimensionnés, provoquant des débordements dans le réseau de voiries urbaines. Les inondations deviennent alors plus importantes, augmentant la vulnérabilité des personnes et des biens.

Des solutions doivent être recherchées par les gestionnaires pour tenter de diminuer le niveau de risque d'inondation.

Pour cela, une réflexion doit être engagée sur la compréhension de la dynamique de ces événements en termes **d'annonce des crues**, mais également sur la prévention des risques en termes **d'aménagement du territoire**.

■ La fonction **d'annonce des crues** nécessite l'installation d'un réseau de mesures sur les bassins versants à risques, la disponibilité d'outils informatiques de simulation performants ainsi que l'élaboration de plans de secours pour prévenir et mettre hors de danger les populations. Dans certaines communes, situées à l'aval de petits bassins versants à réponse rapide, les prévisionnistes ne disposent que de quelques heures pour prévenir les populations de l'imminence d'une inondation catastrophique.

■ Sur le plan de la prévention, les **aménageurs** se doivent de concevoir des ouvrages soit en périphérie des secteurs à risques (bassins de retenue, ralentissement dynamique, zones de débordement, etc.), soit dans les centres urbains (bassins enterrés, solutions alternatives qui consistent à utiliser certaines infrastructures pour écrêter les crues : espaces verts, terrains de sport, etc.). Lors d'opérations d'urbanisme conséquentes : réhabilitation de quartiers anciens, créations d'espaces verts, imperméabilisation de surfaces, plusieurs variantes d'un même projet peuvent être comparées suivant les sujétions qu'elles induisent sur le risque inondation.

Ces deux axes d'intervention nécessitent une évaluation fine des mesures envisagées, qui peut être facilitée par l'utilisation d'outils de simulation numérique tel que celui que nous présentons dans cet article, complétée par la mise en œuvre de systèmes d'information géographiques (SIG) indispensables pour appréhender spatialement le risque.

Un important effort de recherche doit être consacré au risque hydrologique en milieu urbain afin de lever les indéterminations scientifiques et tech-

niques actuelles et proposer des solutions à la vulnérabilité d'un certain nombre d'agglomérations.

## Une approche « hydraulique » du risque hydrologique pluvial urbain

Pour étudier des événements paroxysmiques, les méthodes classiques utilisées pour déterminer les écoulements en surface dans les zones urbaines sont simplifiées et font appel à l'expertise : détermination des talwegs et des surfaces contributives correspondantes, modélisation hydrologique, détermination des principaux cheminements de l'eau dans les agglomérations et application de relations hydrauliques simples (régimes d'écoulement supposés uniformes) [3, 6]. Les hypothèses de l'expert, pourtant déterminantes, ne peuvent être validées. La diversité des situations rencontrées, le rôle majeur que peuvent jouer certaines singularités hydrauliques (remblais, murets, pont) dans les écoulements ne permet pas l'application d'une méthode simplifiée « universelle » pour l'évaluation des risques. On comprend aisément que les processus d'inondation ne soient pas de même nature dans une agglomération comme Nîmes, située sur le cône de déjection de trois torrents drainant le plateau des garrigues du Gard, dont le relief a été remanié par l'homme et où les talwegs sont peu marqués et les bassins périphériques de Marseille récemment urbanisés, à pente importante et aux talwegs prononcés. Une typologie du risque hydrologique urbain semble indispensable. En effet, avant de pouvoir proposer des méthodes d'analyse du risque, il est nécessaire de bien appréhender les phénomènes qui les caractérisent : s'agit-il prioritairement d'un risque lié aux volumes d'eau ou aux débits, d'écoulements canalisés ou de ruissellement de surface, de concentration ou de diffusion des flux dans la ville ?...

Dans le but de mieux expliquer certains processus et d'aider les maîtres d'ouvrage dans leur prises de décision, des outils d'aide à la décision existent et, parmi eux, les modèles numériques sont de plus en plus utilisés. Ils offrent une grande souplesse d'utilisation et permettent l'étude et la comparaison de variantes assez facilement. Pour la simulation des écoulements de surface, plusieurs modèles numériques de simulation ont été transposés de l'hydraulique fluviale sans réellement pouvoir prendre en compte les spécificités du milieu urbain, notamment la forte densité du bâti et la complexité des réseaux de voiries [2, 7, 10, 11, 13, 15].

Il est donc apparu nécessaire de développer un outil de simulation capable de reproduire les écoulements de surface en prenant en compte toute la

complexité d'une ville ainsi que les processus hydrauliques qui se produisent lors des écoulements dans le réseau très complexe des rues, des espaces découverts intégrant les singularités de toutes sortes.

Le modèle doit disposer de certaines fonctionnalités pour être opérationnel. Il doit, par exemple :

- > prendre en compte la topographie et la topologie des rues sur la base des plans cadastraux ;
- > représenter les écoulements lents de type fluvial et les écoulements rapides de type torrentiel, ce qui suppose d'être en mesure de représenter les zones de transition ;
- > simuler l'arrivée d'eau en provenance des limites sous la forme d'hydrogrammes d'apports et de sorties d'eau aux limites ;
- > prendre en compte la pluie qui tombe directement dans les rues, mais également celle qui s'écoule des toitures ;
- > assurer les liaisons avec les réseaux enterrés sous la forme de remplissage des réseaux souterrains en début d'épisode, mais également de restitution lorsque le réseau enterré est en surpression ;
- > représenter les pertes de charges au droit des carrefours, qui peuvent comporter plusieurs branches qui fonctionnent soit en confluence, soit en défluence, suivant les circulations. Ces intersections jouent un rôle majeur dans la distribution des écoulements dans le réseau de surface ;
- > intégrer l'existence des zones découvertes tels que terrains de jeux, parcs, etc., qui peuvent avoir un rôle de lieux de stockage des eaux mais également de zone tampon à la conjonction de plusieurs rues ;
- > prendre en compte le stockage de l'eau à l'intérieur des maisons pendant la montée des eaux et leur restitution pendant la décrue.

Dans son état actuel, le modèle que nous allons présenter intègre les quatre premiers points de la liste ci-dessus.

Le réseau technique du ministère de l'Équipement et le Cemagref se sont rassemblés pour mettre en place une collaboration autour de cette modélisation : le premier développant une approche monodimensionnelle maillée, le second mettant en œuvre une approche bidimensionnelle. Nous restreindrons le présent article au modèle 1D maillé.

### REM<sup>2</sup>U : un modèle d'écoulement en REseau Maillé en Milieu Urbain

Le prototype a été conçu dans le cadre du programme « Risque Inondation » du ministère de

l'Environnement. Il a été développé par une collaboration CETE Méditerranée-Association Gradient, à partir des travaux de thèse de Ouacim Al Mikdad soutenue à l'université de technologie de Compiègne [1].

