

Séminaire ULM . 28/6/90 . Montpellier .

Modélisation et hydrologie urbaine.

C. Bouvier

## MODELISATION ET HYDROLOGIE URBAINE

### INTRODUCTION :

Sans prétendre faire le tour complet de la question, nous souhaitons évoquer dans cette présentation deux aspects de la modélisation, ayant trait à l'hydrologie d'une certaine forme d'urbanisation, rencontrée actuellement de plus en plus fréquemment dans les pays en voie de développement. Ces deux aspects sont :

- . d'une part, la conceptualisation physique et mathématique des écoulements en zone urbaine, et nous résumerons les travaux réalisés dans ce domaine sur des petits bassins urbains africains,
- . d'autre part, les développements informatiques nécessaires pour construire toutes les articulations entre données et modèles susceptibles d'intervenir dans le problème complexe de la gestion de la ressource en eau en milieu urbain.

Sur le premier aspect, nous verrons en particulier quelles sont les caractéristiques d'un modèle de ruissellement récemment mis au point à l'Orstom, et pourquoi ces travaux ont été réalisés.

Sur le second, nous évoquerons les perspectives qui existent dans l'utilisation d'un système d'informations géographiques, capable actuellement de gérer une banque de données spatialisées et pluridisciplinaires, de traiter les relations entre ces données et de fournir un support cartographique performant.

### 1. LE TYPE D'URBANISATION ETUDIE.

Depuis une vingtaine d'années apparaissent à la périphérie des villes des PVD de nouvelles formes d'urbanisation. Ces formes sont caractérisées par des taux d'accroissement démographiques extrêmement élevés (minimum 5%, souvent beaucoup plus), et des ressources économiques très faibles.

Ces formes d'urbanisation très spécifiques ne peuvent être comparées aux zones urbaines classiques, et bien sûr ne peuvent être traitées de la même façon.

L'ORSTOM a été ou reste impliqué dans plusieurs programmes d'étude de ces zones urbaines :

- . en Afrique de l'Ouest, où le suivi de 11 bassins expérimentaux a donné lieu, de 1986 à 1989, à la mise au point d'un modèle de ruissellement superficiel ;
- . au Brésil, où le département SUD intervient sur un programme d'habitat populaire dans l'agglomération de Sao Paulo ;
- . enfin au Mexique, où un programme auquel participent les départements SUD et DEC, se développe actuellement sur la Vallée de Chalco, à la périphérie de Mexico.

L'agglomération de Mexico, par sa situation, sa taille et la rapidité de son évolution, constitue évidemment un sujet d'étude privilégié, et illustre la complexité des problèmes rencontrés.

Mexico s'est construite dans une immense vallée lacustre, progressivement asséchée du 17<sup>e</sup> au 20<sup>e</sup> siècle. Les espaces occupés par les lacs ont été plus récemment urbanisés.

Chalco est l'un des 5 anciens lacs de la Vallée de Mexico. La population de Chalco est passée entre 1980 et 1990 de 50.000 à plus de 400.000 habitants. Les problèmes d'eau rencontrés à Chalco sont principalement:

- . la lutte contre les inondations, favorisées naturellement par le site ;
- . la surexploitation de la nappe phréatique, liée aux besoins en eau des 20 millions d'habitants de Mexico ;
- . l'afflux des eaux usées ("eaux noires") en provenance de Mexico ou d'origines locales, qui sont un risque important pour la santé des habitants et qui présentent également un grave danger de pollution de la nappe.

A Chalco, les recherches sont d'abord axées sur la caractérisation de ces divers effets, et dans une phase ultérieure, sur un schéma d'aménagement susceptible de résoudre les problèmes rencontrés.

A terme, nous prévoyons donc d'utiliser différents modèles pour représenter trois aspects de l'eau dans la ville : écoulement superficiel, écoulement souterrain, qualité des écoulements.

Pour l'aspect écoulement superficiel, nous chercherons à valider le modèle mis au point pour des conditions d'urbanisation rencontrées en Afrique de l'Ouest, qui semblent a priori assez voisines de celles existant à Chalco. Nous décrivons les principales caractéristiques de ce modèle dans le paragraphe suivant.

