

Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération (ORSTOM)

Laboratoire d'Hydrologie - Centre ORSTOM de Montpellier

L'HYDROLOGIE URBAINE A L'ORSTOM :
UN PROGRAMME A LA CROISEE DES CHEMINS

Christophe Bouvier
Unité de Recherche 2E

SOMMAIRE

	Page
INTRODUCTION	1
DOCUMENT n°1 : Présentation du programme ORSTOM-LHM-CIEH	2
1. Contenu thématique du programme	2
2. Modalités d'exécution du programme	6
3. Perspectives concernant les axes de recherche et les opérations à développer en matière de modélisation hydrologique	8
DOCUMENT n°2 : Rapport de la mission réalisée à Mexico du 5 au 21 janvier 1989	11
1. La ville de Mexico : aperçu historique des problèmes urbains	13
2. Présentation des instances responsables du traitement des problèmes hydrologiques et hydrauliques de la vallée de Mexico	16
3. Présentation du programme d'étude du développement urbain de la vallée de Chalco	21
4. Propositions concernant un programme d'activités hydrologiques	24
CONCLUSION :	29
la définition des objectifs concernant le drainage des eaux pluviales dans les PVD et les moyens à mettre en oeuvre	
BIBLIOGRAPHIE	34
Annexe 1 : Eléments concernant la problématique de la modélisation du ruissellement pluvial dans les villes d'Afrique de l'Ouest	35

INTRODUCTION

Adressé aux membres de la Sous-Commission Scientifique d'Hydrologie, ce dossier contient des éléments permettant d'apprécier la situation actuelle de l'hydrologie urbaine à l'ORSTOM.

Alors que les programmes axés sur ce thème se trouvent à la croisée des chemins venant d'Afrique de l'Ouest et partant vers le Mexique, il semble effectivement nécessaire de faire le point sur les expériences passées et les développements à venir. Ce dossier vous invite à réfléchir sur les moyens qu'il convient de mettre en oeuvre pour répondre à une demande qui constitue actuellement une des priorités des pays en voie de développement.

Vous trouverez donc dans ce dossier deux documents décrivant de façon succincte ce qu'ont été les travaux menés à l'ORSTOM en hydrologie urbaine au cours de ces 3 dernières années, et ce qu'ils pourraient être dans un avenir dont la proximité demande à être précisée :

- . le document n°1 présente le contenu thématique, les principaux résultats et les perspectives du programme consacré aux problèmes d'assainissement pluvial des villes d'Afrique de l'Ouest, développé au cours de ces 3 dernières années par l'ORSTOM en collaboration avec le Laboratoire d'Hydrologie Mathématique (LHM) de l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc et le Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques (CIEH);
- . le document n°2 correspond au rapport que j'ai rédigé à la suite de ma mission à Mexico, qui s'est déroulée du 5 au 21 janvier 1989; ce document décrit la complexité globale des problèmes posés par la gestion de l'eau à Mexico, et contient les grandes lignes d'un projet défini par les départements SDU et Eaux Continentales de l'ORSTOM, consacré à l'étude de l'évolution de Chalco, ville satellite de Mexico;

La conclusion développée dans ce dossier porte sur la définition des objectifs concernant le drainage des eaux pluviales dans les villes des pays en voie de développement, et sur les moyens qu'il convient de mettre en oeuvre pour réaliser ces objectifs.

DOCUMENT n°1 : Le programme ORSTOM-LHM-CIEH

1. Contenu thématique du programme

Ce programme comprend 3 volets, dont l'ensemble illustre la diversité et la pluridisciplinarité des problèmes liés à l'assainissement pluvial.

1.1

Le premier volet de ce programme est consacré à l'**analyse des facteurs qui influencent le ruissellement** en milieu urbain africain. Cette étude a été réalisée à partir de données recueillies sur un ensemble de bassins expérimentaux par l'ORSTOM de la fin des années 70 au début des années 80, à Niamey, Ouagadougou, Bamako, Lome, Cotonou, Abidjan.

Ces données ont été rassemblées, analysées et complétées, et fournissent un minimum de connaissance du milieu urbain, nécessaire à la modélisation ultérieure des écoulements. Les travaux effectués portent notamment sur:

- .a1 l'étude statistique des caractéristiques fines d'averses, qui interviennent dans la production et le transfert de l'écoulement sur les petits bassins versants [1]
- .a2 la détermination expérimentale des caractéristiques hydrodynamiques des sols naturels en milieu urbain, qui ont donné lieu à 4 campagnes de simulation de pluie [2],[3],[4],[5],[6]
- .a3 l'identification des états de surface intervenant dans la production et le transfert de l'écoulement en milieu urbain, et la détermination de leurs coefficients respectifs d'occupation des sols [7]
- .a4 la réalisation de nouvelles mesures hydro-pluviométriques destinées à augmenter le volume de données disponibles [8]

Ces données étant acquises, les travaux actuellement en cours portent sur :

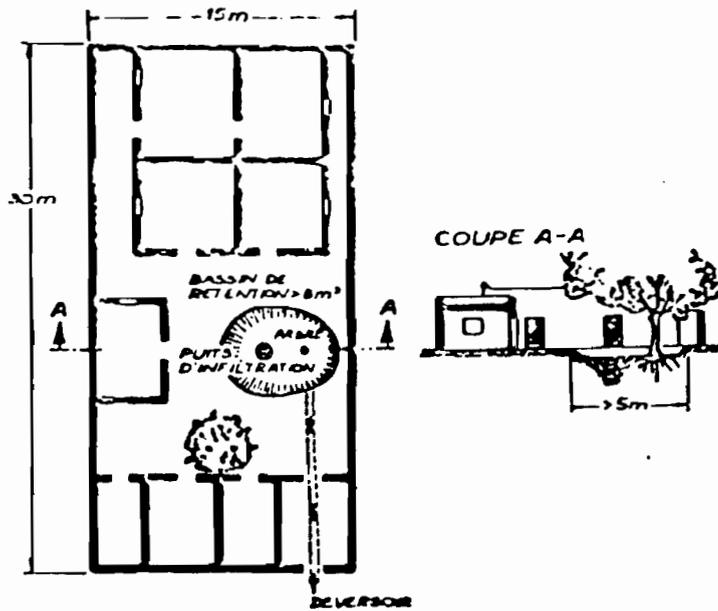
- .a5 le test des hypothèses de fonctionnement des petits bassins urbains et la modélisation hydrologique des écoulements. Ces travaux seront achevés en septembre 1989, et vous trouverez en annexe 1 quelques éléments illustrant la démarche suivie.