Il s'agit d'un modèle numérique qui résout les équations monodimensionnelles de l'hydraulique à surface libre (équations de Saint-Venant) en réseau maillé, que nous décrivons ici sous leur forme conservative (inconnues : débit  $Q$  et niveau d'eau  $h$ ).

#### Équation de continuité

$$\frac{\partial(Bh)}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = u_p B \quad (1)$$

#### Équation de conservation de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + g \frac{\partial I}{\partial x} + gA(S_f - S_0) \quad (2)$$

$$- \frac{\partial}{\partial x} \left( v_t A \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q}{A} \right) \right) = -u_p \frac{Q}{H}$$

où

- >  $B$  est la largeur au miroir de la section du canal,
- >  $h$  la cote de la surface libre,
- >  $A$  la section mouillée de la rue,
- >  $Q$  le débit,
- >  $S_0$  la pente du fond,
- >  $u_p$  l'intensité des précipitations,
- >  $S_f$  la pente de frottement,
- >  $H$  la profondeur d'eau,
- >  $v_t$  la viscosité que nous préférons nommer « dispersion »,
- >  $I$  la pression hydrostatique,
- > et  $g$  l'accélération de la pesanteur.

#### Continuité de débit à chaque jonction (ou carrefour)

Au niveau de chaque jonction, la continuité des débits est assurée sur l'ensemble des branches reliées à cette jonction :

$$j = \text{nb branches} \quad \sum_{j=1} Q_j n_j = 0 \quad (3)$$

où

- >  $Q_j$  est le débit de la branche  $j$  arrivant à la jonction  $i$ ,
- >  $n_j$  la normale sortante de la branche  $j$ .

### Équation de continuité de la charge dans un carrefour

L'expression de la perte de charge entre les branches  $j$  et  $k$  est donnée par l'expression suivante :

$$H_j - H_k + \beta Q_k^2 = 0 \quad (4)$$

où

- $H_j$  est la charge dans la branche  $j$ ,
- et  $\beta$  un paramètre dépendant du coefficient de perte de charge. Dans l'état actuel de développement du modèle,  $\beta = 0$ .

Des essais sur modèle physique vont être réalisés pour quantifier ce coefficient dans le cas de secteurs urbains aux caractéristiques différentes (tissus urbains anciens ou quartiers neufs).

### Capture du ressaut hydraulique

L'hétérogénéité des caractéristiques topologiques et topographiques des réseaux de voiries en milieu urbain met en œuvre la plupart des types de singularités hydrauliques : rétrécissements progressifs ou contractions brutales, élargissements, seuils, pentes faibles ou fortes, etc.). Ceci va rendre coexistants les régimes hydrauliques subcritiques, critiques et supercritiques donc de leurs transitions. Si la transition fluvial-torrentiel ne pose en général pas de problème particulier au niveau numérique, il n'en est pas de même pour le ressaut hydraulique qui s'accompagne d'une forte perte de charge.

Pour être en mesure de reproduire cette perte de charge, le modèle utilise la technique de « capture de choc » (ici capture du ressaut) bien connue dans le domaine des écoulements compressibles, qui consiste à introduire une diffusion numérique dans les zones à forts gradients de vitesses.

Soit  $U^{t+\Delta t}$  la solution obtenue à l'instant  $t + \Delta t$ . La diffusion numérique est introduite de la manière suivante :

$$U_s^{t+\Delta t} = U^{t+\Delta t} + \Delta t \frac{\partial}{\partial x} \left( s_{1v} \frac{\partial U^{t+\Delta t}}{\partial x} \right) \quad (5)$$

Le coefficient  $s_{1v}$  est donné par le modèle de

Lapidus :  $s_{1v} = v \Delta x^2 \left| \frac{\partial u}{\partial x} \right|$  avec  $u = \frac{Q}{H}$ .  $v$  est un terme de diffusion numérique artificielle,  $u$  la vitesse,  $\Delta x$  la longueur d'un élément,  $Q$  le débit et  $H$  la profondeur d'eau.

### Schéma numérique de résolution

La technique de résolution numérique qui est mise en œuvre dans ce modèle est la méthode des élé-

ments finis [5]. Cette technique donne une grande latitude à l'ingénieur pour représenter des domaines à géométries très hétérogènes et pour simuler des processus physiques complexes. L'équipe de l'Université de Technologie de Compiègne a, à son actif, le développement de nombreux codes de calcul, notamment pour le compte du CETMEF du ministère de l'Équipement : codes de calculs d'agitation de la houle, de courantologie maritime et fluviale, de sédimentologie, etc.

Le problème à traiter étant de nature transitoire et à forte dominance hyperbolique, le schéma numérique qui est utilisé dans ce modèle est le schéma de Lax-Wendroff, que nous allons décrire synthétiquement ci-après. Le lecteur intéressé par plus de détails se reportera à [1] et [4].

Le système d'équations (1) et (2) peut s'écrire synthétiquement :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + S + D = P \quad (6)$$

où

- $U$  est le vecteur solution,
- $F$ , le vecteur des termes de flux,
- $S$ , le vecteur des termes source,
- $D$ , le vecteur des termes de diffusion,
- $P$ , le vecteur des termes de production.

Avec :

$$U = \begin{pmatrix} Bh \\ Q \end{pmatrix}; F = \begin{pmatrix} Q \\ \frac{Q^2}{A} + g \frac{BH^2}{2} \end{pmatrix}; \quad (7)$$

$$S = \begin{pmatrix} 0 \\ n^2 \frac{|Q|}{A} Q \\ g \frac{R_h^{4/3}}{R_h} - AS_0 \end{pmatrix};$$

$$D = \begin{pmatrix} -\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{0}{Av_t} \frac{\partial(Q/A)}{\partial x} \right) \\ u_p B \\ -u_p \frac{Q}{H} \end{pmatrix}; P = \begin{pmatrix} u_p B \\ -u_p \frac{Q}{H} \end{pmatrix}$$

où

- $n (= 1/K)$  est le coefficient de Manning ( $K$  de Strickler),  $R_h$ , le rayon hydraulique au droit d'un profil.

La forme variationnelle du système (6) est donnée par :

$$W = \int_L (U^{t+\Delta t} - U^t) dx + \quad (8)$$

$$\Delta t \int_L \left( \frac{\partial F^{t+\frac{\Delta t}{2}}}{\partial x} + S^{t+\frac{\Delta t}{2}} - P^{t+\frac{\Delta t}{2}} + D^t \right) dx = 0$$

où L est la longueur du domaine étudié.

Le schéma de Lax-Wendroff comporte une étape de prédiction suivie d'une étape de correction qui intègre la capture du ressaut. Ces deux étapes sont incluses dans une même boucle sur les éléments suivant le schéma de la figure 1.

