

---

# Propagation de crue en milieu urbain

## REM<sup>2</sup>U : un outil 1D maillé aux éléments finis

Jean-Michel Tanguy\* — Bainian Zhang\*\*

\* Ministère de l'Environnement – Direction de l'eau  
20, avenue de Ségur, F-75731 Paris SP 07

Jean-michel.tanguy@environnement.gouv.fr

\*\* GRADIENT – Groupe Université de Technologie de Compiègne  
Département GSM – BP 20 529  
F-60205 Compiègne cedex

zhang@utc.fr

---

*RÉSUMÉ. La recrudescence des inondations en milieu urbain s'est accompagnée ces dernières années par des dégâts importants et des 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 s'avère prometteur pour évaluer le risque en milieu urbain.*

*ABSTRACT. 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 Nîmes (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.*

*MOTS-CLÉS : hydrologie urbaine, inondation, risque hydrologique, Nîmes, modèle numérique, méthode des éléments finis, schéma de Lax-Wendroff.*

*KEYWORDS: Urban hydrology, Flooding, Hydrological risk, Nîmes, Computational model, Finite element method, Lax-Wendroff approach.*

---

## 1. Une approche « hydraulique » du risque hydrologique

Durant les dix 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 10 ou 20 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-Cault) et certains sites plus continentaux comme Clermont-Ferrand.

Le comportement des petits bassins versants est difficilement compréhensible à partir d'une approche statistique à l'instar des grands bassins versants où la pluie est moyennée spatialement ou artificiellement distribuée par un abattement schématique. Sur les bassins versants de moyenne importance (100 à 1 000 km<sup>2</sup>), on peut avoir recours à des approches plus déterministes, combinant écoulement de surface et infiltration dans les sols : la Direction départementale de l'équipement du Gard a développé une approche originale combinant image météo, transformation de la pluie radar en pluie effective, ruissellement et infiltration. La difficulté dans cette approche réside dans la quantification de l'infiltration des sols, qui dépend de leur degré de saturation au moment de la pluie, de leurs caractéristiques pédologiques, lesquels peuvent varier énormément spatialement.

Pour les petits bassins versants qui retiennent ici notre intérêt (inférieurs à 50 km<sup>2</sup>), la pluviométrie doit être quantifiée de manière très précise, mais compte tenu des faibles surfaces considérées, sa distribution spatiale peut être considérée comme homogène. En outre, pour les bassins versants très urbanisés, le taux d'imperméabilisation est important – bien que fort heureusement certains quartiers urbains conservent des espaces verts – ce qui limite les surfaces contributives à l'infiltration. Mais la particularité de ces petits bassins versants urbanisés réside dans l'existence des réseaux enterrés, qui offrent de nombreux points de communication avec le réseau de surface, permettant aux eaux de s'infiltrer en période de crues, d'être évacuées vers l'aval mais également de déborder par refoulement lorsque les débits souterrains sont trop importants. S'intéresser aux forts événements pluvieux sur ces petits bassins versants ne peut se faire que par

une approche intégrant écoulement de surface et écoulements souterrains, avec toutes les spécificités de chacun de ces processus et surtout de leurs interactions.

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. Les inondations deviennent alors plus importantes, augmentant les dégâts aux personnes et aux biens. Des solutions doivent être recherchées par les gestionnaires pour tenter de diminuer le niveau de risque 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. Il faut savoir que 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. A l'inverse, les crues fluviales peuvent mettre plusieurs jours pour atteindre de grosses agglomérations (bassin parisien, Charente, Aisne, Oise...). Bien qu'elles puissent affecter des zones urbaines situées dans le lit majeur de cours d'eau, elles n'entrent pas dans le cadre des recherches engagées.

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...) soit dans les centres urbains (bassins enterrés, solutions alternatives qui consistent à utiliser certaines infrastructures pour écrêter les crues : espaces verts, terrains de sport...). 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'ils induisent au 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 complétée par la mise en œuvre de systèmes d'information géographiques (SIG) indispensable 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 techniques actuelles et proposer des solutions à la vulnérabilité d'un certain nombre d'agglomérations. C'est donc dans un souci d'annonce à court terme, mais également d'aménagement à moyen terme que ces modèles de simulation sont dédiés.