1.2

Le second volet de ce programme concerne davantage les **types d'aménagements qu'il convient de promouvoir** dans les PVD. La situation actuelle est dominée par des ouvrages linéaires de type "évacuation rapide", correspondant à un concept hygiéniste de l'assainissement qui a prévalu et prévaut encore dans la plupart des villes. Si ce concept est en soi tout à fait fondé, il conduit néanmoins à des aménagements dont la réalisation se heurte à de nombreuses difficultés dans les PVD : pour résumer, disons simplement que le dimensionnement de tels ouvrages s'accommode mal de la brutalité des averses tropicales d'une part, et que d'autre part, leur conception n'est pas suffisamment évolutive pour s'adapter à l'extension rapide des villes africaines. Ces deux facteurs conduisent à de lourds budgets requis pour l'assainissement, incompatibles avec la fragilité de l'économie locale. Les mêmes problèmes sont d'ailleurs rencontrés, à un degré moindre, dans les pays industrialisés, et ont conduit les ingénieurs et les chercheurs à proposer d'autres aménagements, basés davantage sur la rétention provisoire ou définitive de l'écoulement (voir figure 1).

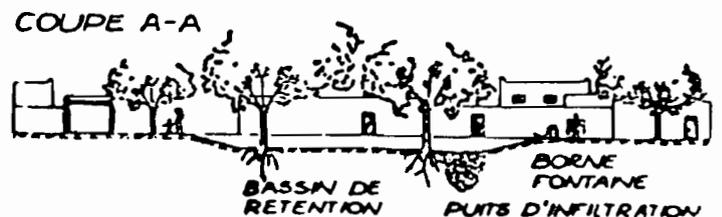
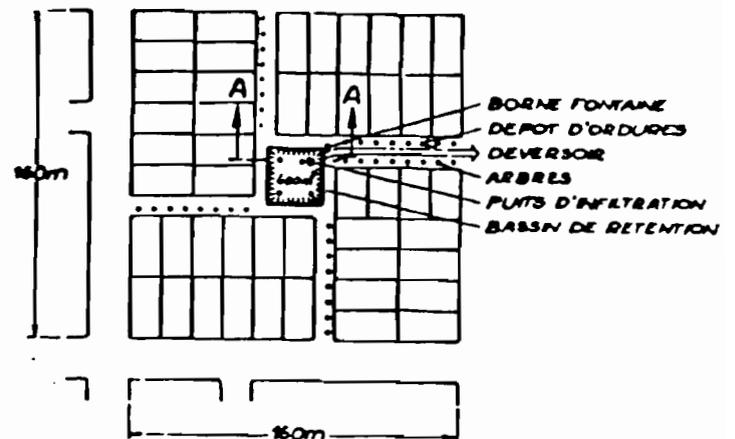
Figure 1 : Exemples d'aménagements alternatifs

Ouvrages basés sur la rétention ou l'infiltration de l'écoulement



Bassins de retenue
ou d'infiltration à
l'échelle de la
parcelle

Bassins de retenue
ou d'infiltration à
l'échelle du quartier



- + toitures terrasses engravillonnées
- + chaussées poreuses ou pavées
- + fossés d'infiltration

Ces aménagements, associés aux systèmes déjà existant, pourraient donc avantageusement résoudre les problèmes actuels de l'assainissement pluvial dans les PVD.

Mais, s'il est évident que la situation économique encourage le développement de ces techniques, la question est de savoir quel peut être leur impact sur le milieu urbain en général, et sur ses aspects sanitaires et socio-culturels en particulier.

Ce volet du programme correspond donc à un souci de considérer l'assainissement urbain dans une optique globale dépassant largement le cadre de l'hydrologie. Les opérations proposées s'articulent autour des 3 points suivants :

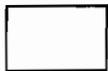
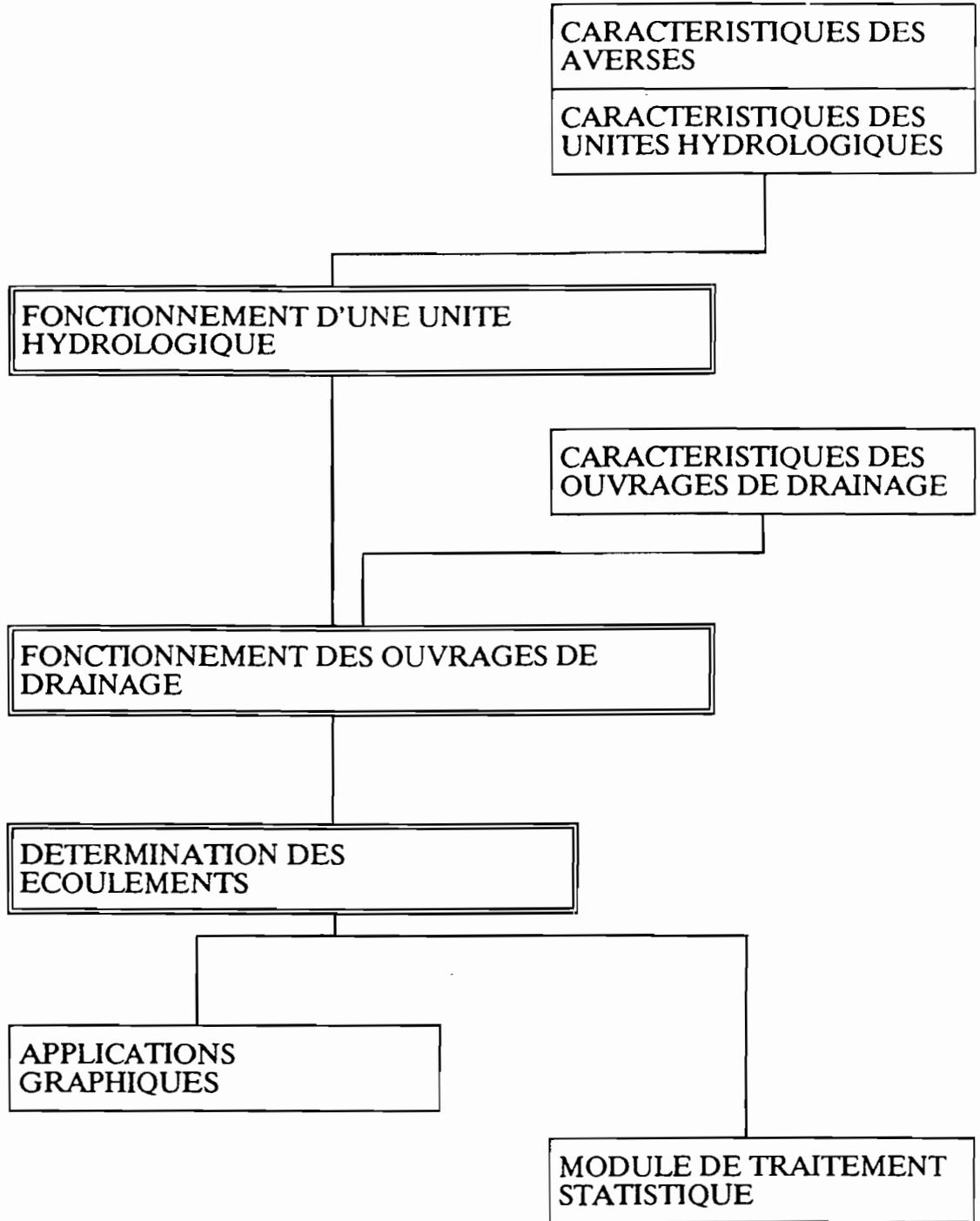
- .b1 une réflexion préliminaire regroupant des spécialistes des diverses disciplines concernées pour analyser l'adéquation des différents types d'ouvrages susceptibles d'être aménagés
- .b2 l'aménagement de micro-bassin(s) destinés à tester le fonctionnement des ouvrages, et à s'assurer que celui-ci est bien adapté aux problèmes posés
- .b3 le suivi du(des) micro-bassin(s) et de l'impact des aménagements dans les domaines sanitaire, socio-culturel et autres. En particulier, au niveau hydrologique, il convient de procéder à des mesures hydro-pluviométriques couplées pour modéliser le fonctionnement du bassin et des aménagements réalisés.

