

Inondations urbaines : un indicateur géométrique caractéristique du comportement hydraulique du bâti

Urban Flooding: A Geometric Indicator to Describe the Hydraulic Behavior of Built-Up Areas

B. Hingray, C. Bouvier, M. Desbordes and B. Cappelaere

Volume 13, Number 1, 2000

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/705383ar>

DOI: <https://doi.org/10.7202/705383ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

0992-7158 (print)

1718-8598 (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Hingray, B., Bouvier, C., Desbordes, M. & Cappelaere, B. (2000). Inondations urbaines : un indicateur géométrique caractéristique du comportement hydraulique du bâti. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 13(1), 85–100. <https://doi.org/10.7202/705383ar>

Article abstract

Stormwater runoff generates one of the most critical natural risks in urban environments: impervious surfaces and high drainage network densities lead to frequent urban flooding events, with short process times and within small urban areas. In all parts of the world, urbanisation is growing, and urban flood hazards consequently occur more and more frequently. Examples of important flood damages suffered by urban populations are numerous, especially in tropical regions where the violence and rapidity of tropical storms often lead to an overloading of the drainage system and to the flooding of adjacent built-up areas. Prediction and evaluation of these damages require the determination of some important hydraulic characteristics of the flood, such as maximum water depth or flooding duration. Currently-used models are generally limited to checking the sewer system efficiency. Therefore new models are now expected to represent with accuracy and reliability the stormwater runoff, which can result from sewer system overloading. However, this kind of modelling is hard to carry out because of the geometric complexity of the urban media and because of the rapidity of urban storms and their associated flooding. Moreover, the modelling of the behaviour of the flooded built-up areas should sometimes be integrated into complete models of urban flooding, given their important influence on the hydrodynamics of the flood. However the geometric complexity of these built-up areas prevents us from a complete and accurate description of the different obstacles and water ways encompassed in such areas. Simplified descriptions at a larger scale are consequently to be found.

This paper highlights the important physical characteristics that determine the hydraulic behaviour of every hydraulically-independent urban cell, and suggests a way to represent the exchange and storage laws of built-up areas at different scales: individual plots and blocks of plots. The study was performed in the particular case of Ouagadougou's areas. The hydraulic behaviour of every built-up area can be modelled with three important physical characteristics, the two first of which are related to the structure of the surrounding walls:

- water perviousness : the ease with which the passing flood can enter or exit the plot. This is dependent upon the aperture density, which can vary according to the façade;

- transmissivity: the ease with which water can pass through the plot. It depends on the perviousness of the different external or internal façades of the individual plot. If one façade is waterproof, the transmissivity becomes nil in the perpendicular direction;

- storativity : determined with the storage capacity of an individual plot. It is a function of the internal surface area of the plot.

These three characteristics are functions of height. Moreover, they are essential and sufficient to describe the behaviour of every basic or global urban object (plot, block of plots...). At the "block of plots" level, the transmissivity and storativity concepts are comparable to the hydraulic roughness and urban porosity concepts that have already been proposed in scientific papers (e.g., Braschi et al. 1991). These two characteristics are sufficient for modelling the hydraulic behaviour of every open urban medium. Nevertheless, some urban media are non-transmissive because of a high connection level between the different obstacles. In these cases the perviousness property is very useful for modelling the different exchanges between the built-up areas and the adjacent flooded roads. The residential urban areas of Ouagadougou, used as an illustration for this study (Figure 1), correspond to this case of partitioned urban areas. The structure of the Ouagadougou's residential districts is standard and is organised around the individual plot, a parcel shielding one or several families: the individual plot is isolated from other plots and from the roads by a surrounding wall that constitutes one of the elementary hydraulic objects of the urban environment. The evolution of the flood water depth in a plot adjacent to a flooded road, determined by equation 1, depends on its floodable surface S_c and on its perviousness. Its perviousness is defined by the geometric characteristics of the apertures present in the wall: the type of aperture, weir or orifice; its height, h_s , its length, L_s , and its opening if an orifice. a. Measures of exchanges between roads and plots made during some flood events in Ouagadougou (Hingray 1999) showed that the classical discharge laws for weirs or trough orifices can be used to model these exchanges (equations 2, 3 and 4).

We suggest a way to simulate the exchange and storage laws of these built-up areas at a larger scale: the block of plots. An aggregation approach enables us to define a structure indicator: "l'HistoSeuil" (Figure 2). It is based on the description of the lengths of weirs and apertures found in road façades, and is equivalent to an aperture density function. The exchange discharge between the block of plots and the flooded adjacent road can be computed with a simply convolution (equation 6) between this HistoSeuil and the reference discharge laws for broad-crested weirs (equations 7 and 8). The geometric relevance of the indicator is next discussed: it seems to be a relatively stable geometric characteristic of an urban area (Figure 3). This result is given by a systematic survey of the apertures observed in 24 road façades belonging to 3 different districts of Ouagadougou. The two first are traditional residential districts, more and less developed. The "Patte d'Oie" district is fairly old and was established in the 1970's (numerous well developed plots). The second one (Wemtenga 1) is a recent housing estate (1988) (numerous unfinished or empty plots). The final one (Wemtenga 2) is a very recent district of spontaneous development (disorganised built-up area structure). Furthermore, the hydraulic relevance of this indicator, its ability to reproduce the average hydraulic behaviour of a block of plots, is approached. Initial results seem to be positive. If both the hydraulic and geometric relevance of the structure indicator presented in this paper are validated by the additional work that we are carrying out at this present time, this approach may prove to be useful for the hydraulic modelling of built-up areas. Moreover the study of other types of built-up areas could lead to the determination of a hydraulic typology of urban areas. In particular, this study, performed in the case of Ouagadougou, a big city in a developing country, seems to be valid for every city where the built-up areas are highly partitioned.

Inondations urbaines : un indicateur géométrique caractéristique du comportement hydraulique du bâti

Urban flooding: a geometric indicator to describe the hydraulic behaviour of built-up areas

B. HINGRAY^{1*}, C. BOUVIER¹, M. DESBORDES², B. CAPPELAERE¹

Reçu le 15 septembre 1998, accepté le 25 janvier 2000**

SUMMARY

Stormwater runoff generates one of the most critical natural risks in urban environments: impervious surfaces and high drainage network densities lead to frequent urban flooding events, with short process times and within small urban areas. In all parts of the world, urbanisation is growing, and urban flood hazards consequently occur more and more frequently. Examples of important flood damages suffered by urban populations are numerous, especially in tropical regions where the violence and rapidity of tropical storms often lead to an overloading of the drainage system and to the flooding of adjacent built-up areas. Prediction and evaluation of these damages require the determination of some important hydraulic characteristics of the flood, such as maximum water depth or flooding duration. Currently-used models are generally limited to checking the sewer system efficiency. Therefore new models are now expected to represent with accuracy and reliability the stormwater runoff, which can result from sewer system overloading. However, this kind of modelling is hard to carry out because of the geometric complexity of the urban media and because of the rapidity of urban storms and their associated flooding. Moreover, the modelling of the behaviour of the flooded built-up areas should sometimes be integrated into complete models of urban flooding, given their important influence on the hydrodynamics of the flood. However the geometric complexity of these built-up areas prevents us from a complete and accurate description of the different obstacles and water ways encompassed in such areas. Simplified descriptions at a larger scale are consequently to be found.