## 2. Modélisation des écoulements de surface

Lors des événements paroxysmiques, qui mettent en jeu brutalement d'énormes volumes d'eau, les quantités d'eau qui s'engouffrent dans les réseaux enterrés sont conditionnées par la capacité des conduites souvent très faible par rapport aux volumes qui s'écoulent en surface. Les méthodes 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). 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 seront 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 ?...

Il est donc apparu de première importance de développer un outil de simulation capable de reproduire les écoulements de surface en prenant en compte toute la complexité du milieu urbain 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.

Peu nombreuses sont les équipes de recherche ou opérationnelles qui s'intéressent directement à la modélisation des écoulements de surface en milieu urbain. Le réseau 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 unidimensionnelle maillée, le second mettant en œuvre une approche bidimensionnelle. Nous restreindrons le présent article au modèle 1D maillé.

### 3. REM<sup>2</sup>U : un modèle d'écoulement en RÉseau 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 (Al Mikdad, 2000).

Il s'agit d'un modèle numérique qui résout les équations unidimensionnelles 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  $h$ )

#### *Equation de continuité*

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

#### *Equation de conservation de la quantité de mouvement :*

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + g \frac{\partial AI}{\partial x} + gA(S_f - S_0) - \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_t A \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q}{A} \right) \right) = - u_p \frac{Q}{H} \quad [2]$$

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,  $\nu_t$  la dispersion turbulente sur l'ensemble de la section en travers et  $I$  la pression hydrostatique,  $g$  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 :

$$\sum_{j=1}^{j=\text{nb branches}} Q_j n_j = 0 \quad [3]$$

où  $Q_j$  est le débit de la branche  $j$  arrivant à la jonction  $i$  et  $n_j$  la normale sortante de la branche  $j$ .

#### ***Equation 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 hydraulique) bien connue dans le domaine des écoulements compressibles qui consiste à introduire une diffusion numérique dans les zones à forts gradients de niveaux.

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

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

Les coefficients  $s_{1v}$  et  $s_{2v}$  sont donnés par le modèle de Lapidus :  $s_{1v} = s_{2v} = v \Delta x \left| \frac{\partial u}{\partial x} \right|$  avec  $u = \frac{Q}{H}$

#### 4. Schéma numérique de résolution

La technique de résolution numérique qui est mise en œuvre dans ce modèle est la méthode des éléments finis (Dhatt *et al.*, 1981). 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...).

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 (Al Mikdad, 2000).

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.

Avec :

$$U = \begin{pmatrix} Bh \\ Q \end{pmatrix}; \quad F = \begin{pmatrix} Q \\ \frac{Q^2}{A} + g \frac{BH^2}{2} \end{pmatrix}; \quad S = \begin{pmatrix} 0 \\ g \left( \frac{n^2 |Q|}{A} \frac{Q}{R_h^{4/3}} - AS_0 \right) \end{pmatrix};$$

$$D = \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{\partial}{\partial x} \left( A v_t \frac{\partial(Q/A)}{\partial x} \right) \end{pmatrix}; \quad P = \begin{pmatrix} u_p B \\ -u_p \frac{Q}{H} \end{pmatrix} \quad [7]$$

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

$$W = \int_L \delta U (U^{t+\Delta t} - U^t) dx + \Delta t \int_L \delta U \left( \frac{\partial F^{t+\frac{\Delta t}{2}}}{\partial x} + S^{t+\frac{\Delta t}{2}} - P^{t+\frac{\Delta t}{2}} + D^t \right) dx = 0 \quad [8]$$

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 des éléments suivant le schéma suivant :