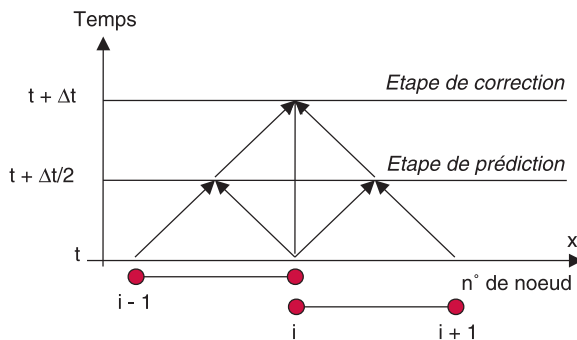


Fig. 1 - Schéma de Lax-Wendroff.

#### Étape de prédiction

Les valeurs  $U^{t+\frac{\Delta t}{2}}$ ,  $F^{t+\frac{\Delta t}{2}}$ ,  $S^{t+\frac{\Delta t}{2}}$  et  $P^{t+\frac{\Delta t}{2}}$  et sont moyennées par élément à l'instant  $t + \Delta t/2$  comme suit, à partir des expressions (7), pour obtenir finalement :

$$U^{t+\frac{\Delta t}{2}} = U^t - \frac{\Delta t}{2} \left( \frac{\partial F^t}{\partial x} + S^t - P^t \right) \quad (9)$$

Les termes de diffusion ne sont pas pris en compte à ce niveau.

#### Étape de correction

La forme variationnelle faible de l'expression (8) est utilisée sur le domaine de longueur L :

$$W = \int_L \delta U (U^{t+\Delta t} - U^t) dx - \quad (10)$$

$$\begin{aligned} & \Delta t \int_L \frac{\partial \delta U}{\partial x} \left( F^{t+\frac{\Delta t}{2}} + \bar{D}^t \right) dx \\ & + \Delta t \int_L \delta U \left( S^{t+\frac{\Delta t}{2}} - P^{t+\frac{\Delta t}{2}} \right) dx \\ & + \left[ \delta U \Delta t \left( \bar{D}^t + F^{t+\frac{\Delta t}{2}} \right) \right]_{x=0}^{x=L} = 0 \end{aligned}$$

avec  $\bar{D}^t = A^t v_t \frac{\partial(Q/A)^t}{\partial x}$  et  $\delta U$  la fonction de pondération de Galerkin.

#### Algorithme du schéma de Lax-Wendroff

L'algorithme ci-dessous est mis en œuvre dans le programme REM<sup>2</sup>U. Les avantages que procure ce schéma [4] sont de deux ordres :

- en premier lieu, les capacités de stockage nécessaire restent faibles puisque le schéma ne nécessite d'assembler que la seule matrice masse (devant le terme temporel) ; les autres entités étant des vecteurs ;
- par ailleurs, les deux premières étapes peuvent être assemblées dans une même boucle sur les éléments.

De nombreux cas tests assez sévères ont été mis en œuvre dans la thèse de Al Mikdad [1]. Le lecteur désirant plus de détails pourra utilement se reporter au document original.

### Boucle sur les pas de temps

#### Assemblage de la matrice masse M

Calcul des matrices masses élémentaires  
Assemblage des matrices élémentaires dans M

#### Boucle sur les éléments : assemblage du Vecteur Résidu R

##### Étape de prédiction

Calcul de  $U^{t+\frac{\Delta t}{2}}$  par (9)  
Calcul des paramètres et variables au pas de temps  $t + \Delta t/2$  par (7) et (8)

##### Étape de correction

Calcul des vecteurs résidus élémentaires par (10) et assemblage dans R  
Résolution du système  $\{\Delta U\} = \Delta t [M^{-1}] \{R\}$

#### Fin de boucle sur les éléments

### Fin de boucle sur les pas de temps



Le maillage est constitué d'éléments finis linéaires de différentes longueurs délimités par des nœuds dont la densité va dépendre non seulement des caractéristiques topologiques des réseaux de rues, mais également de la topographie. Ce maillage est construit à partir de profils de terrain mesurés par la création de nœuds intermédiaires (ou nœuds de calcul), dont les caractéristiques sont interpolées à partir des profils de terrain. Il sera aussi fonction des caractéristiques hydrauliques des écoulements (zones de transition entre régimes notamment). Le schéma de la figure 2 illustre un maillage à un carrefour sur lequel ont été reportés des profils de terrain ainsi que des nœuds de calcul. Ceux-ci schématisent les profils en travers des rues, qui sont représentés par un gabarit rectangulaire assorti d'un coefficient de rugosité.

Les sens d'écoulement ne sont pas préjugés : ils sont déterminés par l'hydraulicité du domaine et peuvent évidemment varier tout au long du calcul.

### Résultats fournis par le modèle

En chaque nœud du maillage et à chaque pas de temps peuvent être évalués le débit instantané ainsi que le niveau d'eau. C'est ainsi que l'on peut extraire des hydrogrammes et des limnigrammes qui, par intégration, nous donnent les volumes transités par rue.

La disponibilité spatiale et temporelle des niveaux d'eau permet de réaliser des images dynamiques où la propagation des eaux peut être illustrée sur un fond cartographique, qui donne un certain « réalisme » au phénomène et permet d'apprécier la dynamique des écoulements.

### Données nécessaires à la mise en œuvre du logiciel d'écoulement superficiel

#### Topologie des rues

Le modèle nécessite de disposer de la topologie des réseaux de voiries sur l'ensemble du domaine d'étude. Le fichier correspondant peut être construit à partir de données en plan fournies sous format AUTOCAD (format.dxf de préférence).

Idéalement, et pour optimiser la phase de pré traitement, chaque rue ou tronçon de rue homogène est représenté par deux points de son profil en long, chacun étant relié à un profil en travers rattaché en plan et renseigné en altitude.

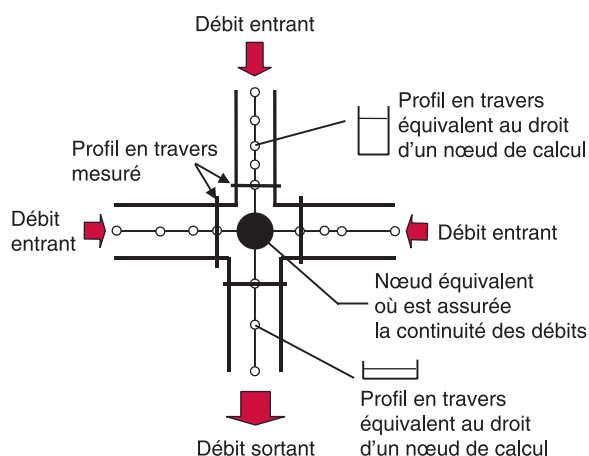


Fig. 2 - Schématisation d'un carrefour.

#### Topographie des rues

L'information topographique caractérisant le bassin versant peut-être fournie sous forme d'un plan topographique portant sur les réseaux de rues. Les fichiers seront constitués de semis de points ou de profils en travers (renseignés en altitude).