1.3

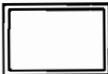
Le troisième volet de ce programme comporte comme objectif de développer les **techniques permettant de simuler le fonctionnement des systèmes d'assainissement**. Ces simulations peuvent avoir pour but de diagnostiquer les performances d'un système existant, ou plus largement, de tester les performances relatives de plusieurs systèmes projetés, dans des configurations urbaines également projetées. L'utilisation des modèles dans cette partie du programme porte donc davantage sur la gestion et la planification des systèmes d'assainissement en particulier, et du développement urbain en général. Les opérations à développer dans ce domaine consistent à :

- .c1 se doter d'un outil opérationnel permettant d'utiliser les modèles de ruissellement urbain de façon simple et répétée. Cet outil se définit comme un progiciel comportant différents modules indépendants et les interfaces correspondants (figure 2) :
 - . acquisition et gestion des données
 - . gestion des paramètres du modèle
 - . fonctionnement hydrologique des unités élémentaires
 - . fonctionnement hydraulique des ouvrages
 - . traitement statistique des écoulements
 - . applications graphiques
- .c2 utiliser cet outil pour répondre ponctuellement à des demandes de diagnostic de systèmes ou pour participer, au sein d'une équipe pluridisciplinaire, à la mise en place de schémas directeurs du développement de l'urbanisation.

Figure 2 : Organigramme simplifié des fonctions d'un progiciel adapté au ruissellement urbain



module de gestion ou de traitement des données



module de mécanismes de fonctionnement

2. Les modalités d'exécution du programme

L'ensemble des travaux présentés dans le paragraphe précédent fait l'objet d'une convention passée entre l'ORSTOM, le LHM et le CIEH.

Compte tenu du volume de ces travaux, il a été décidé de procéder par tranches successives, chaque tranche étant constitué par un volet du programme.

Le calendrier et les modalités d'exécution de chaque tranche sont définis par des avenants à la convention.

Actuellement, deux avenants relatifs aux travaux réalisés dans le cadre du volet n°1 ont été signés.

Une des questions posées par ma prochaine affectation au Mexique consiste à examiner les possibilités existant à l'ORSTOM de poursuivre les travaux relatifs aux volets n°2 et 3.

Vous trouverez dans ce qui suit le détail des modalités d'exécution des travaux en cours ou en projet.

2.1 Volet n°1 : analyse et modélisation du ruissellement

Les travaux réalisés dans ce cadre ont déjà été évoqués dans le paragraphe 1.1.1. Ces travaux ont débuté en 1986 et s'achèveront en septembre 1989 par la remise d'un rapport général sur l'adéquation des modèles de ruissellement superficiel en milieu urbain et leurs limites d'utilisation.

L'ensemble des travaux a été réalisé par mes soins, avec l'assistance permanente de Michel Desbordes, du Laboratoire d'Hydrologie Mathématique de l'USTL. Dix autres personnes de l'ORSTOM ont collaboré ponctuellement à ces travaux, sur le terrain notamment.

Le financement de ces travaux, d'un montant total de 300 kF, a été assuré exclusivement par la convention.

2.2 Volet n°2 : étude des aménagements "alternatifs"

Le caractère pluridisciplinaire de cette étude pose la question de savoir comment l'ORSTOM en général, et le DEC plus particulièrement, doit et peut intervenir dans ce domaine.

Jusqu'à maintenant, les opérations se sont limitées à des contacts préliminaires entre le LHM et les différents départements de l'ORSTOM concernés (DEC, SDU, Santé) pour y étudier les participations potentielles de chacun.

Dans ce but, deux réunions se sont tenues à Montpellier le 2 mai et le 29 juin 1988 : les conclusions de ces réunions montrent la nécessité d'inclure à ce groupe de travail des partenaires disposant d'expérience dans le génie urbain, pour orienter les choix techniques des systèmes de drainage. Plus profondément, une approche rationnelle du

problème passe par le recensement des besoins des acteurs urbains dans les PVD d'une part, et des contraintes limitant le champ des propositions d'autre part. Les conclusions de ces réunions, dont vous trouverez les compte-rendus détaillés dans l'annexe 2, ont été transmises au CIEH.

En réponse à ces conclusions, le CIEH a pris en charge l'organisation d'une réunion devant se dérouler à Montpellier le 8 septembre 1989 entre :

- . le CIEH
- . l'ORSTOM
- . le LHM
- . le BURGEAP
- . le BETURE-SETAME
- . le BCEOM
- . le STU
- . l'Université de Karlsruhe

Cette réunion constitue donc la prochaine échéance, à l'issue de laquelle la poursuite de la participation de l'ORSTOM au programme doit être fixée.

2.3 Volet n°3 : utilisation des modèles en mode opérationnel

Cette partie du programme comprend dans l'immédiat la rédaction d'une version informatisée opérationnelle des modèles de ruissellement, dont l'objectif correspond à l'aide à la décision en matière de drainage des eaux pluviales.

Actuellement, un étudiant sénégalais, Issa N'Doye, prépare un mémoire de DEA consacré à l'utilisation des progiciels disponibles sur le marché (Mouse, Teresa) et leur adéquation aux spécificités des bassins urbains d'Afrique de l'Ouest.