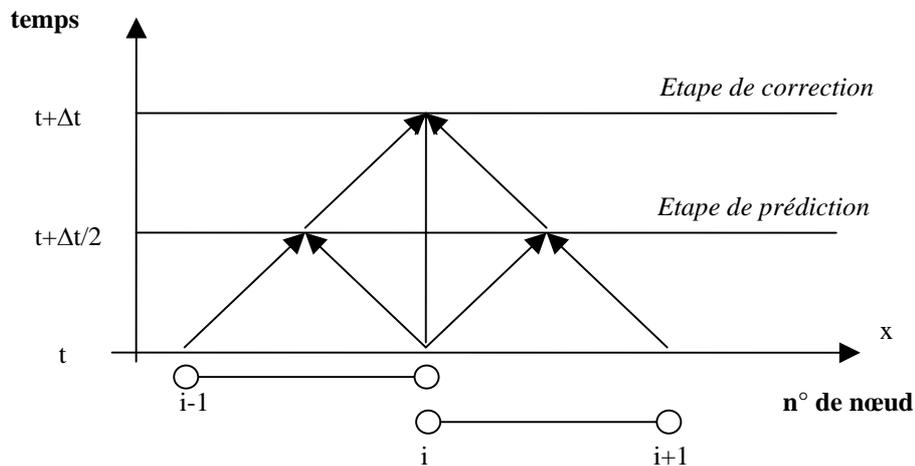


Figure 1. Schéma de Lax-Wendroff

**Etape de Prédiction**

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

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

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

**Etape de correction**

La forme variationnelle faible de l'expression [8] est utilisée :

$$W = \int_L \delta U (U^{t+\Delta t} - U^t) dx - \Delta t \int_L \frac{\partial \delta U}{\partial x} \left( F^{t+\frac{\Delta t}{2}} + \overline{D^t} \right) dx + \Delta t \int_L \delta U \left( S^{t+\frac{\Delta t}{2}} - P^{t+\frac{\Delta t}{2}} \right) dx \tag{10}$$

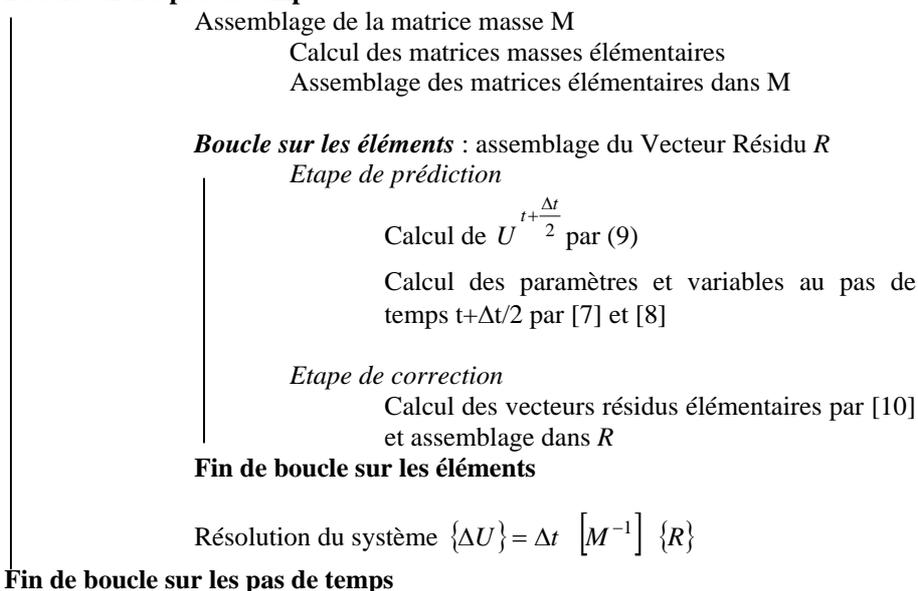
$$\left[ \delta U \Delta t \overline{D^t} + F^{t+\frac{\Delta t}{2}} \right]_{x=0}^{x=L} = 0$$

avec  $\overline{D^t} = A^t v_t \frac{\partial(Q/A)^t}{\partial x}$  et  $\delta U$  la fonction de pondération de Galerkin, linéaire sur l'élément.

**Algorithme du schéma de Lax-Wendroff**

L'algorithme suivant est mis en œuvre dans le programme REM<sup>2</sup>U. Les avantages que procure ce schéma (Dhatt *et al.*, 1994) sont de deux ordres : en premier lieu de faibles capacités de stockage 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.