#### Localisation des ouvrages

Les ouvrages hydrauliques, que ce soient des trémies d'accès à des parkings, des points de liaison avec les réseaux enterrés, des déversoirs, des zones d'obstruction aux écoulements de surface, etc. seront repérés en plan et caractérisés par leurs dimensions.

#### Conditions aux limites

Les conditions aux limites « d'entrée » seront du type niveau d'eau (limnigramme) ou débit (hydrogramme).

Les conditions aux limites « en sortie » seront des sorties libres lorsque aucune obstruction ne vient gêner l'évacuation des débits ou de type niveau dans le cas où la limite aval est un plan d'eau ou la mer.

#### Paramètres de calcul

Le principal paramètre de réglage du modèle est la rugosité. On s'attachera donc à caractériser chaque profil en travers par un coefficient de rugosité équivalent, fonction des superstructures présentes, du mobilier urbain, du type de revêtement de surface, de l'homogénéité des murs de façade, etc.

### Application au cas de Nîmes

L'épisode pluvieux intense du 3 octobre 1988 – on a relevé plus de 420 mm en 6 h – s'est soldé par un bilan très lourd puisqu'il a entraîné dans la ville

de Nîmes la perte de neuf vies humaines et occasionné de nombreux dégâts matériels. Le quartier Richelieu, situé au sud de la ligne de chemin de fer de Saint-Germain-des-Fossés, a été l'un des quartiers les plus touchés par la catastrophe. Le secteur que nous avons choisi d'étudier s'étend sur un rectangle de 1 500 m de long sur 600 m de large, soit sur 90 hectares.

Alimentés par les cadereaux d'Uzès et du chemin des Limites, les eaux se sont engouffrées dans le réseau de rues étroites, envahissant les habitations avec en certains endroits plus de 2,5 m d'eau.

La simulation numérique a donc été conduite sur le réseau de voiries tel qu'il apparaît sur la figure 3. Nous disposons de relevés de laisses de

crues en dix points, qui représentent des niveaux maximaux atteints par les eaux. Les hydrogrammes d'entrée au droit des deux cadereaux (N1 pour Uzès et N2 pour les Limites) ont été estimés de manière théorique par modélisation des réseaux enterrés à l'aide du modèle PYPYRUS. Ces deux hydrogrammes, qui résultent d'une étude spécifique réalisée pour le compte de la Direction départementale de l'Équipement du Gard, n'ont pas fait l'objet d'analyse critique. Ils ont été pris en compte tels quels en conditions limites du modèle. Nous avons négligé les résurgences des réseaux enterrés en ne considérant que la propagation des eaux en provenance des deux entrées. Ces deux hydrogrammes sont représentés sur la figure 4.

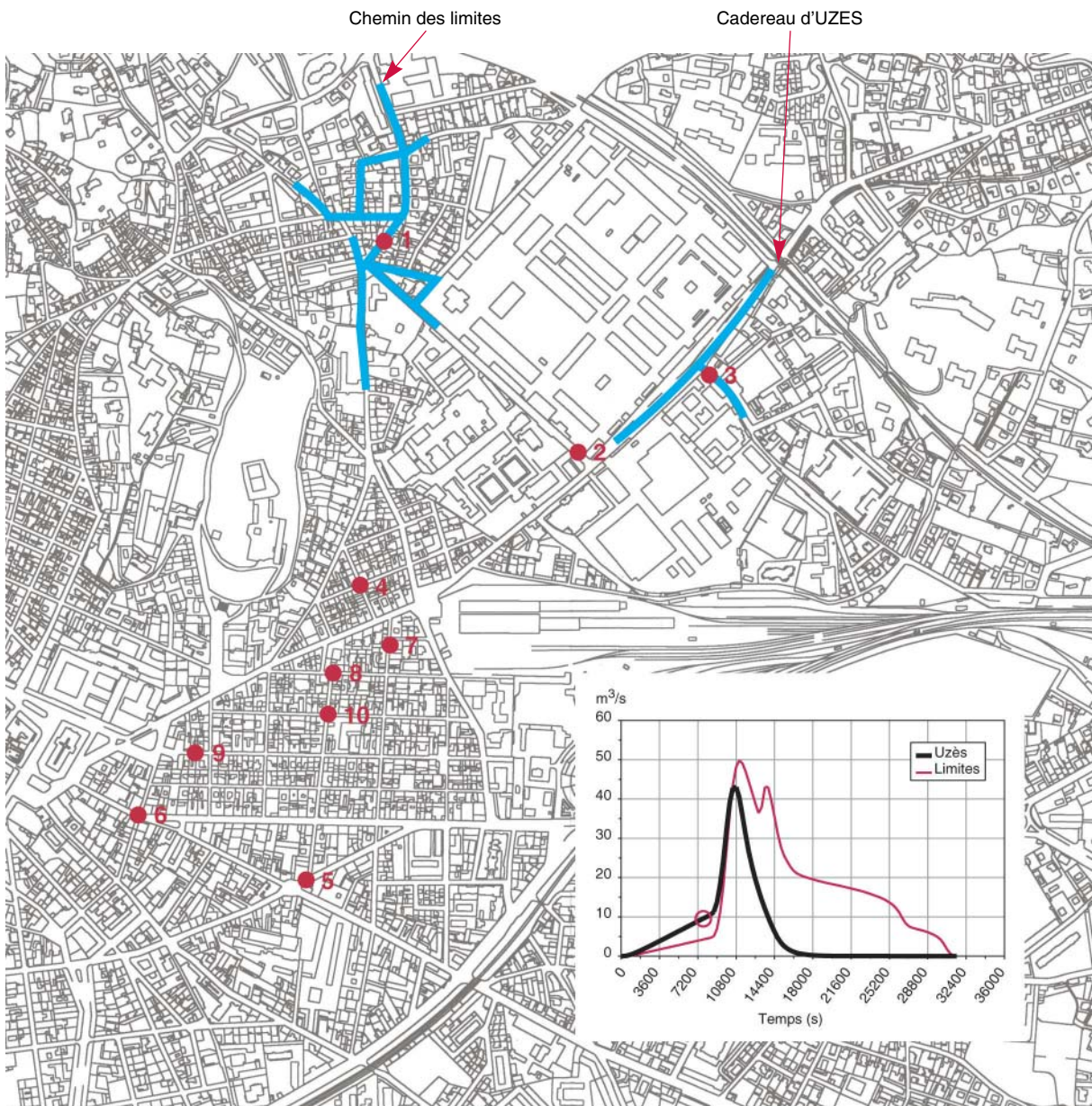


Fig. 3 - Implantation des relevés de crue et 2 h 15 après passage sous la voie ferrée.