1. Laboratoire d'hydrologie, ORSTOM, P 5045, 911 av. Agropolis, 34 032 Montpellier cedex 1, France.

2. Laboratoire d'hydrologie, Université des sciences et techniques du Languedoc, Place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier cedex 5, France.

* Correspondance. E-mail : Benoit.Hingray@epfl.ch

** Les commentaires seront reçus jusqu'au 15 février 2001.

This paper highlights the important physical characteristics that determine the hydraulic behaviour of every hydraulically-independent urban cell, and suggests a way to represent the exchange and storage laws of built-up areas at different scales: individual plots and blocks of plots. The study was performed in the particular case of Ouagadougou's areas. The hydraulic behaviour of every built-up area can be modelled with three important physical characteristics, the two first of which are related to the structure of the surrounding walls:

Water perviousness: the ease with which the passing flood can enter or exit the plot. This is dependent upon the aperture density, which can vary according to the façade.

Transmissivity: the ease with which water can pass through the plot. It depends on the perviousness of the different external or internal façades of the individual plot. If one façade is waterproof, the transmissivity becomes nil in the perpendicular direction.

Storativity: determined with the storage capacity of an individual plot. It is a function of the internal surface area of the plot.

These three characteristics are functions of height. Moreover, they are essential and sufficient to describe the behaviour of every basic or global urban object (plot, block of plots...). At the "block of plots" level, the transmissivity and storativity concepts are comparable to the hydraulic roughness and urban porosity concepts that have already been proposed in scientific papers (e.g., BRASCHI *et al.*, 1991). These two characteristics are sufficient for modelling the hydraulic behaviour of every open urban medium. Nevertheless, some urban media are non-transmissive because of a high connection level between the different obstacles. In these cases the perviousness property is very useful for modelling the different exchanges between the built-up areas and the adjacent flooded roads. The residential urban areas of Ouagadougou, used as an illustration for this study (*figure 1*), correspond to this case of partitioned urban areas. The structure of the Ouagadougou's residential districts is standard and is organised around the individual plot, a parcel shielding one or several families: the individual plot is isolated from other plots and from the roads by a surrounding wall that constitutes one of the elementary hydraulic objects of the urban environment. The evolution of the flood water depth in a plot adjacent to a flooded road, determined by equation 1, depends on its floodable surface S_c and on its perviousness. Its perviousness is defined by the geometric characteristics of the apertures present in the wall: the type of aperture, weir or orifice; its height, h_s , its length, L_s , and its opening if an orifice, a . Measures of exchanges between roads and plots made during some flood events in Ouagadougou (HINGRAY, 1999) showed that the classical discharge laws for weirs or trough orifices can be used to model these exchanges (equations 2, 3 and 4).

We suggest a way to simulate the exchange and storage laws of these built-up areas at a larger scale: the block of plots. An aggregation approach enables us to define a structure indicator: "1'HistoSeuil" (*figure 2*). It is based on the description of the lengths of weirs and apertures found in road façades, and is equivalent to an aperture density function. The exchange discharge between the block of plots and the flooded adjacent road can be computed with a simple convolution (equation 6) between this HistoSeuil and the reference discharge laws for broad-crested weirs (equations 7 and 8). The *geometric* relevance of the indicator is next discussed: it seems to be a relatively stable geometric characteristic of an urban area (*figure 3*). This result is given by a systematic survey of the apertures observed in 24 road façades belonging to 3 different districts of Ouagadougou. The two first are traditional residential districts, more and less developed. The "Patte d'Oie" district is fairly old and was established in the 1970's (numerous well developed plots). The second one (Wemtenga 1) is a recent housing estate (1988) (numerous unfinished or

empty plots). The final one (Wemtenga 2) is a very recent district of spontaneous development (disorganised built-up area structure). Furthermore, the hydraulic relevance of this indicator, its ability to reproduce the average hydraulic behaviour of a block of plots, is approached. Initial results seem to be positive. If both the hydraulic and geometric relevance of the structure indicator presented in this paper are validated by the additional work that we are carrying out at this present time, this approach may prove to be useful for the hydraulic modelling of built-up areas. Moreover the study of other types of built-up areas could lead to the determination of a hydraulic typology of urban areas. In particular, this study, performed in the case of Ouagadougou, a big city in a developing country, seems to be valid for every city where the built-up areas are highly partitioned.

Key-words: *urban, flooding, hydrology, hydraulics, model, scaling, Ouagadougou, aggregation approach, perviousness, built-up areas.*

RÉSUMÉ

La prévision des inondations urbaines et de leur impact sur le milieu passe par la modélisation précise et lisible des flux inondants. Leur représentation est cependant rendue difficile par le caractère transitoire et multidirectionnel des écoulements, dans un milieu dont la géométrie est très irrégulière. Cet article traite plus spécifiquement du comportement du bâti africain vis-à-vis des écoulements, en situation inondante, et des lois de stockage et de vidange que l'on peut définir à différentes échelles représentatives de l'habitat : concession, bloc de concessions. Nous présentons trois propriétés du bâti nécessaires et suffisantes pour décrire le comportement hydraulique du milieu à ces échelles : sa pénétrabilité, sa stockabilité et sa transmissivité. L'étude du comportement hydraulique de l'objet bâti élémentaire, la concession, nous permet de relier ces propriétés à des caractéristiques géométriques de cet objet. Une approche agrégative conduit ensuite à définir un indicateur de la structure géométrique du bâti, l'HistoSeuil, équivalent à une densité d'ouvertures et caractéristique de la pénétrabilité du bâti. L'étude de sa pertinence géométrique, i.e. sa variabilité intra- et inter-quartiers a été réalisée dans le cas particulier de la ville de Ouagadougou (Burkina Faso) ; elle est basée sur le relevé systématique des ouvertures observables sur différentes façades de voiries de trois quartiers de types différents, (habitat individuel et spontané). Sa pertinence hydraulique, i.e. sa capacité à reproduire le comportement hydraulique moyen de l'objet urbain modélisé, est enfin abordée. Développée dans le contexte particulier de Ouagadougou, cette approche est généralisable à des configurations urbaines très diverses.