**Boucle sur les pas de temps**



De nombreux cas tests ont été mis en œuvre dans la thèse de Al Mikdad (Al Mikdad, 2000). Le lecteur désirant plus de détails pourra utilement se reporter au document original.

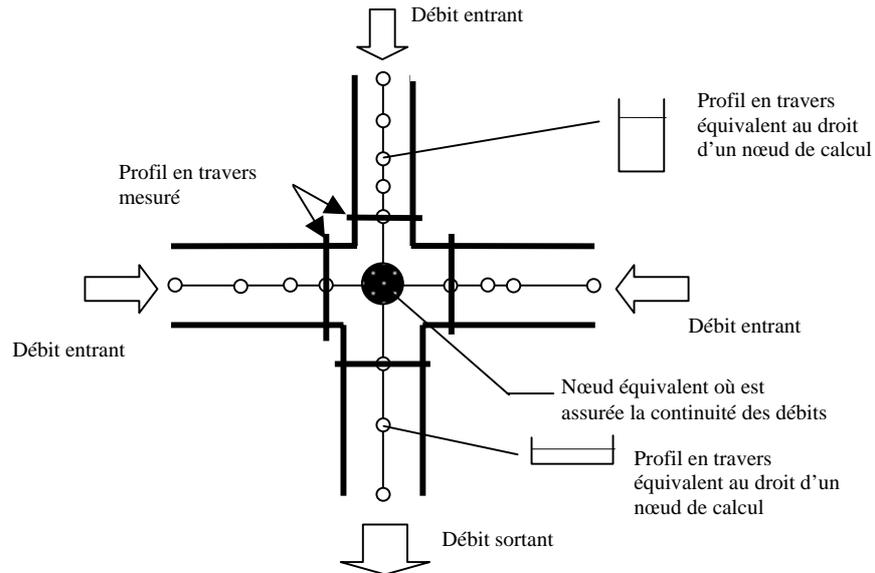
Le maillage est constitué d'éléments finis linéaires de différentes délimités par des nœuds dont la densité va dépendre non seulement des caractéristiques topologiques des réseaux de rues, mais également de la topographie. Ce maillage est construit à partir de profils terrain mesurés par la création de nœuds intermédiaires (ou nœuds de calcul), dont les caractéristiques sont interpolées à partir des profils terrain. Il sera aussi fonction des caractéristiques hydrauliques des écoulements (zones de transition entre régimes notamment). Le schéma suivant illustre un maillage à un carrefour sur lequel ont été reportés des profils 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.



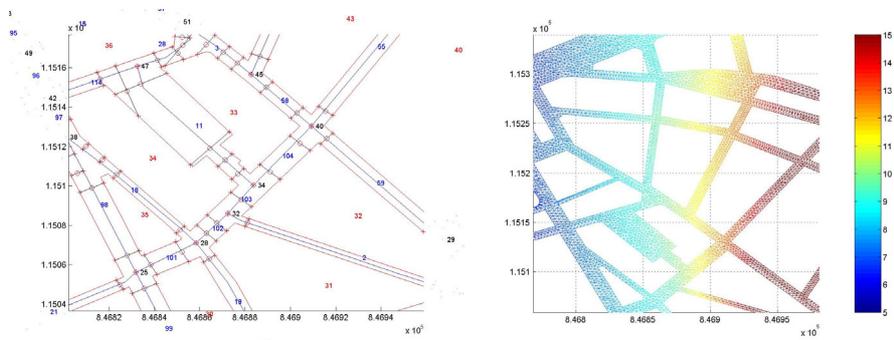
**Figure 2.** Schématisation d'un carrefour.  
Données nécessaires à la mise en œuvre du logiciel d'écoulement superficiel

### *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 pourrait être représenté par deux points de son profil en long, chacun étant relié à un profil en travers rattaché en plan et renseigné en altitude.

Un logiciel spécifique, écrit sous MATLAB permet d'obtenir de manière semi automatiquement la topologie et la topographie des rues (profils en travers) à partir de bases de données urbaines, comme l'illustre la figure 3 (gauche), qui représente le positionnement des profils en travers obtenus sur une portion du quartier de la Canebière à Marseille.