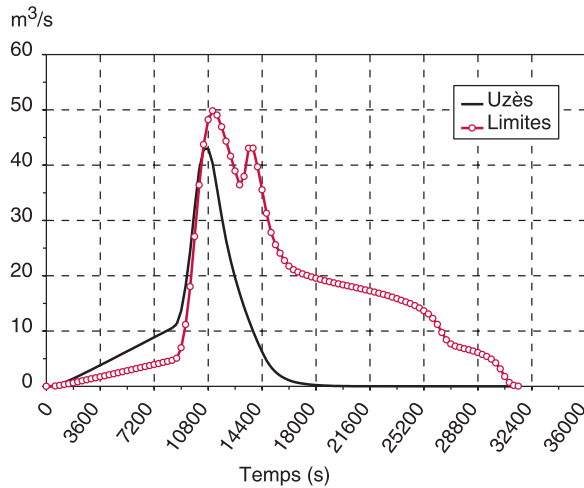


Fig. 4 - Hydrogrammes d'entrée.

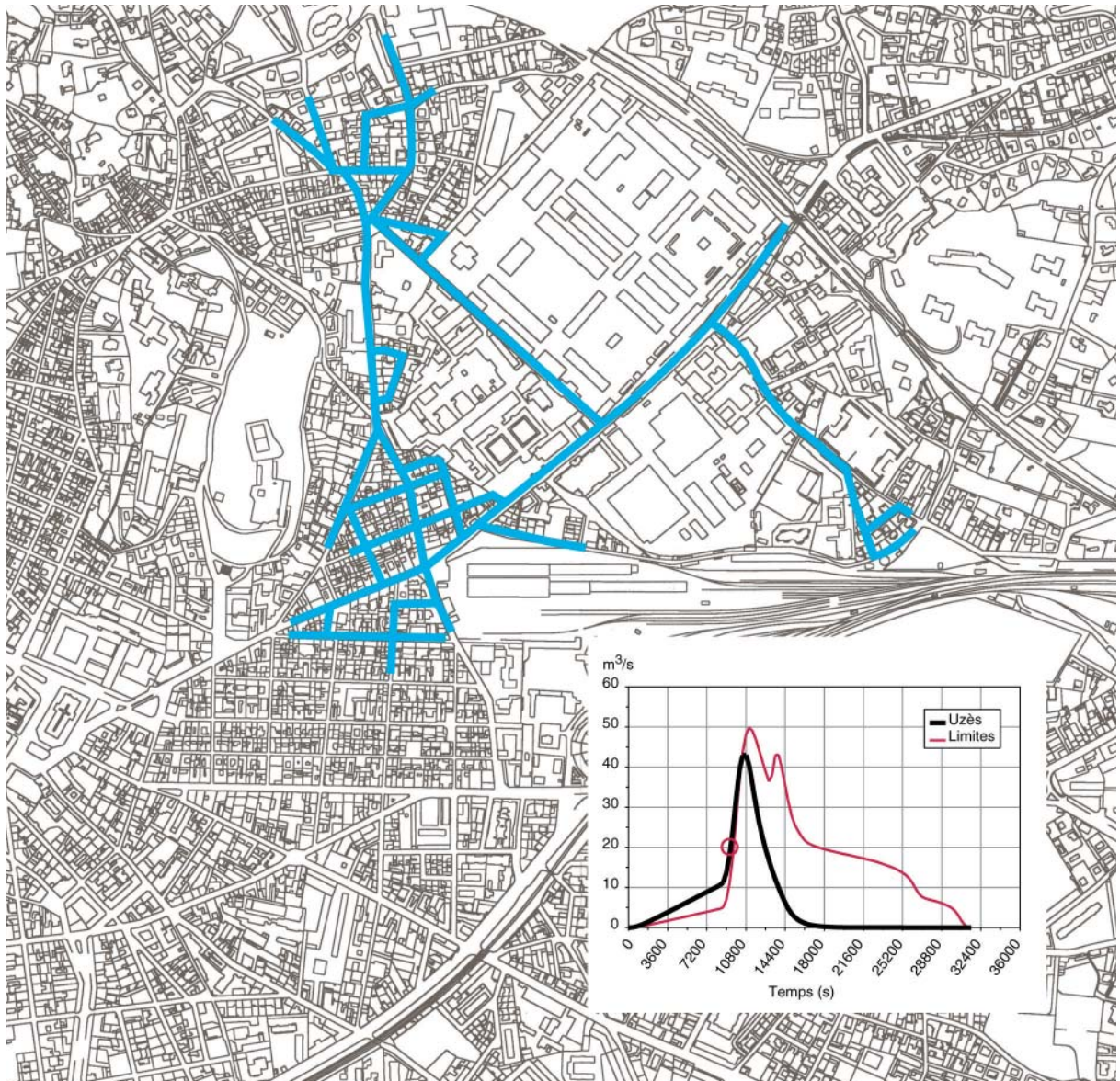
### Inventaire des données

Les relevés topographiques ont été fournis par la ville de Nîmes sur l'ensemble des rues. La simulation a été menée en régime transitoire, ce qui permet d'illustrer la dynamique de l'inondation (fig. 3, 5a, 5b et 5c).

Nous avons également reporté sur les figures 6a, 6b, 6c, 6d, 6e et 6f quelques hydrogrammes obtenus par le modèle en certains points (indiqués sur la figure 3) en leur superposant le point qui représente le niveau d'eau maximal relevé *in situ*. Les résultats sont assez encourageants, comme on peut le constater.

Au niveau du nœud 1, le pic de crue est atteint 3 heures après les premiers ruissellements et le

Fig. 5 - Propagation de la crue du 3 octobre 1988 dans les rues du quartier Richelieu de Nîmes.



a. 2 h 30 après passage sous la voie de chemin de fer.



débit augmente jusqu'à  $40 \text{ m}^3/\text{s}$ . La crue dure près de 5 heures. L'hydrogramme au nœud 2 montre une crue de même importance avec un pic de crue de  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  survenant au bout de 3 heures de montée des eaux. La décrue est plus longue et dure 8 heures.

Nous ne disposons malheureusement pas d'information temporelle sur la propagation de la crue, en particulier sur le passage du maximum.