## 2. MODELE DE RUISSELLEMENT SUPERFICIEL EN MILIEU URBAIN

La nécessité de mettre au point ce modèle correspond à l'émergence des nouvelles formes d'urbanisation définies au paragraphe précédent. Par rapport à une urbanisation plus classique et davantage étudiée, ces nouvelles formes d'urbanisation se distinguent par :

- . un mode d'occupation des sols pour lequel la prédominance des surfaces imperméabilisées est nettement moins affirmée ;
- . une densité de drainage moins importante, dans la mesure où les réseaux se résument la plupart du temps à un collecteur principal, avec absence de drainage tertiaire et secondaire.

Il en résulte, pour résumer, des différences notables dans l'évaluation d'un coefficient de ruissellement du bassin considéré (pour la fonction de production), et dans l'évaluation d'un lag-time ou d'un temps de concentration (pour la fonction de transfert). Plus profondément, les concepts utilisés pour représenter les écoulements superficiels peuvent être remis en question.

### 2.1 Caractéristiques du modèle de ruissellement.

Pour traduire les spécificités des écoulements en zone urbaine "type PVD", les caractéristiques du modèle retenu sont les suivantes (figure 1) :

- . on distingue initialement 3 types d'états de surface : imperméabilisés, naturels nus et naturels recouverts de végétation ;
- . pour la fonction de production, les pertes (en volume) à l'écoulement sont considérées de la façon suivante :
  - \* nulles, sur les surfaces imperméabilisées,
  - \* séparées en pertes initiales (STO) et en pertes continues dans le temps (1-COEF) proportionnelles à l'intensité de l'averse, sur les surfaces naturelles nues,
  - \* totales (aucun écoulement), sur les surfaces naturelles couvertes de végétation ;
- . chaque hyétogramme de pluie brute, décomposé en pas de temps de 5 minutes, est alors transformé en hyétogramme de pluie nette, sur chacun des 3 types de surface. On calcule ensuite un hyétogramme

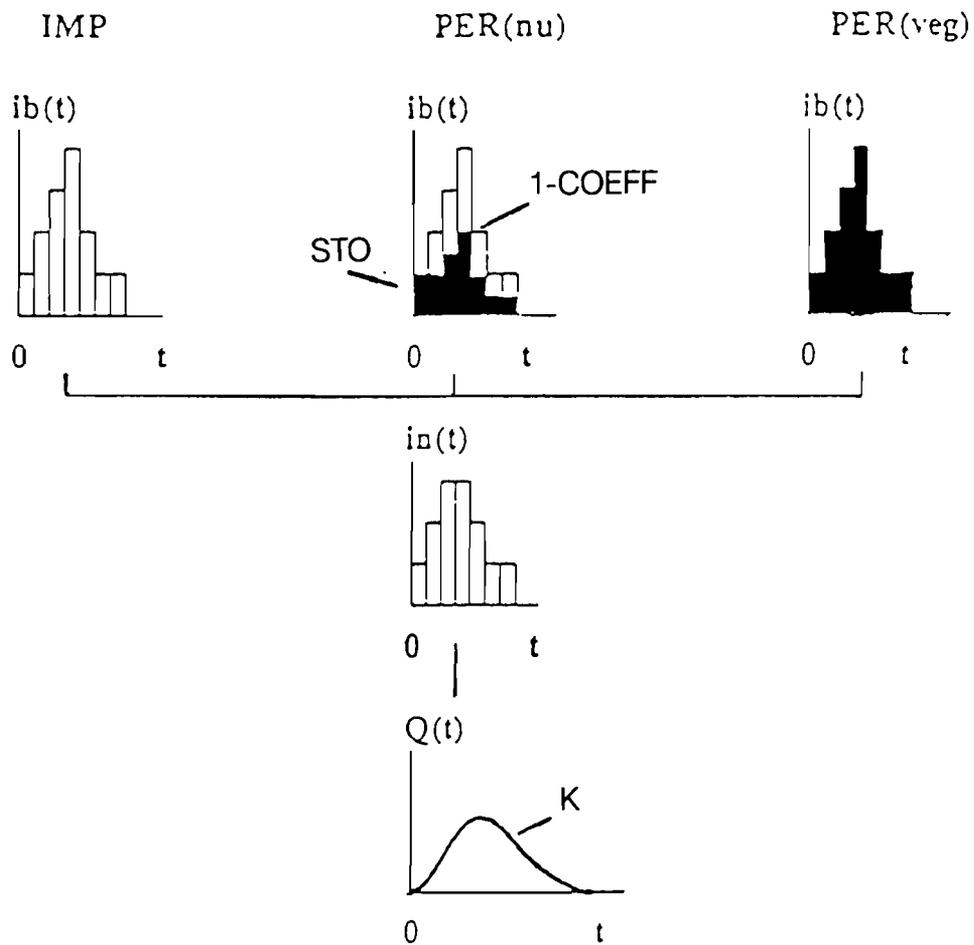
moyen de la pluie nette sur le bassin, par composition des 3 hyétogrammes de pluie nette, pondérés par les différentes proportions des 3 états de surface ;