Mots clés : *inondation, urbain, hydrologie, hydraulique, modèle, changement d'échelle, Ouagadougou, agrégation, pénétrabilité, bâti.*

1 – INTRODUCTION

Le risque pluvial, ou le risque d'inondation par ruissellement pluvial, résulte de l'association d'un aléa d'ordre climatique (les précipitations, les ruissellements et les crues qui en résultent), et d'une vulnérabilité des zones exposées. La vulnérabilité peut être évaluée, pour un milieu donné, à partir de différentes informations concernant le type d'occupation des sols et divers autres facteurs d'ordre socio-économiques (TORTEROTOT, 1993). La caractérisation de l'aléa

hydraulique, résultant d'un aléa climatique donné, consiste à décrire les caractéristiques des écoulements (trajectoires, vitesses, hauteurs d'eau) et plus particulièrement les caractéristiques des inondations (étendue, profondeur, durée) dans le milieu étudié. Les méthodes actuelles destinées à caractériser l'aléa hydraulique en milieu urbain restent encore assez rudimentaires et elles sont essentiellement destinées au calcul des réseaux d'assainissement. Face aux limites des modèles classiques, les hydrologues tentent maintenant de modéliser les flux dans des situations de crise lorsqu'ils dépassent les capacités du réseau et se propagent dans le tissu urbain (BOUVIER et DESBORDES, 1990). On parle ainsi davantage de modèles d'inondabilité que de ruissellement pluvial (ICUSD, 1999). Ces modèles restent cependant du domaine de la recherche, et se heurtent actuellement à plusieurs types de difficultés : les phénomènes à décrire sont multiples (hydrologie de surface, hydraulique à surface libre ou en charge), le tissu urbain est irrégulier (topographie contrastée, milieu hétérogène), le fonctionnement du réseau de drainage est complexe (réseau maillé et instationnaire) et surtout, le comportement du tissu urbain, qui en cas de défaillance du réseau de drainage va recevoir les flux des débordements, est méconnu (DESBORDES, 1997). De ce fait, la plupart des modèles existants font d'importantes simplifications :

H1 : la modélisation de l'inondation du milieu se limite à la modélisation des flux dans le réseau de drainage superficiel constitué essentiellement des rues ; le comportement hydraulique des zones bâties adjacentes et son rôle sur la dynamique de la crue est négligé.

H2 : l'évolution de la hauteur d'inondation dans les zones bâties est supposée être la même que celle de la crue dans les rues inondées adjacentes.

Ces deux hypothèses peuvent être invalides dans le cas d'inondations pluviales (HINGRAY, 1999). Il peut donc s'avérer souhaitable, voire indispensable, de modéliser le comportement de ces zones bâties pour améliorer la fiabilité des modèles d'inondabilité en milieu urbain, ou tout du moins pour évaluer avec plus de précision les paramètres de submersion d'une zone bâtie inondée. Le travail présenté dans cet article a pour objet de montrer comment il est possible de modéliser le comportement hydraulique des zones bâties dites cloisonnées observées sur différents quartiers d'habitat individuel à Ouagadougou (Burkina Faso).

2 – LE TISSU URBAIN : STRUCTURE, TEXTURE ET HYDRODYNAMIQUE

2.1 Caractéristiques physiques et caractéristiques hydrodynamiques

En se référant aux études menées sur les relations entre caractéristiques physiques et caractéristiques hydrodynamiques des milieux poreux (PERRIER, 1995) on peut supposer que le comportement des zones d'obstacles constituant le milieu urbain, dépend plus de leur structure que de leur texture, i.e. plus

des liens entre les bâtiments et entre les obstacles, que du nombre de bâtiments et d'obstacles à l'hectare.

Le milieu urbain est par nature un milieu très structuré et cette structure se retrouve à de nombreuses échelles (FRANKHAUSER, 1993). À l'échelle d'un bloc d'habitations, défini par les voies le délimitant, et donc constitué de différentes parcelles contiguës (dénommées concessions en milieu africain), la structure est déterminée par différents obstacles « ponctuels » tels que murets, talus, habitations. Pour reprendre les termes des pédologues, on peut distinguer à l'extrême, suivant la densité et l'organisation de ces obstacles internes aux blocs d'habitations, les structures particulières, décrivant le caractère très isolé des différents obstacles, des structures massives mettant en évidence leur niveau d'auto-imbrication et d'interconnexion important (PERRIER, 1995). On conçoit facilement que ces deux types de structures déterminent des phénomènes hydrauliques prépondérants de nature différente et qu'ils nécessitent *a priori* des types de représentation différents.

2.2 Le point de vue de la goutte d'eau

Le comportement d'une zone d'obstacle peut être déterminé à l'aide de trois caractéristiques physiques importantes du milieu, fonctions de la hauteur et liées pour les deux premières à sa structure :

Sa **pénétrabilité** ou sa **capacité à laisser entrer ou sortir de l'eau**. Ce terme est réservé à la description d'une façade quelconque d'un quartier bâti (toute section verticale au sens de coupe du quartier). La pénétrabilité dépend de la densité d'ouvertures dans la façade.

Sa **transmissivité** ou sa **capacité à être traversé par les écoulements**. Elle dépend de l'ouverture des différentes façades internes et externes composant le quartier mais aussi de leur organisation relative. Un obstacle imperméable traversant le quartier suffit pour que ce dernier ne puisse pas transmettre d'eau dans la direction perpendiculaire correspondante.

Sa **stockabilité** ou sa **capacité de stockage interne**. Elle est fonction de la densité du bâti interne au quartier.

À l'échelle d'un quartier, la notion de transmissivité est à rapprocher du concept de rugosité hydraulique qui est un paramètre primordial des modèles d'écoulements en milieu naturel, et dont le domaine d'application est actuellement élargi aux modèles d'écoulements dans des milieux fortement encombrés tels que le milieu urbain (KINOSHITA *et al.*, 1996 ; RICCARDI, 1997). La stockabilité a été évoquée dans la littérature scientifique sous la forme d'un coefficient de « porosité urbaine » calculé à partir du rapport entre la surface non construite et la surface totale du quartier : elle est utilisée dans les équations de bilan de flux (BRASCHI *et al.*, 1991). Ces deux caractéristiques sont suffisantes lorsque l'on veut décrire le comportement hydraulique d'un quartier transmetteur, c'est-à-dire relativement ouvert. Dans le cas contraire, la connaissance de sa pénétrabilité est indispensable, en particulier pour quantifier les échanges entre le bâti et le réseau de drainage. C'est le cas pour les quartiers d'habitat individuel de la ville de Ouagadougou, capitale du Burkina Faso.