Cette étude préliminaire pourrait déboucher sur des développements, associant l'ORSTOM aux dépositaires de ces progiciels, et permettant aux services techniques concernés de disposer d'un outil adapté à la gestion et la planification du drainage des eaux pluviales dans les villes des PVD.

3. Perspectives concernant les axes de recherche et les opérations à développer dans le cadre de la modélisation hydrologique

De façon générale, le développement des modèles de ruissellement répond à la volonté d'améliorer l'aptitude de ces modèles à reconstituer avec précision les écoulements.

Pour un milieu caractérisé par une certaine stabilité, il suffit donc de se donner une fonction d'objectif, et d'analyser l'influence de la précision du modèle sur cette fonction pour se prononcer sur l'intérêt des développements à donner au modèle.

Pour un milieu au contraire très évolutif dans le temps et dans l'espace, cette analyse reste très insuffisante car le modèle doit pouvoir être utilisé en dehors du domaine pour lequel il a été mis au point. Les performances du modèle restent bien sûr une préoccupation importante, mais c'est l'interprétation physique des concepts du modèle qui garantit son extrapolation en dehors du domaine testé.

Le milieu urbain connaît des transformations importantes à des échelles de temps très petites. Les modèles proposés jusqu'à maintenant correspondent, à des degrés divers, à des "boîtes noires" et n'ont pas permis de déterminer la nature des mécanismes d'écoulement en milieu urbain. Les développements des travaux concernant la modélisation doivent donc se poursuivre dans ce domaine, et les paragraphes suivants indiquent les différents thèmes s'y rapportant.

3.1 Mécanismes de production et de transfert de l'écoulement

Une partie importante des travaux réalisés a été consacrée d'une part à la collecte et la mise en forme des données nécessaires à la modélisation, et d'autre part à la détermination d'une méthodologie robuste de validation des concepts utilisés dans les modèles de ruissellement.

A partir de ces acquis, plusieurs concepts ont été testés et l'étude réalisée a permis de comparer leurs performances relatives, et de donner un mode d'emploi des modèles correspondants.

Concernant les mécanismes de production et de transfert des écoulements, il reste cependant un domaine important à explorer, représenté par :

le test de nouveaux concepts du fonctionnement hydrologique des bassins :

- * influence de la traîne de l'averse
- * introduction d'un coefficient de retardement du stockage
- * introduction d'une fonction de stockage sur les surfaces imperméables
- * différenciation des fonctions de stockage sur les surfaces naturelles recevant ou ne recevant pas d'eau en provenance des surfaces imperméables
- * variation du coefficient de transfert d'un événement à l'autre
- * conceptualisation du transfert par un modèle à N réservoirs linéaires

l'utilisation de différents protocoles de calage des modèles :

- * calage simultané du transfert et de la production
- * utilisation de la DPFT

Tous ces développements peuvent maintenant être réalisés en mode "opérationnel", en s'appuyant sur :

- . des données mises en forme
- . une chaîne de programmes complète
- . une méthodologie de validation clairement définie

Ce type d'étude correspondrait donc à des actions ponctuelles, de durées inférieures à 6 mois, susceptibles d'entrer dans plusieurs cadres différents :

- . contrats extérieurs
- . formation (mémoires d'ingénieurs, de DEA)
- . programme ULM

3.2 Développements portant sur la spatialisation des modèles

Une des sources d'imprécision des modèles est probablement constituée par la conceptualisation globale des mécanismes d'écoulement, intégrant leurs discontinuités physiques de façon plus ou moins large.

La spatialisation des modèles soulève la question de savoir à quelles échelles d'espace et de temps il faut travailler.

Ces échelles sont là encore influencées par le milieu et l'objectif étudiés : dans le cadre de ce programme, ceux-ci sont représentés par l'étude des mécanismes physiques de l'écoulement sur un bassin de l'ordre d'une centaine d'hectares, drainé par un réseau de collecteurs linéaires.

Ces conditions fixent dans l'immédiat la nature des travaux à développer, portant sur la détermination de sous-systèmes (au sens de la variabilité des précipitations ou de l'occupation des sols par exemple) permettant une meilleure reconstitution des hydrogrammes de crue.

Ultérieurement, et selon les recommandations techniques qui seront proposées lors de la réunion organisée par le CIEH à Montpellier en septembre 1989, il conviendra de développer le même thème à des échelles de temps et d'espace correspondant aux ouvrages techniques proposés.

3.3 Développements des capteurs métrologiques

Un autre facteur d'imprécision des modèles est constitué par les incertitudes métrologiques affectant les variables étudiées.

Le développement des capteurs métrologiques doit donc porter en premier lieu sur l'amélioration de leur précision.

En plus de cet aspect, le développement de la micro-informatique autorise actuellement l'emploi de modèles plus complexes que par le passé, pour lesquels l'acquisition et la gestion des données deviennent rapidement problématique. Pour cette raison, il est indispensable de disposer de capteurs permettant d'automatiser ces opérations.

Dans le cadre de ce programme, ce double souci correspond aux thèmes suivants :

- . adaptation des capteurs hydro-pluviométriques aux mesures réalisées sur petits bassins urbains
- . analyse de la variabilité spatiale des précipitations par des mesures radar (en liaison avec d'autres programmes à l'ORSTOM)
- . détermination des états de surface et de leur coefficients respectifs d'occupation des sols par télédétection (en liaison avec d'autres programmes à l'ORSTOM)

DOCUMENT N°2 :

Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération (ORSTOM)

Laboratoire d'Hydrologie - Centre ORSTOM de Montpellier

Compte rendu de mission au Mexique (5 au 21 janvier 1989)