**Figure 3.** Positionnement semi-automatique des profils en travers des rues du quartier de la Canebière à Marseille (extrait) et représentation tridimensionnelle du maillage surfacique

### **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 sont constitués de semis de points ou de profils en travers (renseignés en altitude). Cette topographie est extrapolée à partir du semis de points topographiques et d'un maillage 2D (ou facétisation) constitué pour l'occasion. Un réseau « primaire » de profils en travers est ainsi constitué (figure 3 droite).

### **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.

### **Maillage éléments finis**

A partir des profils en travers du réseau primaire précédents, un maillage 1D « éléments finis » est construit (maillage non homogène) en respectant les conditions de stabilité du code de calcul REM<sup>2</sup>U, qui dépendent de la profondeur d'eau, du pas de temps et de l'écartement des profils en travers.

### *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 qui apparaît dans le terme  $S_f$  présent dans [2]. 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... Le paramètre dispersion indique la plus ou moins grande déperdition d'énergie dans l'ensemble de la section due à la turbulence. Il contribue à stabiliser le calcul.

## **5. Application au cas de Nîmes**

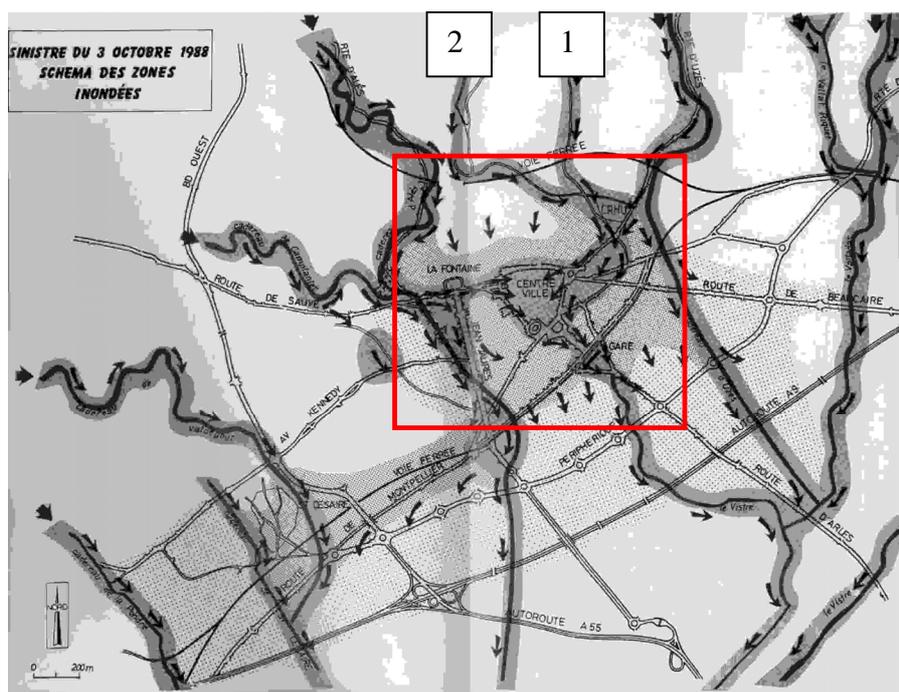
L'épisode pluvieux intense du 3 octobre 1988 – on a relevé plus de 420 mm en 6h – s'est soldé par un bilan très lourd puisqu'il a entraîné dans la ville de Nîmes la perte de 9 vies humaines et occasionné de nombreux dégâts matériels. Le quartier Richelieu, situé au sud de la ligne de chemin de fer de Saint-Germain-des-Fossés, a été l'un des quartiers les plus touchés par la catastrophe.



**Figure 4.** Vues de l'inondation du 3 octobre au centre de Nîmes

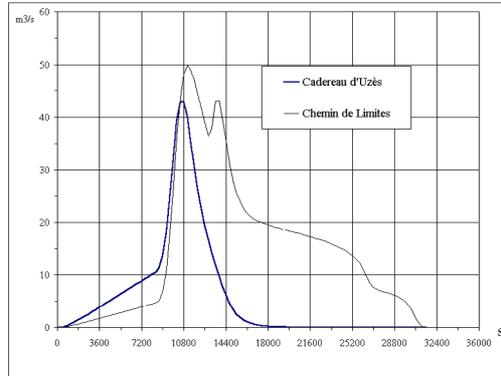
Globalement, le secteur d'étude centré sur le quartier Richelieu s'étend sur un rectangle de 1 500 m de long sur 600 m de large, soit sur 90 ha.