2.3 Le tissu urbain ouagalais correspondant à l'habitat individuel

Il semble possible pour ce type de quartiers qui couvrent la plus grande partie de la ville, de dégager un mode d'organisation standard, impliquant des objets de même nature, différents seulement par leur taille et leur disposition relative (HINGRAY, 1999) (figure 1).

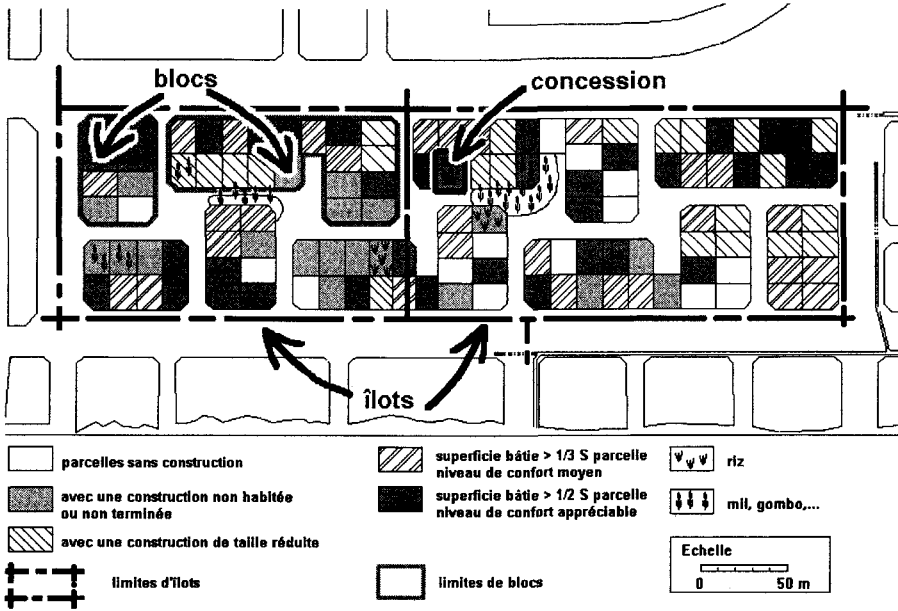


Figure 1 Organisation du bâti sur le quartier d'habitat loti traditionnel de Patte d'Oie - Ouagadougou.

Built-up area organisation - Individual plots and blocks of plots - Patte d'Oie district.

Pour un type d'habitat donné, les blocs d'habitations sont constitués d'une dizaine de concessions, toutes aménagées sur le modèle de l'habitat rural : elles sont entourées pour la majorité d'entre elles, d'un mur d'enceinte en parpaings de 1,5 m de hauteur qui ne comporte qu'une ou deux ouvertures donnant exclusivement sur la chaussée. De ce fait, le bâti est fortement cloisonné. De plus, la concession, hydrauliquement isolée des concessions voisines, constitue l'unité élémentaire hydrologique et hydraulique du bâti.

3 – COMPORTEMENT ET MODÉLISATION HYDRAULIQUE D'UNE CONCESSION

Pour les concessions étudiées à Ouagadougou, on peut faire les observations suivantes.

1. La concession est fréquemment non transmettrice. Son comportement hydraulique dépend alors uniquement de sa stockabilité, décrite par sa surface inondable S_c , et de sa pénétrabilité.

2. On trouve seulement deux types d'ouvertures dans les murs d'enceinte des concessions : des seuils (seuils des portails, murets) et des orifices (jours entre les portails et les seuils).

3. La géométrie de ces ouvertures est simple (radier des seuils et des orifices horizontal et orifices de section rectangulaire).

4. Enfin, ces ouvertures sont presque toujours situées latéralement à la direction principale des écoulements (ceci permettra de négliger les termes d'inertie dans les modèles d'échange présentés ultérieurement (équations 2, 3 et 4)).

Sous ces conditions, l'évolution de la hauteur d'inondation $h_{conc}(t)$ dans une concession adjacente à une rue inondée peut être modélisée en combinant une simple équation de continuité pour décrire l'évolution du volume stocké dans la concession (équation 1) et un modèle de débit pour décrire les flux échangés avec la rue voisine (équations 2,3 ou 4) (le limnigramme de crue dans la rue $h_{rue}(t)$ est supposé connu) :

$$Q_{ex}(h_{rue}(t), h_{conc}(t)) = S_c \cdot \frac{dh_{conc}(t)}{dt} \quad (1)$$

Les mesures des flux échangés entre concession et rue inondée voisine, réalisées *in situ* pendant les différentes crues de la saison des pluies de 1996 (HINGRAY, 1999), montrent que les échanges par les ouvertures décrites plus haut suivent les modèles simples de débit utilisés classiquement pour de telles singularités.

Pour un écoulement sur un seuil de hauteur h_s et de longueur L_s , le modèle de débit suivant utilisé pour un seuil à large crête (CUNGE *et al.*, 1980) convient :

pour le régime noyé :

$$Q_s(h_s, h_{am}, h_{av}) = m \cdot L_s \cdot (h_{av} - h_s) \cdot \sqrt{2g \cdot (h_{am} - h_{av})} \quad (2)$$

pour le régime dénoyé :

$$Q_s(h_s, h_{am}, h_{av}) = \frac{2}{3\sqrt{3}} \cdot m \cdot L_s \cdot \sqrt{2g} \cdot [h_{am} - h_s]^{3/2} \quad (3)$$

où Q_s est le débit d'échange transité sur le seuil, où h_{am} et h_{av} sont les hauteurs d'eau à l'amont et à l'aval du seuil (égales respectivement à h_{rue} et h_{conc} si $h_{rue} > h_{conc}$ ou à h_{conc} et h_{rue} dans le cas contraire) et où m est un coefficient d'écoulement sur le seuil qui caractérise la perte de charge liée au profilé du seuil ($m \leq 1$).