. pour la fonction de transfert, le hyétogramme net moyen est transformé en hydrogramme de crue en utilisant un modèle de stockage linéaire à un réservoir, faisant intervenir un paramètre K tel que :

$$Q(t) = A \cdot \int_0^t \text{in}(t-s) \cdot \frac{1}{K} \cdot \exp\left(-\frac{s}{K}\right) \cdot ds$$

Le modèle fait donc intervenir 3 paramètres, STO et COEF pour la production, K pour le transfert. Ces trois paramètres sont des caractéristiques du bassin : en particulier, ils restent invariants d'un événement averse-crue à l'autre.

FIGURE 1



$K, STO, COEF$  invariants d'un événement à l'autre

$$Q(t) = A \int_0^t i_n(t-s) \cdot 1/K \cdot \exp(-s/K) \cdot ds$$

## 2.2 Analyse du modèle

. L'analyse du modèle a été réalisée à partir de 11 bassins expérimentaux ouest-africains. Les caractéristiques de ces bassins sont les suivantes :

superficies comprises entre	22 et 1110 hectares,
pentés	6,5 et 14,0 m/km,
imperméabilisation	10 et 55%,
couverture végétale	0 et 55%.

. Sur chacun des bassins, le modèle a été analysé en séparant le calage de la fonction de production de celui de la fonction de transfert. Dans l'ordre, nous avons cherché à reconstituer correctement les volumes ruisselés, puis ensuite les débits de pointe de crue. Le nombre d'événements averse-crue utilisé pour le calage du modèle variait de 14 à 61 suivant les bassins.

. L'écart quadratique total, rapporté à la moyenne des observations :

$$EQT = \frac{\sqrt{\sum (X_{obs} - X_{cal})^2}}{\sum X_{obs}}$$

a été utilisé pour procéder au calage du modèle.

(x représente soit la lame ruisselée, pour le calage de la fonction de production, soit la valeur du débit de pointe pour le calage de la fonction de transfert).

. Chaque échantillon a été divisé en 2 sous-échantillons : les paramètres du modèle finalement retenus pour le calage sont ceux qui minimisent le critère :

$$EQTC = \text{Sup} (EQT_1, EQT_2)$$

## 2.3 Résultats

. La précision moyenne du modèle, pour la reconstitution des lames ruisselées et des débits de pointe de crue, est de l'ordre de 25 %, relativement au critère ECM, tel que :

$$ECM = \frac{\sum |X_{obs} - X_{cal}|}{\sum X_{obs}}$$

En termes d'écart quadratique total, cette précision est de l'ordre de 10%.

. Les valeurs des paramètres obtenues lors du calage du modèle ont pu être reliées à des indicateurs globaux accessibles à la mesure :

\* pour les paramètres de production STO et COEF, les valeurs à utiliser pour modéliser l'écoulement sur un bassin peuvent être reliées à des valeurs expérimentales obtenues sur des parcelles de 1 m<sup>2</sup> par simulation de pluie, par les relations :

$$STO_{mod} = 1,7 \cdot STO_{exp} \quad COEF_{mod} = COEF_{exp} / 1,7$$

qui montrent que les pertes "réelles" sur les parties naturelles nues du bassin sont 1,7 fois plus élevée que les pertes mesurées expérimentalement sur des parcelles de 1 m<sup>2</sup>;

\* le paramètre de transfert, K, peut être relié à la superficie du bassin, A en ha, à la pente du bassin, p en m/km, et au coefficient d'imperméabilisation du bassin, IMP en %, par la relation :

$$K = 0,45 \cdot A^{0,30} \cdot IMP^{-0,45} \cdot p^{-0,39}$$

## 2.4 Limites du modèle.

Le modèle a été conçu pour une situation donnée, mal maîtrisée par les modèles classiques de ruissellement urbain. Inversement, il ne saurait être impunément utilisé hors de cette situation donnée. En particulier, on se gardera de l'appliquer hors du champ défini d'abord par les caractéristiques des bassins étudiés, ensuite par le contexte géographique de ces bassins, c'est à dire l'Afrique de l'Ouest. La validation du modèle hors de ce champ est un exercice auquel nous allons nous livrer à Chalco, en procédant à des mesures hydropluviométriques sur bassin expérimental. Le résultat de cette opération constituera un premier test concernant la robustesse du modèle.