Christophe Bouvier
Unité de Recherche 2E

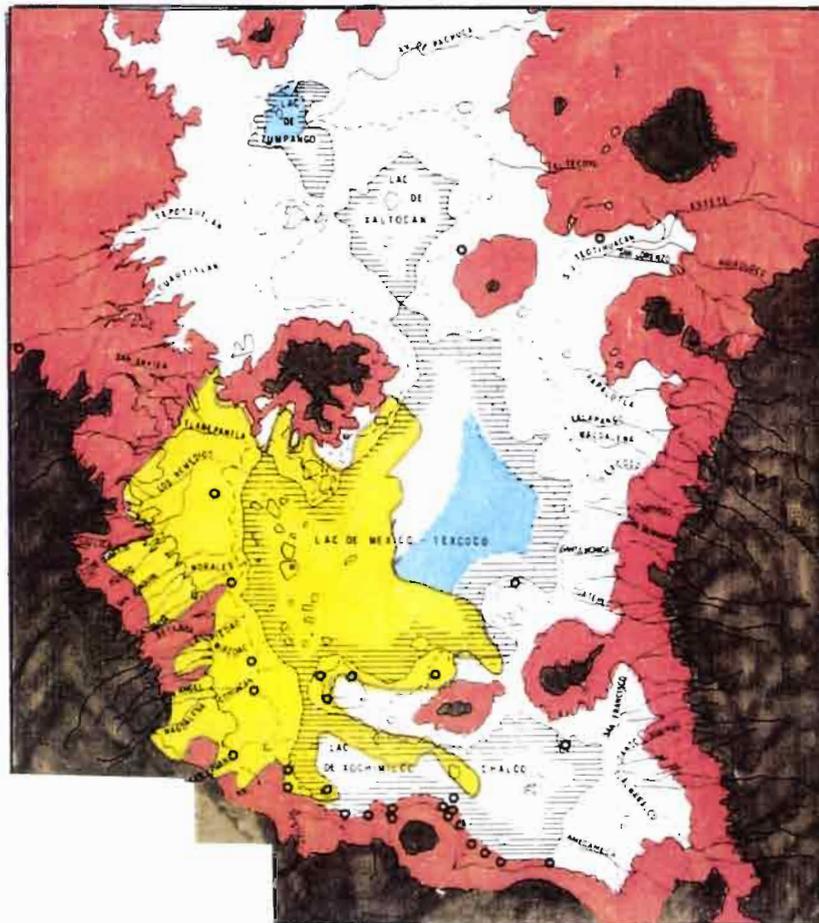
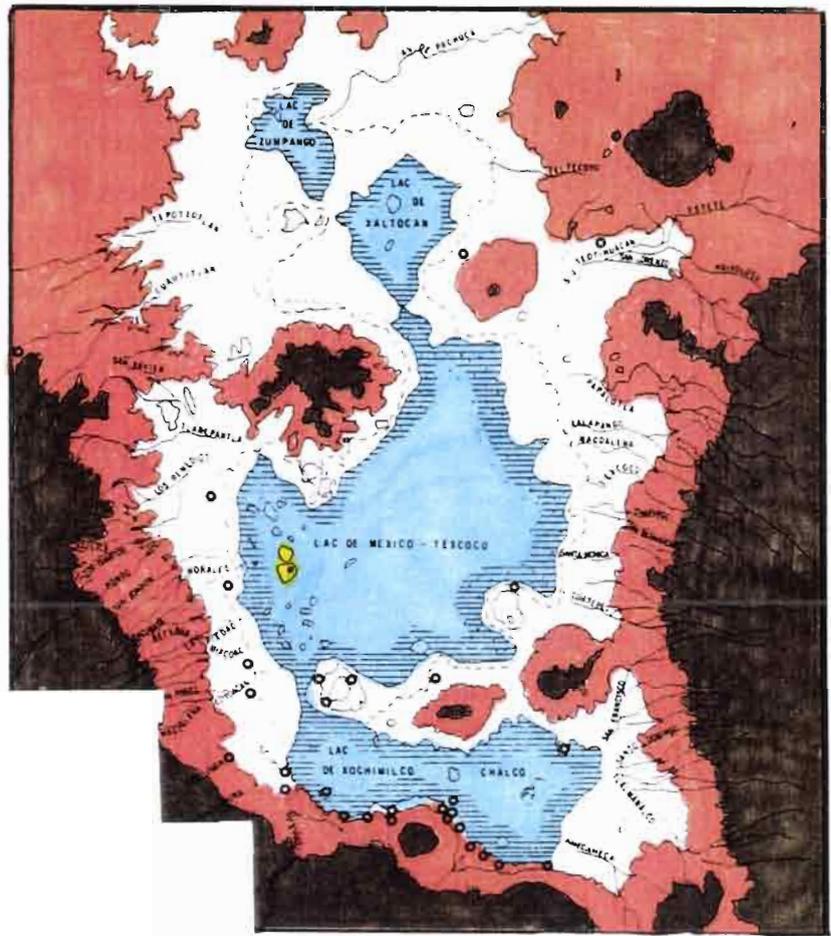
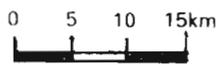
INTRODUCTION

L'objectif de cette mission consistait à prendre les contacts nécessaires pour structurer la participation du Département Eaux Continentales à un programme d'étude consacré aux problèmes dus à l'extension urbaine de l'agglomération de Mexico. Une étude prospective a donc été réalisée dans le cadre de cette mission et a été axée sur les 4 principaux points suivants :

- 1) Le recensement des problèmes posés par l'extension urbaine de l'agglomération de Mexico, et plus particulièrement le recensement des problèmes liés à l'eau dans la ville.
- 2) Le recensement des diverses instances de gestion et de traitement des problèmes urbains liés à l'Eau, et l'analyse des perspectives de collaboration entre ces instances et l'ORSTOM.
- 3) La nature, les caractéristiques et les développements du programme d'étude de la Croissance Urbaine de la Vallée de Chalco, programme pluridisciplinaire déposé par l'ORSTOM auprès de la Communauté Economique Européenne.
- 4) La proposition d'un programme d'activités hydrologiques impliquant le Département Eaux Continentales dans le cadre du programme évoqué précédemment.

Ces différents points sont repris et détaillés dans ce qui suit.

EXTENSION DE L'AGGLOMERATION DE MEXICO DE 1519 A 1985



LEGENDE

-  LACS
-  ZONE URBAINE
-  ZONE DE PLAINE (entre 2200 et 2300)
-  ZONE DE PIEMONT (entre 2300 et 2500)
-  ZONE DE MONTAGE (au dessus de 2500)

1. LA VILLE DE MEXICO : APERCU HISTORIQUE DES PROBLEMES URBAINS

Le recul historique et l'évolution des éléments de géographie physique et humaine depuis l'époque de la conquête espagnole sont indispensables à la bonne compréhension des problèmes urbains de Mexico.

1.1 La ville de Mexico en 1519

Lorsque Cortes et ses soldats franchissent le col séparant le Popocatepelt et le Ixtaccihuatl, ils découvrent le paysage de la Vallée de Mexico. A cette époque, la ville de Mexico s'appelle Tenochtitlan et se réduit à une île, entourée d'un système de lacs au nombre de cinq (voir carte). L'île est reliée au continent par cinq chaussées et le système formé par l'île et les lacs environnants forment une vaste cuvette totalement endoréique, de niveau moyen 2 240 m, entourée d'abord par une zone de piémont, puis par une zone de hautes montagnes dont le sommet (Popocatepelt) culmine à 5 465 m.