Un orifice rectangulaire de longueur L_s et d'ouverture a se comporte comme un seuil tant que l'eau ne le submerge pas (écoulement à surface libre) :

$h_{am}(t) < h_s + a$; lorsqu'il est submergé (écoulement en charge : $h_{am}(t) \geq h_s + a$), le débit qu'il transite, Q_o , peut être approché par le débit Q_{s1} d'un premier seuil de longueur L_s dont la cote est égale à celle du radier de l'orifice, auquel on retranche le débit Q_{s2} d'un deuxième seuil de même longueur, dont la cote est égale à la cote supérieure de l'orifice (BAUME, 1987). Le modèle d'écoulement par un orifice de hauteur de seuil h_s et d'ouverture a peut donc s'écrire quel que soit le régime d'écoulement sous la forme suivante ¹ :

$$Q_o(h_s, a, h_{am}, h_{av}) = Q_{s1}(h_s, h_{am}, h_{av}) - Q_{s2}(h_s + h_{am}, h_{av}) \quad (4)$$

La résolution numérique du modèle précédent (équations (1) + (2) ou (1) + (3) dans le cas d'une ouverture de type seuil ; équations (1) + (4) dans le cas d'un orifice) permet de simuler l'inondation d'une concession donnée et d'en déduire les différents paramètres de submersion souhaités.

4 – MODÉLISATION HYDRAULIQUE À L'ÉCHELLE DU BLOC DE CONCESSIONS

Le modèle d'inondation précédent nous a permis de déterminer, pour différentes crues observées dans les rues de quartiers fréquemment inondés de Ouagadougou, les valeurs des paramètres d'inondation de plus de 1 000 concessions. Les résultats de cette étude montrent que l'hypothèse d'évolution simultanée entre les hauteurs d'eau dans le bâti et dans la rue (v. intro., hypothèse H2) n'était pas réellement pertinente pour les inondations pluviales rapides : l'inondation dans les concessions peut être fortement atténuée par rapport à l'inondation dans les rues adjacentes (HINGRAY *et al.*, 1999). Quand on cherche à modéliser l'inondation d'un quartier entier, le nombre considérable de concessions (plus de 2 500 concessions au km² sur les quartiers étudiés) interdit par ailleurs une description individuelle de toutes ces concessions. Un changement d'échelle pour la description et la modélisation hydraulique des zones bâties s'avère donc nécessaire. Le bloc de concessions, délimité par des rues voisines, apparaît comme étant l'objet urbain à l'échelle la mieux adaptée.

4.1 Principe de la modélisation

La modélisation à l'échelle d'un bloc de concessions présentée par la suite a pour objectif de décrire le comportement moyen des différentes concessions constituant le bloc. Le modèle d'inondation retenu est obtenu en combinant une

1. Les changements de régimes de l'ouvrage orifice sont déterminés à partir de l'activation ou non des deux seuils le composant (critères géométriques purs) et du changement de régime que l'on observerait sur chacun d'entre eux s'il était indépendant de l'autre (limite noyé/dénoyé lorsque $(h_{am} - h_s) = 3/2 (h_{av} - h_s)$).

équation de continuité équivalente à l'équation 1 et un modèle d'échange de flux entre le bloc et la rue. Les propriétés de pénétrabilité et de stockabilité utilisées à l'échelle de la concession sont redéfinies et réutilisées à l'échelle du bloc. La stockabilité du bloc est approximée par la surface inondable totale de toutes les concessions constituant le bloc. La pénétrabilité du bloc, utilisée pour calculer les débits d'échange entre le bloc et les rues inondées adjacentes, est obtenue à partir d'une approche agrégative qui conduit à en définir un indicateur synthétique, l'HistoSeuil. Les hypothèses ayant conduit à cette modélisation et en particulier à la construction de l'HistoSeuil sont les suivantes :

- le comportement moyen du bloc peut être représenté par le comportement d'une boîte homogène se remplissant de façon uniforme quelles que soient les particularités physiques des différentes concessions le composant : la hauteur d'eau dans le bloc est donc supposée uniforme ;
- de même, la hauteur d'eau dans la rue est supposée constante entre l'amont et l'aval du bloc étudié, ce qui est le cas, dans les rues de Ouagadougou, pour les distances envisagées (rues à pente généralement faible).

4.2 Détermination du débit d'échange entre bloc et rue

Le débit d'échange total entre le bloc et la rue est la somme des débits échangés par les différentes ouvertures (seuils ou orifices) présentes dans la façade externe du bloc. Du fait de la formulation choisie pour les débits échangés par un orifice (équation 4), le comportement de toutes les ouvertures présentes dans la façade d'un bloc peut être modélisé à l'aide des seuls modèles de débit pour les seuils. En remarquant ensuite que le modèle de débit d'un seuil de hauteur h_s dépend linéairement de sa longueur L_s (qu'il corresponde au régime noyé ou dénoyé - modèle (2) ou (3)), on peut décrire, sous certaines conditions, le débit total échangé entre le bloc et la rue adjacente sous la forme synthétique suivante :

$$Q_{ex}(h_{s_i}, L_{s_i}) = q(h_{s_1}) \cdot L_s(h_{s_1}) + q(h_{s_2}) \cdot L_s(h_{s_2}) + \dots + q(h_{s_k}) \cdot L_s(h_{s_k}) \quad (5)$$

où $L_s(h_{s_k})$ est la longueur totale des seuils dont la hauteur de seuil est h_{s_k} (en m) ; et où $q(h_{s_k})$ est le débit par mètre de longueur lorsque la hauteur du seuil est égale à h_{s_k} (en m³/s/m). Le modèle de débit $q(h_{s_k})$ est obtenu à partir du modèle de débit pour un seuil classique, et correspond donc, soit au régime noyé soit au régime dénoyé (équation 2 ou 3). Le régime d'écoulement dépend, pour des hauteurs à l'amont h_{am} et à l'aval h_{av} du seuil, du signe de l'expression $[(h_{am} - h_{s_k}) - 3/2 (h_{av} - h_{s_k})]$ et donc de la seule hauteur h_{s_k} du seuil. Par conséquent, pour un instant t donné, lorsque les hauteurs $h_{am}(t)$ et $h_{av}(t)$ sont fixées, le débit échangé entre le bloc et la rue est uniquement une fonction de la distribution $L_s(h_{s_k})$ des longueurs de seuil relatives aux différentes hauteurs de seuil h_{s_k} (équation 5).