### Mise en œuvre du modèle

Le maillage est constitué de 368 profils, de 329 branches (ou biefs) et de 147 jonctions. Le domaine étudié reprend l'ensemble des rues. Seules quelques rues adjacentes, jugées non essentielles

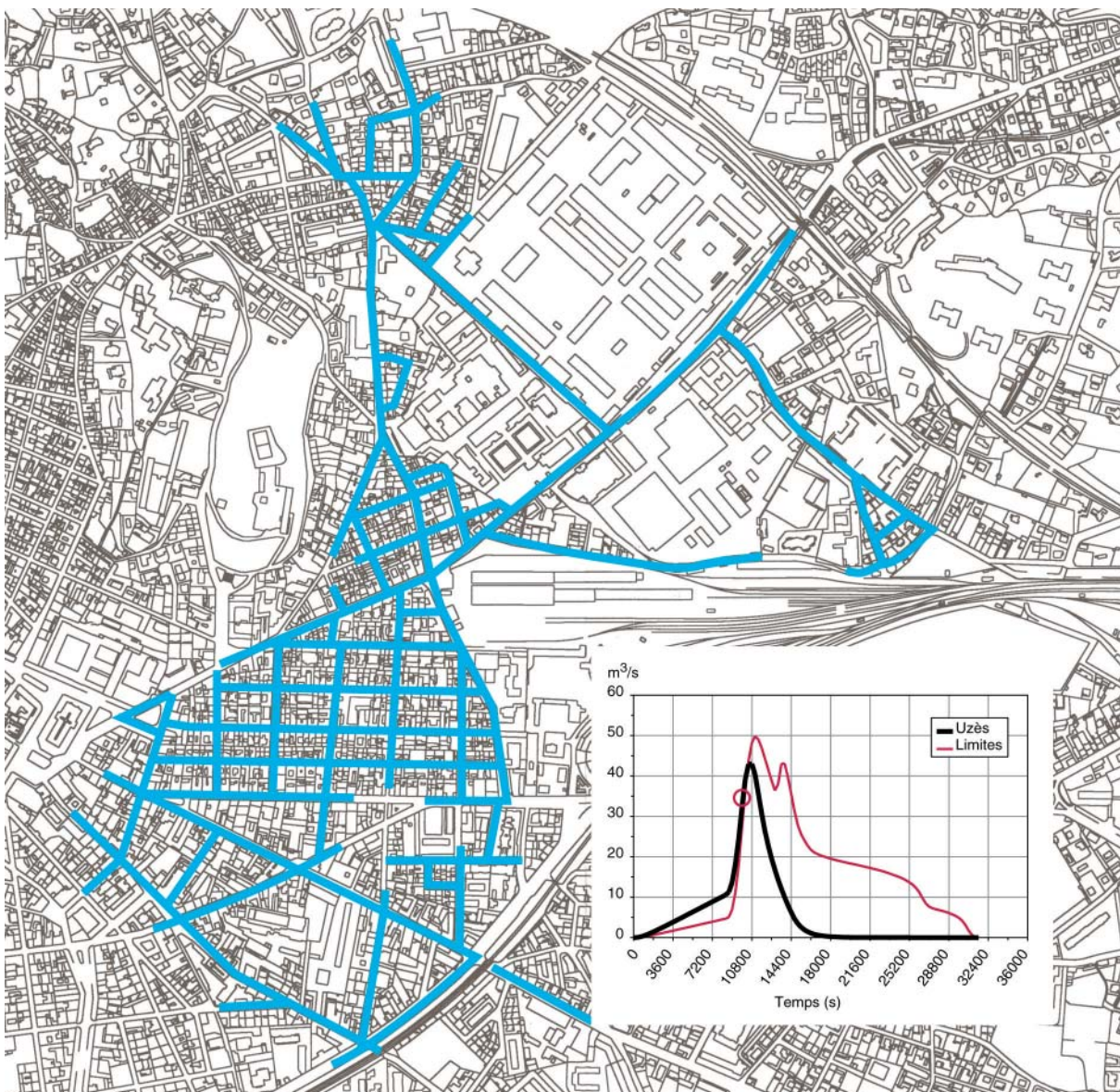
à la modélisation ont été écartées. À noter l'importance de la pente moyenne du domaine, de l'ordre de 1 %.

Les paramètres utilisés n'ont pas fait l'objet d'une analyse de sensibilité. Leurs valeurs ont été fixées à  $K = 40 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$  pour la rugosité et à  $v_t = 1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  pour la dispersion.

### Analyse des résultats

Le code de calcul REM<sup>2</sup>U permet d'obtenir les hauteurs d'eau ainsi que le débit au niveau de chaque profil de calcul. Il est précisé ici que les résultats présentés n'ont pas été optimisés : nous n'avons pas cherché à ce stade de la recherche à conduire une analyse de sensibilité pour se rap-

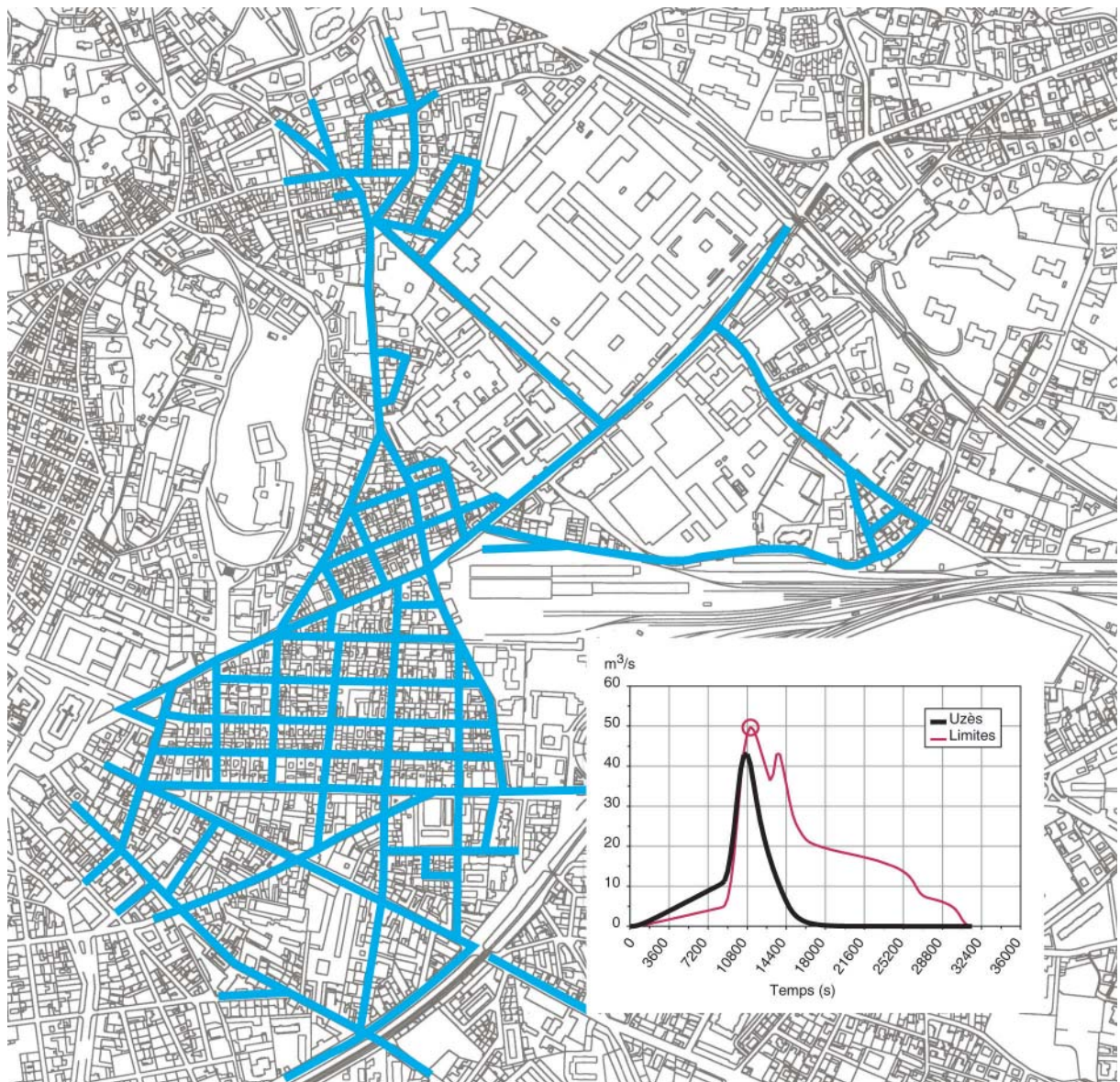
Fig. 5 - Suite



b. 2 h 45 après passage sous la voie de chemin de fer.