L'étendue de cette cuvette représentait et représente toujours approximativement 550 km². Sur cette superficie, l'écart topographique extrême a été estimé à environ 7 mètres. Les lacs sont cependant plus ou moins indépendants entre eux, sauf dans les périodes de précipitations intenses où les lacs les plus élevés se déversent dans le lac majeur de Texcoco (voir carte). A titre indicatif, le tableau suivant résume les principales caractéristiques des lacs :

	Superficie en km ²	Profondeur moyenne en m	Altitude du seuil /lac de Texcoco en m
Lac de Chalco	114	2,0	3,0
Lac de Xochimilco	63	2,1	3,1
Lac de Texcoco	238	1,8	0,0
Lac de Xaltocan	121	0,4	3,5
Lac de Zumpango	26	0,6	6,1

A cette époque, les problèmes urbains de Mexico sont essentiellement liés à l'eau et sont représentés par :

- l'approvisionnement en eau potable,
- la protection de l'île contre les inondations,
- la séparation des eaux salées/eaux douces pour la valorisation agricole.

L'approvisionnement en eau potable est fourni de façon assez simple par le captage des eaux de sources environnantes drainées par écoulement gravitaire dans un canal à ciel ouvert empruntant l'une des chaussées jusqu'à l'île. D'autres ouvrages de ce type viendront renforcer le dispositif d'adduction d'eau potable avec plus ou moins de succès jusqu'au 19^e siècle.

La protection de l'île contre les inondations et la séparation entre les eaux salées de Xaltocan et de Texcoco et les eaux douces des autres lacs sont assurées par un système de digues et d'écluses permettant notamment de réguler le niveau des eaux autour de l'île.

En 1519, les trois problèmes urbains majeurs de Mexico-Tenochtitlan semblent apparemment bien maîtrisés, malgré une densité démographique déjà élevée, puisque la population totale dans la vallée de Mexico a été estimée à 1 500 000 habitants (?).

1.2 La conquête espagnole et l'évolution du paysage urbain

En deux ans, de 1519 à 1521, les espagnols menés par Cortes anéantissent l'empire aztèque, et établissent la capitale de la Nouvelle-Espagne, Mexico, sur les ruines de l'ancienne Tenochtitlan. Les problèmes urbains demeurèrent les mêmes qu'avant, mais les inondations de la ville se multiplient. Il est possible que les espagnols n'aient pas eu la maîtrise des aménagements hydrauliques des aztèques, mais il est aussi possible que les inondations aient été fréquentes de tout temps.

Quoiqu'il en soit, la ville est inondée par 2 fois en 1555 et 1556, et de façon plus ou moins permanente de 1629 à 1635.

Deux orientations sont alors envisagées par les espagnols :

- renforcer les digues,
- ou assécher les lacs.

Pour des raisons multiples dont les raisons politiques ne sont pas les moindres, ils choisirent la deuxième orientation.

C'EST DONC ESSENTIELLEMENT POUR SE PROTEGER DES INONDATIONS QUE LES LACS FURENT PROGRESSIVEMENT ASSECHES.

La vidange des lacs est réalisée par le percement d'ouvrages de drainage à travers la sierra du Nord de la Vallée.

4 tranches de travaux sont successivement réalisées du 17^{ème} au 20^{ème} siècle.

De nos jours, les lacs sont pratiquement asséchés et la cuvette de Mexico possède quatre exutoires artificiels la protégeant contre les inondations.

1.3 Les problèmes actuels de la ville de Mexico concernant l'environnement

De 1930 à 1985, la population de l'agglomération de Mexico est passée de 1 à 18 millions d'habitants. Cet accroissement démographique est évidemment à l'origine des problèmes actuels de Mexico en matière d'environnement:

- La pollution atmosphérique, réputée provenant à 80 % du trafic automobile (parc évalué à 3 millions de voitures) est d'autant plus importante que le site encaissé de la vallée limite la circulation de l'air. Il se produit un phénomène d'inversion de température qui maintient le nuage pollué sur la ville le matin, particulièrement lors des mois froids, avant que les couches inférieures de l'air ne s'élèvent au cours de l'après-midi.
- L'approvisionnement en eau potable est actuellement fourni soit par pompage dans la nappe de la vallée, soit par adduction provenant de bassins voisins.

Le pompage de la nappe provoque une diminution progressive du niveau et entraîne une instabilité du sol atteignant par endroit des proportions inquiétantes. La qualité de l'eau pompée est en outre de plus en plus mauvaise. La politique actuelle d'approvisionnement en eau potable consiste à réduire le pompage dans la nappe pour retrouver un équilibre, et à développer les réseaux d'adduction d'eaux lointaines.

Cette orientation n'est pas sans provoquer d'autres problèmes liés à l'épuisement de la ressource en eau des villes et des régions situées jusqu'à 200 km à l'ouest de MEXICO, en faveur de la capitale.

- Le rejet et le traitement des eaux usées nécessitent, compte tenu de l'importance du volume rejeté et de la topographie locale, des moyens importants qui tardent à être mis en oeuvre. Les problèmes actuels générés par le manque de traitement de l'eau sont :

- la contamination de la nappe phréatique de la Vallée de Mexico,
- la contamination des produits de l'agriculture de la Vallée de Mexico, irrigués par les eaux usées (eaux noires).

Le traitement des eaux usées et leur réutilisation pour l'agriculture ou pour une réinjection dans la nappe est une des orientations actuelles prioritaires.

- Les inondations consécutives aux grosses pluies tropicales sont fréquentes, malgré un système de drainage et de retenues (bassins ou retenues collinaires) assez développé.

Ces inondations sont principalement dues au fait que l'urbanisation s'est considérablement développée dans les zones correspondant aux anciens lacs (voir carte). Un facteur aggravant est d'autre part constitué par les mouvements du sous-sol qui entraînent parfois une inversion des sens de drainage des collecteurs.

2. PRESENTATION DES INSTANCES RESPONSABLES DU TRAITEMENT DES PROBLEMES HYDROLOGIQUES ET HYDRAULIQUES DE LA VALLEE DE MEXICO

Une dizaine de programmes ORSTOM sont actuellement réalisés au Mexique. Pour chacun de ces programmes, les chercheurs ORSTOM sont accueillis par une structure mexicaine, structure généralement académique. Chaque programme est ainsi réalisé conjointement par des chercheurs français et des chercheurs ou ingénieurs mexicains, auxquels peuvent s'ajouter des étudiants mexicains en thèses de 3^e cycle, et des techniciens formés dans le cadre du programme.

Le choix de la structure d'accueil doit donc faire l'objet d'une attention particulière et c'est dans ce but que j'ai visité la plupart des instances responsables du traitement des problèmes hydrologiques et hydrauliques de la Vallée de Mexico.