4.3 L'HistoSeuil : un indicateur synthétique de la pénétrabilité du bloc

La distribution $L_s(h_s)$ est un indicateur synthétique de la pénétrabilité du bloc. Cet indicateur est défini par un nombre discret de valeurs $L_s(h_{s_k})$ si l'on observe dans l'interface entre le bloc et la rue un nombre limité d'ouvertures. Ces

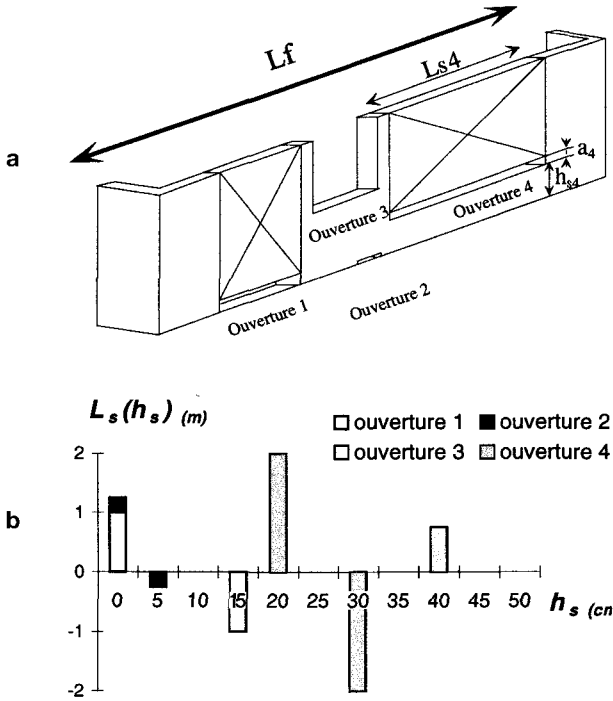


Figure 2 Distribution $L_s(h_s)$ pour une interface entre rue et bloc (ouverture 4 : $h_s = 20$ cm, $L_s = 2$ m et $a = 10$ cm).

- a. Façade décrite (longueur L_f)
- b. Distribution des longueurs de seuil $L_s(h_s)$

$L_s(h_s)$ distribution for a surrounding wall separating block and road.

- a. Described wall
- b. Corresponding distribution of weir width $L_s(h_s)$

valeurs peuvent être positives ou négatives, suivant que les seuils sont à contribution positive ou négative (figure 2, équation 4).

Remarques : la distribution d'ouverture $L_s(h_s)$ peut être une fonction continue et correspondre ainsi à une densité d'ouverture dans l'interface bloc-rue. On peut écrire le débit total d'échange entre la rue et le bloc adjacent sous la forme d'une convolution (équation 6 dans le cas d'une distribution continue) opérée entre la distribution $L_s(h_s)$ et le **modèle de référence du seuil à large crête** (largeur de seuil unitaire et hauteur de seuil nulle). Le modèle de référence, noyau de la convolution, diffère suivant que le seuil fonctionne en régime noyé ou dénoyé (équations 7 et 8).

$$\begin{aligned}
 Q_{ex}(h_{am}, h_{av}) &= \int_{h_s=0}^{h_s=3h_{av}-2h_{am}} L_s(h_s) \cdot q_n^*(h_{av} - h_s) \cdot dh_s + \int_{h_s=3h_{av}-2h_{am}}^{h_s=h_{am}} L_s(h_s) \cdot q_d^*(h_{am} - h_s) \cdot dh_s \quad (6)
 \end{aligned}$$

Noyau pour le régime noyé :

$$q_n^*(h) = m \cdot h \cdot U \quad \text{où} \quad U = \sqrt{2g \cdot (h_{am} - h_{av})} \quad (7)$$

Noyau pour le régime dénoyé :

$$q_d^*(h) = \frac{2}{3\sqrt{3}} \cdot m \cdot \sqrt{2g} \cdot (h)^{3/2} \quad (8)$$

Le modèle d'échange précédent (équation 5 ou 6) est réversible et valable lorsque les flux s'inversent du fait d'une hauteur d'eau plus grande dans le bloc que dans la rue. Le coefficient de débit m , qui a été ici supposé identique pour toutes les ouvertures, dépend en fait naturellement de la nature du seuil et n'est *a priori* pas constant au sein d'un bloc. Il est possible de prendre en compte une telle variabilité mais cela conduit à une formulation différente de l'HistoSeuil (HINGRAY, 1999).

4.4 Pertinence géométrique du concept d'HistoSeuil

La pertinence géométrique de l'indicateur, sa variabilité intra-quartier et sa variabilité inter quartiers, est étudiée sur trois quartiers de natures différentes observés en 1996 à Ouagadougou. La pénétrabilité, décrite par l'HistoSeuil, est une caractéristique purement géométrique du milieu. Un travail de terrain consistant à décrire différentes façades des quartiers en relevant les caractéristiques des ouvertures observables (altitude et dimensions...) est donc incontournable. Pour chacun des quartiers étudiés, 7 à 8 façades de voirie d'une longueur moyenne de 600 m chacune ont ainsi été relevées (BELEM et MOYENGA, 1996). L'HistoSeuil a ensuite été déterminé pour chacune de ces façades. Les HistoSeuils des diverses façades sont présentés sous leur forme cumulée qui correspond à la longueur de seuils actifs pour une hauteur d'eau h donnée, dans la rue ou dans le bloc de concessions. Pour pouvoir être comparé avec les autres indicateurs, chaque HistoSeuil a été normé par la longueur de l'interface décrite L_F (figure 2a) et correspond ainsi à la distribution cumulée $L_s(h_s)/L_F$.

4.4.1 Description des différents quartiers étudiés

Le quartier loti de « Patte d'Oie » est un quartier loti il y a plus d'une vingtaine d'années, situé en périphérie sud de la ville. Assez ancien (années 1970), il est donc assez densément urbanisé. Les différentes concessions sont en général bien mises en valeur.

Le quartier loti de « Wemtenga » est un quartier loti récemment (1988) situé en périphérie est de la ville. Il est encore faiblement urbanisé et comporte un nombre important de chantiers et de concessions non occupées.

Le quartier d'habitat spontané de « Wemtenga » jouxte la limite est du quartier précédent. L'habitat y est désordonné, d'implantation et de densité irrégulières. Il est plus dense que celui du quartier précédent.

Remarque : seule la partie non transmettrice du bâti, au sens de la transmissivité introduite précédemment, a été prise en compte pour l'obtention de l'indicateur : toutes les ouvertures telles que les rues ou les chantiers permet-

tant à l'eau de transiter d'une rue à l'autre ont été soustraites aux façades. La fraction du bâti restante correspond à sa partie potentiellement stockante : la façade correspondante est composée des murs impénétrables et des ouvertures, seuils ou orifices. La répartition, pour les divers quartiers, des différents types d'éléments composant les façades (*tableau 1*) reflète assez bien le degré de valorisation des quartiers.

Tableau 1 Répartition moyenne des parties transmettrices et stockantes sur les trois quartiers étudiés (en % de longueurs).

Average distribution of either transmissive or non transmissive built-up areas: Results for the three different districts (in length percent).