Fig. 5 - Suite



c. 3 h 10 après passage sous la voie de chemin de fer.

procher davantage des mesures. La comparaison des résultats du modèle avec les mesures des plus hautes eaux en dix points du domaine appelle cependant les remarques suivantes :

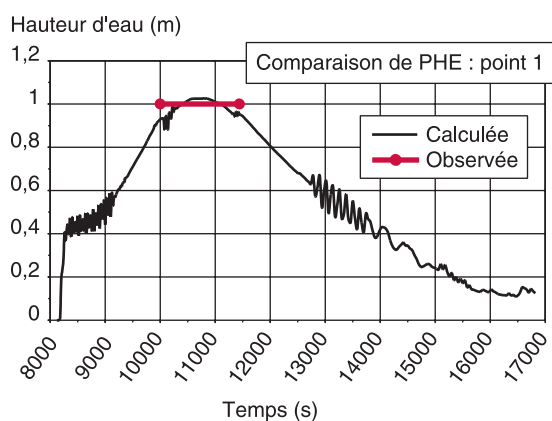
❶ d'une manière générale, les niveaux atteints sont assez proches des mesures compte tenu de l'absence de calage des paramètres. La violence même du phénomène explique en grande partie ces bons résultats, qui sont conformes aux hypothèses du modèle. Lorsque les phénomènes sont moins violents, les processus sont beaucoup moins tranchés et l'écoulement devient alors beaucoup plus sensible aux singularités, au stockage dans les maisons, aux échanges avec les réseaux, etc. ;

❷ les meilleurs résultats sont obtenus en périphérie du modèle, à proximité de l'entrée (points 1, 2, 3) et de la sortie (points 9, 5, 6). Au centre du domaine (points 4, 7, 8, 10), les niveaux calculés s'écartent des mesures. Il est très difficile de se prononcer sur l'origine de ces divergences, qui peuvent être de natures différentes : mauvaise représentation de la topographie, non prise en compte de certaines rues adjacentes, etc.

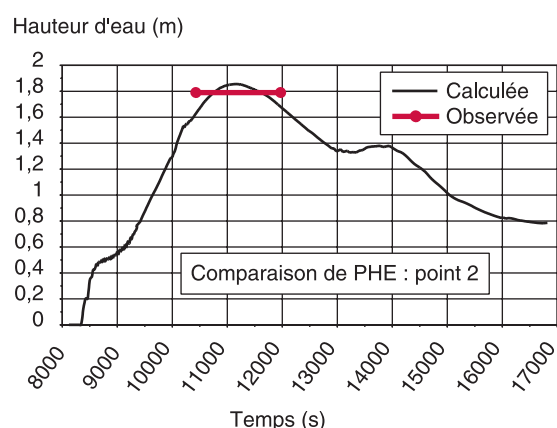
## Conclusions

Le code de calcul REM<sup>2</sup>U, qui résout les équations monodimensionnelles de Saint-Venant en

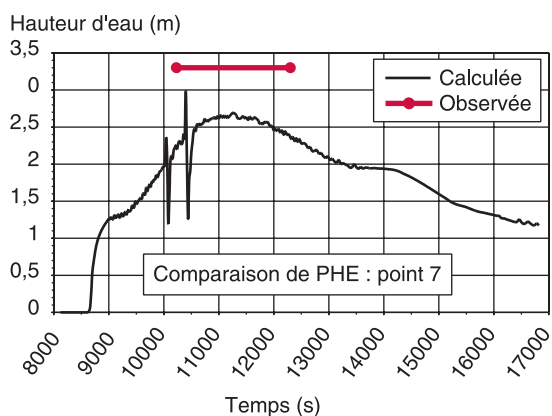
Fig. 6 – Modélisation de la crue du 3 octobre 1988 dans le quartier Richelieu de Nîmes.



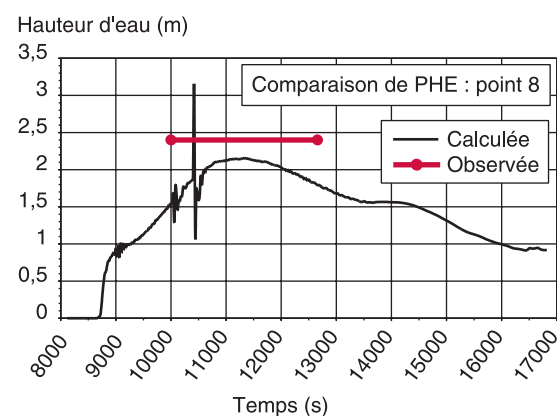
a. Point 1.



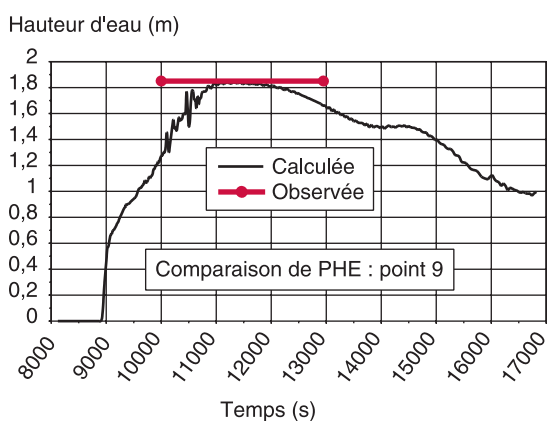
b. Point 2.



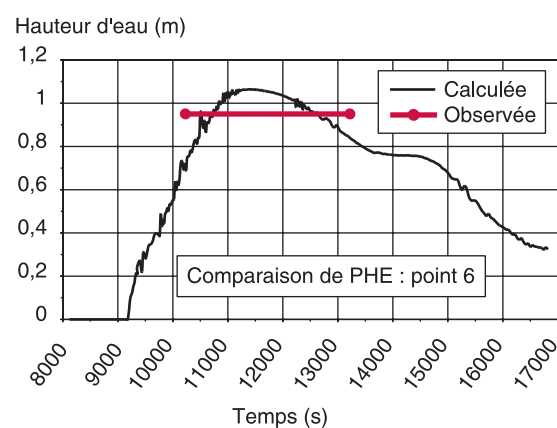
c. Point 7.



d. Point 8.



e. Point 9.



f. Point 6.

réseau maillé, intègre un certain nombre de fonctionnalités qui le rendent très adapté à la dynamique des crues de forte intensité en milieu urbain générées par des petits bassins versants à réponse rapide.