### 3. PERSPECTIVES CONCERNANT L'UTILISATION DES MODELES POUR LA GESTION DE LA RESSOURCE EN EAU.

Les problèmes liés à l'eau évoqués précédemment dans la Vallée de Chalco montrent que ceux-ci ne peuvent se résumer à l'aspect superficiel et quantitatif de l'écoulement. Mais au contraire, intégrer de nombreux aspects, non seulement en rapport avec l'eau (écoulements souterrains, qualité des eaux), mais aussi humains (activités socio-économiques, démographie...).

Indépendamment de la précision des modèles susceptibles de représenter chacun des aspects, ce que nous voulons souligner ici a trait à l'architecture informatique qu'il faut développer pour gérer convenablement la masse de données nécessaire d'une part, et pour appliquer ensuite les modèles décrivant les phénomènes étudiés.

Il existe actuellement un grand nombre de banques de données et de modèles, à usages spécialisés. Dans certains cas, plusieurs modèles sont combinés, mais ne peuvent réellement parvenir à traiter la complexité du milieu urbain. Il manque actuellement un outil "unitaire" et évolutif, capable d'intégrer à la fois :

- . une banque de données pluridisciplinaires,
- . un support cartographique permettant l'interprétation et la présentation des variables,
- . une banque de modèles interchangeables capables de traiter simultanément plusieurs types de phénomènes.

La complexité des facteurs influençant la gestion de la ressource en eau à Chalco, ainsi que la rapidité d'évolution du milieu, nous a conduit à utiliser un système d'informations géographiques (S.I.G.) pour, dans un premier temps, disposer d'un outil permettant :

- . d'obtenir une banque de données spatialisées et pluridisciplinaires, facilement réactualisables, pour obtenir le meilleur suivi de l'évolution du milieu,
- . de traiter ces données à diverses échelles d'espace (et de temps ?), et de croiser les différentes variables pour analyser leurs interrelations,
- . de présenter et d'interpréter ces variables et leur traitement, au moyen d'une cartographie très élaborée.

La constitution d'un "atlas informatisé de Chalco", inspiré dans une certaine mesure par "l'atlas informatisé de Quito", constitue le premier objectif du programme Chalco.

Cela étant dit, il est tentant dans une phase suivante de vouloir transformer la vocation plutôt descriptive du S.I.G. en véritable outil de simulation, destiné par exemple à la gestion de la ressource en eau en milieu urbain. Dans ce cas, les travaux à entreprendre consistent à :

- 1) prévoir une disposition interactive des aménagements et de leurs caractéristiques (voir HYDRAM de J.C. Pouget),
- 2) articuler au système les modèles décrivant les phénomènes étudiés.

Un tel développement d'un S.I.G. permettra effectivement de réaliser la simulation du fonctionnement d'ouvrages (hydrauliques ou autres), en fonction de différentes configurations urbaines projetées, et en fonction bien sûr de ces différents ouvrages dont les performances pourront être comparées pour choisir la meilleure solution.

#### 4. CONCLUSIONS

Parallèlement à d'autres axes de recherches indispensables, tels que les développements conceptuels des modèles, ou l'amélioration des capteurs météorologiques, nous voulons insister sur l'importance d'une architecture informatique autorisant l'utilisation d'un outil "complet" appliqué à la résolution des problèmes pratiques rencontrés dans les PVD.

En milieu urbain, caractérisé par une évolution rapide et par une grande complexité due à la multiplicité des aspects à prendre en compte, nous souhaitons disposer rapidement d'un tel outil, comprenant :

- . une base de données spatialisées, hydrologiques et autres...
- . une cartographie haute performance, aussi bien pour la présentation et l'interprétation de ces données, que pour l'aide à la conception de divers aménagements...
- . des modèles représentant les écoulements ou tout autre phénomène à prendre en compte dans un plan d'aménagement...

La mise au point d'un tel outil pourra s'appuyer sur la base du S.I.G. SAVANE :

- . celui-ci est déjà opérationnel, pour les aspects descriptifs concernant la base de données, leur gestion interdisciplinaire et l'édition cartographique ;

- . il est ouvert à toute modification, et nous disposerons notamment des programmes sources pour développer les applications souhaitées. Il est également gratuit ;
- . il est également déjà interfacé avec d'autres logiciels de traitement des données, en particulier avec un modèle numérique de terrain (MNT) et avec le système PLANETE de traitement des images satellitaires.