Quartier	Partie transmettrice		Partie stockante	
	% rues	% bâti transmetteur	% murs impénétrables	% ouvertures
Patte d'oie	12	9	65	14
Wemtenga loti	10	14	55	21
Wemtenga spontané	7	23	52	18

4.4.2 Variabilité intra-quartier de l'indicateur « HistoSeuil »

Pour le quartier d'habitat spontané, la longueur de seuils actifs augmente régulièrement en fonction de la hauteur (*figure 3a*), ce qui s'explique par la présence de seuils ou murets de différentes hauteurs correspondant souvent à des murs d'enceinte en cours de construction. De plus, la longueur des seuils de hauteur nulle est importante (entre 10 et 30 % de la longueur du bâti potentiellement stockant). Ceci reflète aussi le grand nombre de parcelles vides et de concessions inachevées.

Pour le quartier de Wemtenga récemment loti, on a pour chaque façade décrite une stabilisation assez rapide de la longueur de seuils actifs (dès que $h > 15$ cm - *figure 3b*). La grande majorité des ouvertures est donc constituée de seuils purs dont la hauteur est nulle. Ils correspondent, pour beaucoup, aux vides laissés par les parcelles non valorisées encore assez nombreuses sur ce quartier.

Pour le quartier loti ancien de Patte d'Oie, la longueur relative de seuils actifs est maximum pour les seuils de hauteur nulle et décroît sensiblement avec la hauteur allant parfois jusqu'à s'annuler pour certaines voies (excepté pour la voie p1b atypique) (*figure 3c*). Ceci traduit le fait que les ouvertures présentes dans les façades sont essentiellement des orifices (jours entre seuils d'entrée et portails) ; la majorité des concessions sont entourées d'un mur d'enceinte atteignant 2 m et possèdent un portail plein. Contrairement aux deux autres quartiers, ce quartier tend donc à se refermer avec la hauteur.

Bien que chacun des différents quartiers étudiés soit relativement homogène (au moins à grande échelle) du point de vue de l'occupation du sol, la variabilité intra quartier de l'HistoSeuil est assez importante : pour chaque quartier, l'écart type sur les longueurs de seuils actifs des différentes façades est du même ordre de grandeur que la longueur moyenne de seuils actifs ! Certains para-

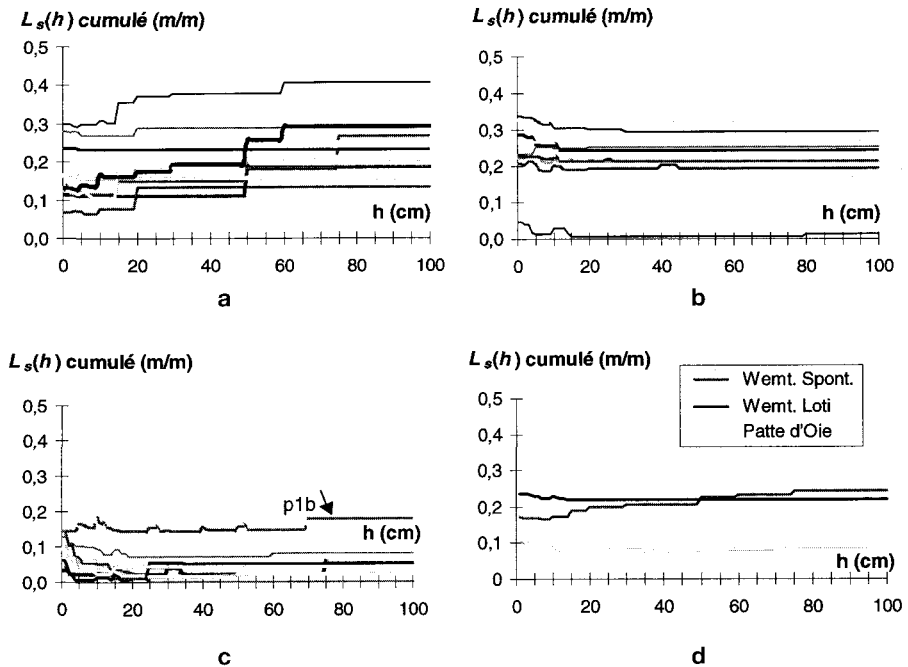


Figure 3 Longueurs cumulées normées de seuils actifs pour une hauteur d'eau amont h . (3a, 3b, 3c : courbes pour les différentes façades observées sur les 3 quartiers étudiés ; 3d : HistoSeuils cumulés moyens pour chacun des 3 quartiers).

- a. quartier Wemtenga d'habitat spontané.
- b. quartier loti récent de Wemtenga.
- c. quartier loti ancien de Patte d'Oie.
- d. HistoSeuils moyens pour les trois quartiers.

Cumulative relative lengths for active weirs versus upstream water depth h . (3a, 3b, 3c: curves for the different road façades observed in the 3 studied districts; 3d: Average cumulative Histoseuil for the 3 districts).

- a. Wemtenga district (spontaneous development).
- b. Wemtenga district (recent housing estate).
- c. Patte d'Oie district (well developed district).
- d. Average cumulative Histoseuils for the 3 districts.

mètres permettent d'expliquer une partie de cette variabilité, le principal étant la situation topographique de la façade du bloc : les résidents qui se trouvent dans les bas fonds se protègent systématiquement contre les crues fréquentes en surélevant par exemple le seuil de leur portail.

4.4.3 Variabilité inter quartiers de l'indicateur

La variabilité inter quartiers des HistoSeuils moyens est du même ordre de grandeur que la variabilité intra quartier : la pertinence de l'indicateur n'est donc pas forcément acquise et cette étude exploratoire se doit d'être complétée par l'observation d'autres façades et d'autres quartiers de Ouagadougou ainsi que par l'étude d'autres villes de la région ou d'ailleurs. Pour les trois quartiers présentés ici, les allures respectives des HistoSeuils moyens sont néanmoins relativement différentes (*figure 3d*). Ceci reste finalement intéressant puisque si l'on peut déterminer un HistoSeuil représentatif d'un quartier donné à partir d'une description statistique de la géométrie du milieu, on peut alors envisager la possibilité de distinguer des comportements hydrauliques différents pour des types de quartiers différents.

Remarque : l'indicateur permet ici d'estimer le degré d'urbanisation ou de valorisation des quartiers qui apparaît relativement lié à l'ouverture du milieu. Il faut cependant rappeler que cette information concerne la partie du bâti non transmettrice et n'est de ce fait que secondaire par rapport à l'information que peut donner la proportion de bâti transmetteur (*tableau 1*) qui décrit à une échelle supérieure les chemins d'écoulement potentiels à travers le bâti entre deux voies parallèles.