Le modèle a été conçu en utilisant des techniques modernes de simulation : la méthode des éléments

finis, mettant en œuvre le schéma de Lax-Wendroff, se révèle très adaptée à la complexité des écoulements complexes, aussi bien torrentiels que fluviaux qui peuvent coexister pendant les fortes crues urbaines.

Dans son état de développement actuel, REM<sup>2</sup>U a été appliqué à l'inondation catastrophique du



3 octobre 1988 qui a endeuillé la ville de Nîmes. Sans rechercher un calage très fin, les résultats obtenus en termes de niveaux d'eau sont encourageants et montrent que l'outil est prometteur pour évaluer le risque pluvial en milieu urbain.

Ce risque peut être appréhendé sur le court terme par une amélioration de l'annonce des crues aux populations, mais également sur le plus long terme comme outil d'aménagement. À cet égard, des projets de rénovation de quartiers anciens, des projets de protection tels que les bassins de rétention peuvent être évalués au sens du risque inondation.

Le code de calcul REM<sup>2</sup>U va prochainement subir des améliorations qui vont le rendre plus facilement utilisable et accroître ses possibilités d'application.

■ Conception d'un prétraitement automatique qui utilisera directement les bases de données

topologiques et bathymétriques urbaines disponibles auprès des services techniques des villes pour construire le maillage [12].

■ Couplage avec un logiciel de calcul des écoulements souterrains.

■ Complément par une formulation bidimensionnelle permettant la prise en compte de la dynamique des écoulements en zones ouvertes (carrefours complexes, espaces ouverts, etc.).

■ Prise en compte du rôle de stockage des maisons inondées [8, 9].

■ Réalisation d'essais sur modèles physiques pour améliorer la quantification des pertes de charge aux carrefours.

■ Conduite d'une analyse de sensibilité des paramètres complétée par l'étude de cas test permettant d'appréhender finement la propagation temporelle des crues.

**Remerciements.** Ce projet a été rendu possible par les financements attribués par le ministère de l'Environnement dans le cadre du programme « risque inondation » et par le LCPC dans le cadre de son axe de recherche « Risque hydrologique en milieu urbain ».

Nous tenons à remercier également François Brossard de la DDE du Gard pour son aide dans la fourniture des données.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] AL MIKDAD O., *Modélisation des écoulements en réseaux maillés et ramifiés*, thèse soutenue à l'université de technologie de Compiègne, décembre 2000, 250 pages.
- [2] BRASCHI G., GALLATI M., NATALE L., *Modelling floods in urban areas*, 15<sup>th</sup> annual conference, Association of State Floodplain Managers, ASFP, Denver, Colorado, 1991.
- [3] DESBORDES M., *Ruissellement pluvial urbain*, Eurydice 92, IPGR.
- [4] DHATT G., TANGUY J.-M., PELTIER E., ZHANG B.N., *Modélisation de l'évolution des fonds mobiles en mer et en rivière par éléments finis*, *Revue européenne des éléments finis*, vol. 3, mars 1994, pp. 339-361.
- [5] DHATT G., TOUZOT G., *Présentation de la méthode des éléments finis*, Maloine éditeurs, 1981.
- [6] *Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement*, coord. Chocat B., Lavoisier éditeur, 1997, 1 124 pages.
- [7] GILARD O., GENDREAU N., BREIL P., TSCHUDY E., *Inondabilité du ruisseau du ravin et de son bassin versant*, rapport d'expertise du Cemagref pour le compte de la communauté urbaine de Lyon, 55 pages + annexes.
- [8] HINGRAY B., BOUVIER B., DESBORDES M., CAPPELAERE B., *Urban flooding : hydraulic behaviour and modelling of build-up areas*, 8<sup>th</sup> International Conference on Urban Storm Drainage, Sydney, Australia, vol. 3, **1457-1465**, 1990.
- [9] HINGRAY B., CAPPELAERE B., BOUVIER C., DESBORDES M., Hydraulic vulnerability of an elementary cell, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE (accepted).
- [10] HYRODMAKA T.V., WALKER T.R., YEN C.C., Application of the USGS Diffusion Hydrodynamic Model for Urban Flood Plain Analysis, *Water Resources Bulletin*, vol. 25, **5**, octobre 1989, pp. 1063-1071.
- [11] LAI J.S., HUANG L.H., HSIEH P.C., LIN M.Y., *Integration of models for simulating flood inundation in the urban area*, Hydroinformatics, Iowa Institute of Hydraulic Research, Iowa City, 2000, 8 pages.
- [12] RODRIGUEZ F., ANDRIEU H., Intérêt des banques de données urbaines et des SIG pour la modélisation hydrologique, 25<sup>e</sup> Journées scienti-

fiques du GFHN, Vol. *Bulletin du GFHN*, avril 2001, **46**, 28-29 novembre 2000, pp. 175-181.

- [13] SMITH M., *Street Flow Analysis using a GIS-based Distributed Parameter Hydrologic Model*, Hydrocomp92, Budapest, Hungary, 1992, pp. 391-399.
- [14] TANGUY J.-M., ZHANG B., *A finite element morphological model applied to river bed evol-*

*ution*, 6<sup>th</sup> International symposium on river sedimentation, New-Dehli, India, novembre 1995.

- [15] TESTA G., DI FILIPPO A., FERRARI F., GATTI F., *Two-dimensional Model for flood Simulation Over Flat Dry Areas with Structures*, Hydroinformatics'98, Balkema, Rotterdam, 1998.

## ABSTRACT

### The hydrological risk of urban rainfall events: A surface flow simulation tool

J.-M. TANGUY, O. AL MIKIDAD, B. ZHANG

The recent flooding events in urban areas has resulted in loss of human lives and considerable economic damage. In the aim of enhancing understanding of the phenomena involved in the propagation of floodwaters through heavily-urbanized zones, a meshed one-dimensional model (based on the Saint-Venant equations) has been developed. This model's objective is to assimilate the complexity of flows due to both the presence of intersections and the joint occurrence of subcritical and supercritical flows.

This model has already been applied to the catastrophe that befell the Richelieu district in Nimes (France) in 1998. A comparison of the results obtained with about ten measurements of actual flood marks has provided encouraging signs as to the model's capacity to assess risks in urban settings. Applications may be envisaged with respect not only to flood warning indications, but also to regional planning policy decisions in order, for example, to evaluate the impact of hydrological basins or construction activity on the propagation of floodwaters.