Alimentés par les cadereaux d'Uzès ① et du chemin des limites ②, les eaux se sont engouffrées dans le réseau de rues étroites, envahissant les habitations avec en certains endroits plus de 3 m d'eau (figure 4).

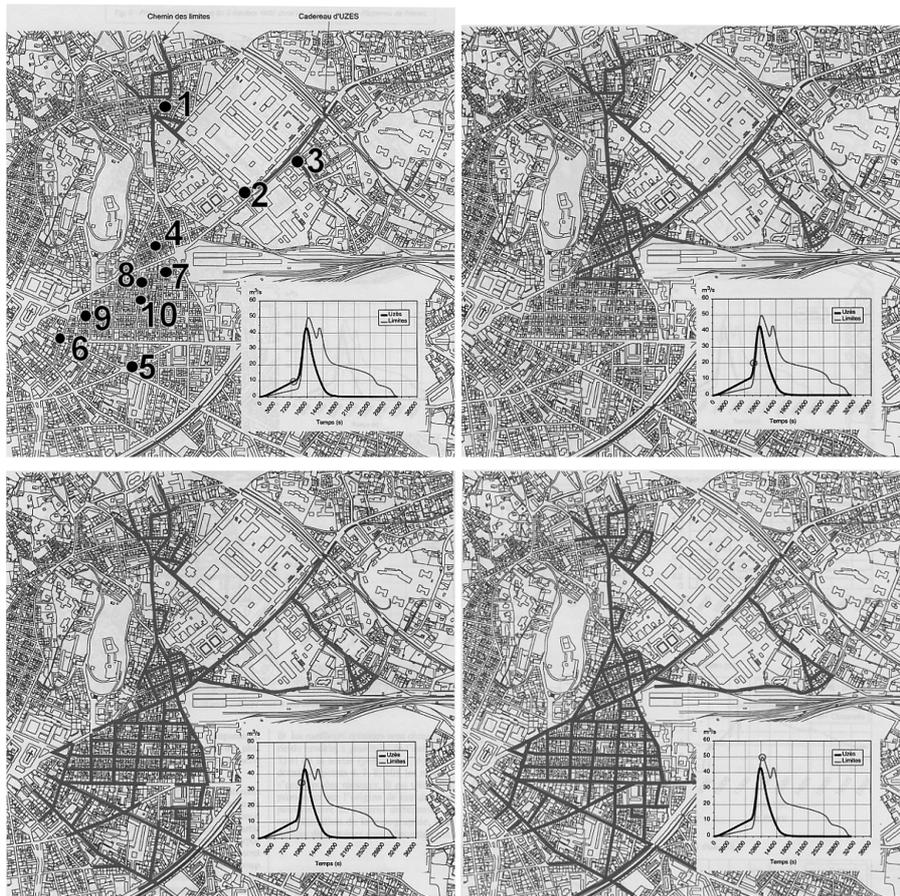


**Figure 5.** Vue d'ensemble des inondations au centre de Nîmes (la zone entourée correspond à la zone d'étude de la figure 7)

La simulation numérique a donc été conduite sur le réseau de voiries tel qu'il apparaît sur la figure 7. Nous disposons de relevés de laisses de crues qui représentent donc des niveaux maximaux atteints par les eaux. Les hydrogrammes d'entrée au droit des deux cadereaux ont été estimés de manière théorique par modélisation des réseaux enterrés à l'aide du modèle PYPYRUS. Nous avons négligé les résurgences des réseaux enterrés en ne considérant que la propagation des eaux en provenance des deux entrées. Ils ont été fournis par la DDE du Gard et reportés sur la figure 6 suivante.