4.5 Pertinence hydraulique de l'indicateur

L'étude de la pertinence hydraulique de la modélisation utilisant l'indicateur synthétique de la pénétrabilité d'un bloc consiste à tester sa capacité à reproduire le comportement hydraulique moyen des N concessions hydrauliquement indépendantes constituant le bloc modélisé. Les premiers résultats de cette étude montrent que la performance de ce modèle de bloc agrégé varie d'une part en fonction des caractéristiques des crues dans la rue à l'origine de l'inondation du bloc et d'autre part en fonction des caractéristiques des différentes concessions composant le bloc. La qualité des résultats obtenus avec le modèle agrégé peut de fait se dégrader si la variabilité des caractéristiques de pénétrabilité et de stockabilité des concessions est importante au sein du bloc (HINGRAY, 1999). Il s'avère donc aussi nécessaire de préciser le domaine de validité d'une telle modélisation.

5 - CONCLUSION

À ce stade de l'étude, l'HistoSeuil apparaît donc être un indicateur intéressant d'une certaine géométrie du quartier, permettant de déterminer les flux existant entre le réseau de drainage envahi par les inondations et le bâti riverain. De plus, ce type d'indicateur est adapté aux modèles hydrauliques basés sur des échanges entre casiers contigus. Il offre donc des perspectives intéressantes dans la mesure où il permettrait un accès physique aux caractéristiques hydrodynamiques d'une certaine partie du bâti que l'on pourrait sinon être tenté de déterminer par des calibrations souvent aléatoires des modèles hydrauliques d'écoulements.

Si la pertinence géométrique de cet indicateur est confirmée par la suite, il reste néanmoins à étudier de façon approfondie la pertinence hydraulique de la modélisation agrégée qui l'utilise. Tout d'abord, une description plus fine de la stockabilité du milieu est nécessaire : cette autre caractéristique importante du milieu utilisée dans la modélisation agrégée doit être fonction de la densité de bâti derrière les façades décrites mais aussi de la surface inondable du bloc réellement active pour une hauteur d'inondation donnée (HINGRAY, 1999). Ensuite, le domaine de validité de la modélisation agrégée utilisant ces indicateurs doit être précisé. La capacité de cette modélisation à représenter le comportement moyen des N cellules urbaines indépendantes constituant le bloc est loin d'être immédiate : cette modélisation pourrait sans doute se révéler inadaptée pour certains types de blocs bâtis de même que lorsque l'hétérogénéité du milieu est trop grande. Enfin, il paraît nécessaire de poursuivre les simulations exploratoires pour évaluer les pertes de précision dues au changement d'échelle concession – bloc de concessions ainsi qu'à certaines simplifications opérées par le modèle. Il conviendrait d'étudier par exemple le cas où certaines ouvertures du bloc sont frontales aux écoulements même si ce type de configuration n'a pas été observé sur les bassins étudiés.

L'indicateur présenté dans cet exposé, s'il s'avère toujours pertinent des points de vue géométriques et hydrauliques après l'exploration d'un plus grand nombre de quartiers de types différents, devrait permettre d'établir une typologie hydraulique de l'habitat. Il existe actuellement de nombreuses typologies de l'habitat concernant ses aspects sociologiques, architecturaux, morphologiques. Si l'on pouvait, comme on souhaite le faire, relier une typologie hydraulique à une typologie morphologique de l'habitat, l'intérêt serait évidemment énorme pour l'amélioration des modèles d'inondabilité en milieu urbain. Il resterait alors à trouver une méthode simple et efficace pour déterminer cet Histo-Seuil en s'affranchissant des relevés de pénétrabilité manuels, fastidieux et coûteux, effectués dans le cadre de cette étude.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BAUME J.P., 1987. Modélisation des ouvrages de type : déversoir, vanne, orifice, dans les modèles d'hydraulique à surface libre. CEMAGREF, Division Irrigation, n° 205, 87(1), 5 p.
- BELEM A., MOYENGA H., 1996. Description géométrique et topographique d'un quartier fréquemment inondé à Ouagadougou. ORSTOM, Montpellier, France, *Rapport scientifique*, 30 p.
- BOUVIER C., DESBORDES M., 1990. Perspectives for management of urban storm drainage in western Africa. *Proc., 5th International Conference on Urban Storm Drainage*, Suite, Osaka, Japan, 3, 1577-1580.
- BRASCHI G., GALLATI M., NATALE L., 1991. Modeling Floods in Urban Areas, Università Di Pavia Dipartimento - Di Ingegneria - Idraulica E Ambientale - Giugno, 184, 6 p.
- CUNGE J.A., HOLLY F.M., VERWEY A., 1980. Practical aspects of computational River Hydraulics. Monographs and surveys in Water Resources Engineering, 3, Pitman Publ. Inc., Marshfield, Massach.
- DESBORDES M., 1997. La Gestion Urbaine du Risque d'Inondation. *La Houille Blanche*, 7, 20-24.
- FRANKHAUSER, 1993. Fractalité des structures urbaines, *Th. Doct. Univ.*, Paris I - UFR Géographie, 1, 231 p.

- HINGRAY B., 1999. Comportement et modélisation hydraulique des zones bâties en situation d'inondation : le cas des zones cloisonnées d'habitat individuel de Ouagadougou. Éditions ISTEEM, Université de Montpellier II, Th. Doct., 316 p.
- HINGRAY B., CAPPELAERE B., BOUVIER C., DESBORDES M., 1999. Hydraulic Vulnerability of an Elementary Urban Cell. *Jo. of Hydrol. Eng.*, ASCE, 8 p.
- ICUSD 99. *8th International Conference on Urban Storm Drainage*, IAHR, IAWQ, Aug. 30-Sept. 3 1999, Sidney, Australia.
- KINOSHITA S., SATO S., TERAYAMA H., 1996. Flood simulation by two-dimensional tank model. *Proc., 7th International Conference on Urban Storm Drainage*, Hannover, Germany, 959-964.
- PERRIER E., 1995. Structure géométrique et fonctionnement hydrique des sols : simulations exploratoires. Éditions ORSTOM, *Th. Doct.*, Bondy, 203 p.
- RICCARDI G.A., 1997. The mathematical modelling of flood propagation for the delineation of flood risk zones. *Proc., Rabat Symposium S1, April 1997, Sustainability of Water Resources under Increasing Uncertainty*, IAHS Publ., 240, 355-363.
- TORTEROTOT J.P., 1993. Le coût des dommages dus aux inondations : estimation et analyse des incertitudes. *Th. Doct.*, École nationale des ponts et chaussées, Paris, 250 p.