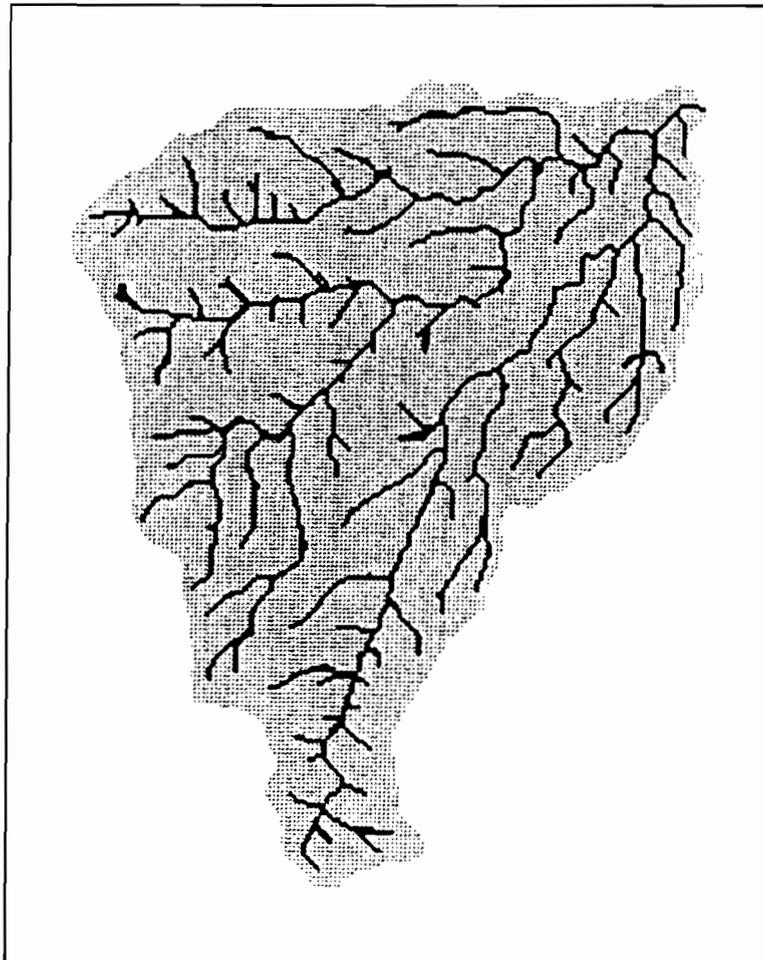
L'application de cet outil, voué à la simulation des écoulements, dépasse largement le cadre de l'hydrologie urbaine, et pourra être étendu au cas des zones rurales : il faut alors prévoir une base de modèles interchangeables adapté aux différents cadres étudiés. Enfin, cet outil répond à l'attente de nos partenaires de coopération, qui attendent de nous des techniques et méthodologies adaptées à la résolution des problèmes concrets.

#### **BIBLIOGRAPHIE :**

- Bouvier C., 1989. Contribution à la modélisation hydrologique des écoulements des bassins urbains de l'Afrique de l'Ouest, dans un but d'application au dimensionnement des ouvrages. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier (France), 313 p.
- Bouvier C., Desbordes M., 1990a. Perspectives for management of urban storm drainage in West Africa. 5th International Conference on Urban Storm Drainage, July 23-27, 1990, Osaka (Japon).
- Bouvier C., Desbordes M., 1990b. Modelling of storm runoff in West African cities. 5th International Conference on Urban Storm Drainage, July 23-27, 1990, Osaka (Japon), 6 p.
- Bouvier C., 1990a. Aspectos de la investigacion para el manejo del recurso agua en el Valle de Chalco. Coloquio "El Agua", 14-15 de mayo de 1990, Naucalpan (Mexique), 10 p.
- Bouvier C., 1990b. Para el manejo del recurso agua en el Valle de Chalco. 9è Coloquio de Hidraulica, Octubre 1990, Zacatecas (Mexique), 12 p.

*TROISIEME JOURNEE U. L. M.*

## **UTILITE ET LIMITES DES MODELES EN HYDROLOGIE**



Laboratoire d'Hydrologie  
ORSTOM  
2051 Avenue du Val de Montferrand  
BP 5045  
34032 Montpellier Cedex 1

28 Juin 1990