**Figure 6.** Hydrographes d'entrée reconstitués à l'entrée des limites amont. Inventaire des données



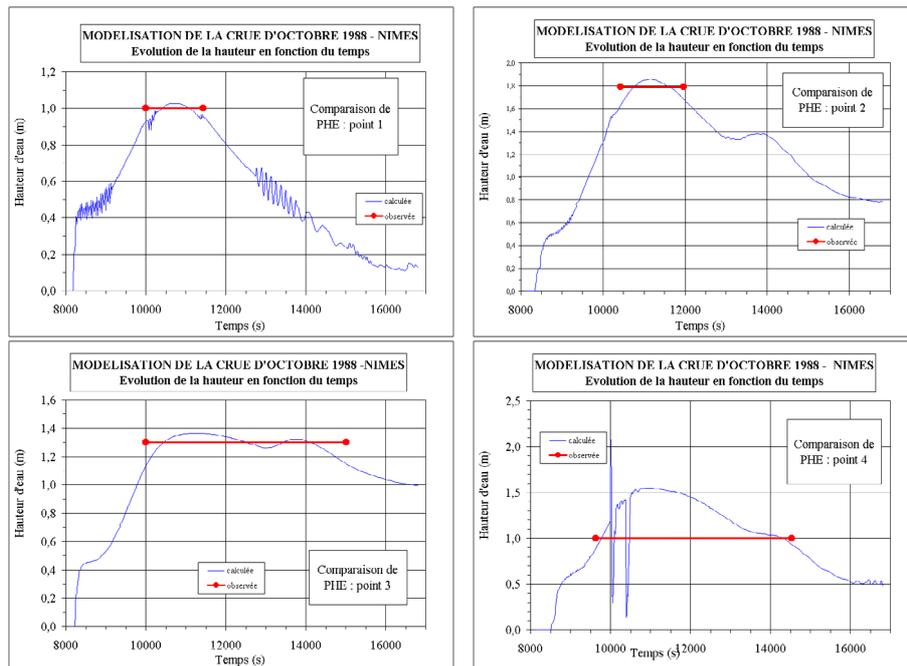
**Figure 7.** Propagation de l'onde de crue après début du passage sous la voie ferrée :  $t=2h15, 2h30, 2h45, 3h10$