Il s'agit notamment :

- des instances gouvernementales ou fédérales (Ministères de l'Agriculture, de l'Équipement, Commission des Eaux de la Vallée de Mexico),
- des instances académiques (Universités, Instituts divers),

En plus de ces instances, je mentionnerai les instances de coopération franco-mexicaine, qui dépendent pour la plupart de l'Ambassade de France et ont pour vocation de développer les contacts entre la France et le Mexique soit au niveau de la recherche, soit au niveau du commerce et de l'industrie.

2.1. Les instances gouvernementales ou fédérales

Les principaux ministères concernés par le traitement de l'Eau dans les villes sont, à l'échelle nationale :

- le Secretaria de Agricultura y Recursos Hidraulicos SARH,
- le Secretaria de Desarrollo Urbano y Ecologia , SEDUE.

Parallèlement à ces Ministères a été créée, spécialement pour le district fédéral représentant l'essentiel de l'agglomération de Mexico, une Commission chargée de s'occuper des problèmes de l'Eau dans la Vallée de Mexico. Cette commission s'appelle la Comision de Aguas del Vallée de Mexico.

Ces instances constituent les principaux circuits de décision et de planification des aménagements ayant trait aux problèmes de l'Eau en milieu urbain ou naturel.

- Le SARH s'occupe plus particulièrement de la collecte et de la gestion des données climatologiques et hydrologiques de l'ensemble du pays, et publie entre autres les annuaires de données du réseau national.

D'après M. Humberto Luna, mon interlocuteur au SARH, la réalisation des annuaires est confiée à une société privée par contrat de sous-traitance.

- la SEDUE s'occupe davantage des problèmes d'aménagements du territoire représentés par exemple par la réalisation de systèmes d'adduction d'eau par pompage ou par capture et élévation de l'eau provenant de bassins voisins. La Direccion General de Construccion y Operation Hydraulica (DGCOH) qui dépend de la SEDUE, a notamment sollicité le BURGEAP et le Professeur Ledoux de l'Ecole des Mines de Fontainebleau pour une étude de la nappe phréatique et la recharge artificielle de l'aquifère.

- La Comision de Aguas del Valle de Mexico est une instance créée en 1950 pour faire face aux problèmes de l'Eau dans la Vallée de Mexico. Cette Commission est responsable de la collecte et de la gestion des données climatologiques, hydrométriques et topographiques de l'ensemble du bassin de Mexico. Les données de la Vallée de Mexico sont par exemple éditées par la Comision de Aguas del Valle de Mexico sous forme d'annuaires depuis 1972 (qui rajoutent une première série de 24 annuaires). L'annuaire de 1980, qui nous a été remis à la Comision, contient ainsi les débits moyens journaliers de 59 stations hydrométriques, les charges solides journalières de 22 d'entre elles, les résultats des mesures effectuées dans une centaine de station climatologiques, dont 39 d'entre elles sont équipées de pluviographes à augets basculeurs, de marque "Rossbach". Cette commission supervise également tous les problèmes d'aménagements hydrauliques ou agricoles de la vallée. En janvier 1989, cette instance a été rebaptisée Gerancia de Aguas del Valle de Mexico.

La Comision pourrait être intéressée, tout comme le SARH à une échelle nationale, par l'expérience de l'ORSTOM en tant que service gestionnaire des données hydrologiques et par le développement de modèles destinés à la planification des ressources en eau.

2.2. Les instances académiques

Par rapport aux instances gouvernementales qui exercent le pouvoir de décision, les instances académiques se consacrent davantage à la recherche (développement de modèles hydrologiques et hydrauliques) et sont plus ou moins sollicitées par les instances gouvernementales. Les instances académiques que j'ai visitées sont au nombre de 4 et représentent l'essentiel de ce qui existe au Mexique en matière d'Hydrologie et d'Hydraulique.

- La Universidad Nacional Autonoma de Mexico (UNAM) est la plus grande université de Mexico et compte environ 300.000 étudiants. Au sein de l'UNAM a été créé en 1956 le Instituto de Ingenieria dont la vocation est de développer les techniques et les recherches en ingénierie. L'Instituto de Ingenieria comprend 4 départements axés respectivement sur les énergies, l'hydraulique et l'environnement, la dynamique des sols et la sismologie.

Les personnes que j'ai rencontrées à l'Instituto de Ingenieria ont une bonne connaissance théorique des modèles d'écoulements de surface en milieu urbain, d'approvisionnement en eau potable, d'étude de la nappe et de ses effets sur la topographie et la stabilité du sol. Les préoccupations des gens de l'Instituto sont donc assez proches des nôtres et ils ont paru très intéressés par notre expérience acquise dans le cadre du programme d'étude du ruissellement urbain en Afrique de l'Ouest. Sur le plan pratique cependant, les ingénieurs de l'Instituto semblent limités par la lourdeur de leurs systèmes d'exploitation des données, tant au niveau de la saisie et de la gestion des données qu'au niveau du manque de convivialité de leurs modèles et programmes. L'expérience de l'ORSTOM, acquise à la fois dans les systèmes de gestion des données hydropluviométriques (capteurs, logiciels) ainsi que dans la maîtrise des problèmes de modélisation du ruissellement de surface sur des bassins dont l'urbanisation se rapproche souvent de celles des bassins africains, pourrait constituer la base d'une collaboration entre l'ORSTOM et l'Instituto.

Sur le plan des effectifs, le département d'Hydraulique de l'Instituto comprend 10 chercheurs et ingénieurs (dont 3 en Hydrologie) et une vingtaine d'étudiants encadrés.

Enfin, il faut souligner l'étroitesse des contacts professionnels entre l'Instituto et les instances ministérielles ou fédérales, laissant espérer des applications concrètes et la valorisation des résultats obtenus.

- La Universidad Nacional Autónoma de Xochimilco (UAM X) est l'une des trois universités créées il y a une quinzaine d'années pour disséminer les structures universitaires. Les 3 universités autonomes créées comptent chacune environ 30 000 étudiants.

Il n'existe pas de département d'Hydrologie ou d'Hydraulique à la UAM X. Mon interlocuteur, l'Ingénieur Miramontes, est responsable d'un laboratoire d'études des sols salés, dont les activités sont centrées sur :

- la salinité des sols et son impact sur l'agriculture,
- la composition des différentes couches superficielles et son impact sur la construction.

Ces études rentrent difficilement dans le cadre de nos activités, mais il convient de noter que M. Miramontes dispose de documents ou d'études pédologiques et topographiques effectuées sur la région de Chalco.

L'effectif du laboratoire comprend 3 ingénieurs et 5 collaborateurs.