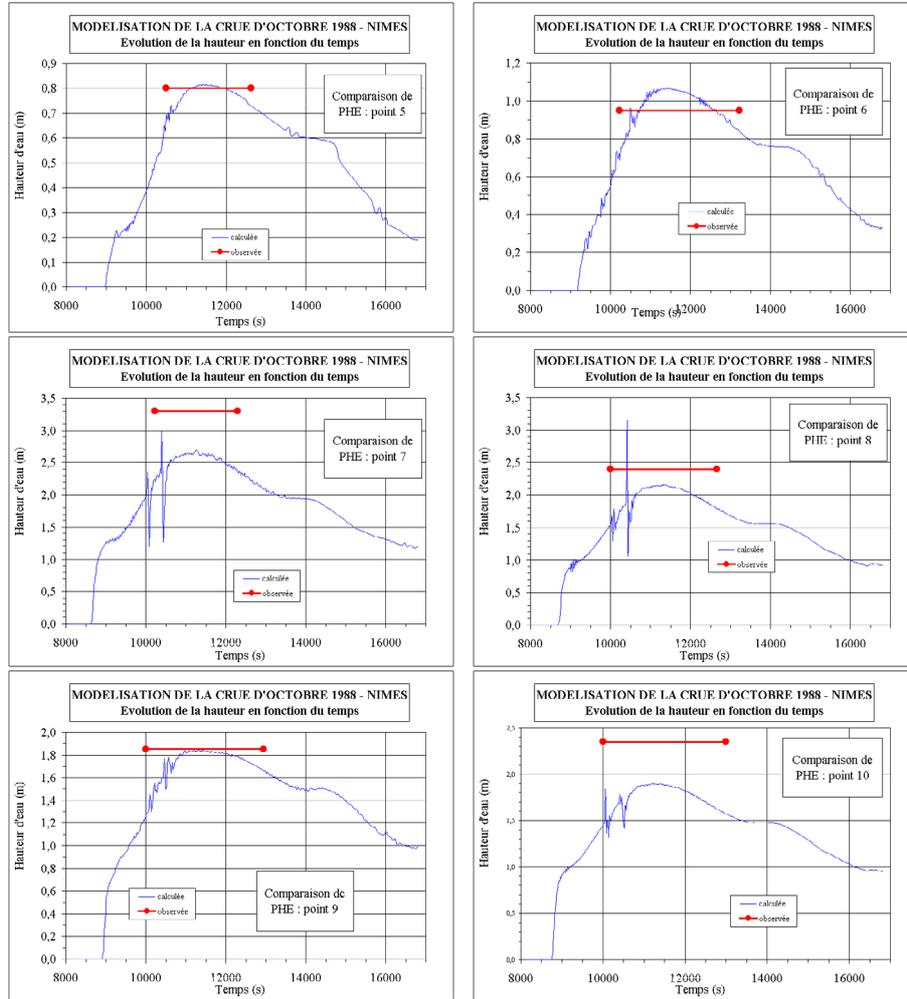
### Inventaire des données

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 (figure 7).

Nous avons également reporté sur la figure 8 quelques hydrogrammes obtenus par le modèle en certains points en leur superposant le point qui représente le niveau d'eau maximal relevé in situ (laisse des eaux). Les résultats sont assez encourageants, comme on peut le constater.

Au niveau du nœud 1, alimenté par le chemin des Limites, le pic de crue est atteint 3 heures après les premiers ruissellements et le débit augmente jusqu'à  $40 \text{ m}^3/\text{s}$ . La crue dure près de 5 heures. L'hydrogramme au nœud 2, alimenté par le cadereau d'Uzès, 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. A partir du point 4, les débits se conjuguent pour donner des temps de submersion plus longs.





**Figure 8.** Comparaison de résultats numériques avec les mesures de laisse des eaux

**Construction du Modèle Numérique de Terrain et du maillage**

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. A 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 des paramètres. Leurs valeurs ont été fixées à  $K = 40 m^{1/3} s^{-1}$  pour la rugosité et à  $\nu_t = 1 m^2 s^{-1}$  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 rapprocher davantage des mesures. La comparaison des résultats du modèle avec les mesures des plus hautes eaux en 10 points du domaine appelle cependant les remarques suivantes :

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.

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, 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...

## **6. Conclusions**

Le code de calcul REM<sup>2</sup>U qui résout les équations bidimensionnelles de Saint-Venant en réseau maillé intègre un certain nombre de fonctionnalités qui le rendent très adapté à la dynamique des crues de forte intensité en milieu urbain généré 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 adapté 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. A 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 :

- amélioration du prétraitement automatique qui utilise directement les données topologiques et bathymétriques disponibles auprès des services techniques des villes pour construire le maillage ;
- 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...) ;
- conduite d'essais sur modèles physiques pour améliorer la quantification des pertes de charge aux carrefours.

#### Remerciements

Ce projet a été réalisé grâce aux 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 ».

#### 7. Bibliographie

- Al Mikdad O., « Modélisation des écoulements en réseaux maillés et ramifiés », Thèse soutenue à l'université de Technologie de Compiègne, 250 p, décembre 2000.
- Chocat B., *Encyclopédie de l'Hydrologie Urbaine et de l'Assainissement*, Lavoisier Editeur, 1997, 1124 pages.
- Desbordes M., « Ruissellement pluvial urbain », *Eurydice 92*, IPGR, 1992.
- 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 Eléments Finis*, Vol. 3 - n°3, 1994, p. 339-361.
- Dhatt G., Touzot G, *Présentation de la méthode des éléments finis*, Maloine Ed., 1981.
- 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.

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, septembre 1999, 1457-1465.

Hingray B, Cappelaere B., Bouvier C., Desbordes M., "Hydraulic vulnerability of an elementary cell", *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, vol. 5, n° 4, octobre 2000.

Hyrodmake 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, n°5, octobre 1989, p. 1063-1071.

Tanguy J.M ., Zhang B. « A finite element morphological model applied to river bed evolution », *6th International Symposium on River Sedimentation*, New-Dehli, India, novembre 1995.