- La Universidad Autónoma Nacional de Iztapalapa (UAM I) accueille actuellement 3 chercheurs ORSTOM : Richard Auria et Sebastianos Roussos en biotechnologie, et Jean-Pierre Guyot qui développe un programme concernant le traitement anaérobie des eaux usées. J'ai pu rencontrer à la UAM I le Dr Henrik Niedzielski qui s'occupe principalement d'hydrogéologie. En plus de M. Niedzielski, la UAM compte dans ses effectifs un géologue, et un hydrologue travaillant sur un 1/2 poste, appartenant par ailleurs à la Comision de Aguas del Valle de Mexico .

- L'Institut de Chapingo est un établissement académique à vocation pédagogique qui mène des recherches dans de nombreuses disciplines, dont l'hydrologie et la pédologie. L'institut accueille déjà un pédologue de l'ORSTOM, C. Zebrovski, qui développe actuellement un programme d'étude des sols du piémont de la région de Texcoco, en vue de leur revalorisation forestière ou agricole . Le Dr Oscar L. Palacios, que j'ai rencontré, a été mon interlocuteur et témoigne de bonnes connaissances des problèmes d'hydrologie. Il est en contact avec des chercheurs de Grenoble comme C. Obled, G. Vachaud et Vauclin et a lui-même étudié à Grenoble. Ces activités actuelles sont centrées sur :

- le développement d'un logiciel interactif de modèles numériques de terrain destiné à la réalisation des réseaux d'irrigation,
- l'analyse théorique de génération de pluies horaires à partir de pluies journalières,
- l'analyse théorique du transfert de l'écoulement dans les ouvrages hydrauliques.

2.3. Les instances de coopération Franco-Mexicaine

- La mission ORSTOM de Mexico m'a naturellement accueilli dans le cadre de cette mission et je remercie tout particulièrement MM. Portais, Guyot, Auria, Zebrowski, Roussos de m'avoir facilité considérablement les contacts avec les personnalités mexicaines que j'ai pu rencontrer à Mexico. Mes remerciements vont aussi à Daniel Hiernaux et à Bernard Lacombe, respectivement chef de projet mexicain et chef de projet français du programme d'étude du développement urbain de la vallée de Chalco.

L'ORSTOM comprend au Mexique une vingtaine de chercheurs et techniciens dispersés dans 5 villes différentes (5 personnes à Mexico), et certains des programmes développés actuellement peuvent être reliés aux problèmes posés par l'Eau dans la ville :

- traitement anaérobie des eaux usées (J.P. Guyot),
- revalorisation et exploitation forestière ou agricole des sites des piémont de la vallée de Mexico (C. Zebrowski),
- contribution de la télédétection aux suivis de la démographie et de l'exploitation des sols (L. Cambresis).

- L'historique des problèmes de l'Eau dans la vallée de Mexico du 16^e au 19^e siècle m'a été présenté par Alain Musset, chercheur VSN du Centre d'Etudes Mexicaines et Centraméricaines (CEMCA). Le CEMCA est un centre de recherches dont les activités sont orientées en particulier vers l'anthropologie et la géographie. Le CEMCA dépend de l'Ambassade de France.

- Accompagné de B. Lacombe et M. Portais, nous avons présenté le programme d'étude du développement urbain de la vallée de Chalco au Centre Scientifique et Technique (CST) de l'Ambassade de France.

M. Girny, attaché de coopération, et M. Legay, attaché commercial, nous ont brossé un tableau des collaborations franco-mexicaines dans les domaines de la recherche, du commerce et de l'industrie touchant les problèmes de l'environnement.

SPIE-BATIGNOLLES, DEGREMONT et la SAFEGE sont impliqués dans un projet de traitement des eaux usées, ainsi que la SOGREAH par ailleurs. Le problème de la recharge de la nappe a donné lieu à un avant projet du BURGEAP, ainsi qu'à une étude de modélisation du fonctionnement de la nappe supervisée par le Pr Ledoux, de l'Ecole des Mines de Fontainebleau. M. Ledoux a effectué une mission à Mexico et un étudiant mexicain prépare actuellement à Fontainebleau une thèse sur ce sujet.

Il existe d'autre part un programme d'étude de la pollution atmosphérique dans la vallée de Mexico, bénéficiant d'un financement de l'état français et dirigé par le Pr J.C. Dechaux de l'Université de Lille - Flandre - Artois.

A la question posée de savoir si un réseau de démonstration de capteurs métrologiques mis au point par l'ORSTOM et ELSYDE pourrait être pris financièrement en charge par l'état français, M. Legay répond affirmativement à concurrence de 300 Kf.

M. Faroux, directeur du CST, nous signale que le centre organise des expositions présentant les techniques et méthodologies développées en France.

Ces expositions sont au nombre de 6 ou 7 par an et M. Faroux est intéressé par une proposition d'exposition des systèmes de collecte, de gestion et de traitement des données hydrologiques mis au point par l'ORSTOM.

<p>Instances Ministérielles</p>			
<p>Secretaria de Agricultura y Recurso Hydrolico SARH</p>		<p>Secretaria de Desarrollo Urbano y Ecologia SEDUE</p>	
<p>regroupées pour traiter les problèmes de l'Eau au niveau du district fédéral dans la</p>			
<p>Comicion de Aguas del Valle de Mexico</p>			
<p>Dr Humberto Luna Directeur de projet Ing. Horacio Arcea</p>			
<p>Instances Académiques</p>			
UAM X	UAM I	UNAM	
Universidad Autonoma Metropolitana Xochimilco	Universidad Autonoma Metropolitana Iztapalapa	Universidad Nacional Autonoma Mexico	Instituto Politecnico Chapingo
Ing. Miramontès	DR. Niedzielski	.	Dr. Palacios
		Instituto de Ingenieria	
		Dr. Dominguez Dr. Fuentès	
<p>Instances de Coopération Franco-Mexicaines</p>			
CST	CEMCA	ORSTOM	
Centre Scientifique et Technique	Centre d'Etudes Mexicaines et CentrAméricaines	Institut de Recherche Scientifique pour le Développement en Coop.	
M. Faroux M. Girny M. Legay	M. Musset	Dr Portais	

3. PRESENTATION DU PROGRAMME D'ETUDE DU DEVELOPPEMENT URBAIN DE LA VALLEE DE CHALCO

3.1 cadre et objectifs du programme

La vallée de Chalco est située dans le Sud-Est de l'agglomération de Mexico. Cette région connaît actuellement un développement urbain très important, caractérisé par une augmentation de la population d'environ 400.000 habitants en 10 ans. En 1989, le paysage urbain de la vallée de Chalco est constitué par la ville historique de Chalco, comptant environ 50.000 habitants et dont la croissance est relativement stable, et par la ville nouvelle apparue il y a une dizaine d'années, comptant maintenant environ 400.000 habitants.

La ville nouvelle s'est installée de façon non contrôlée sur le fond de l'ancien lac de Chalco et occupe près de la moitié de la vallée. L'urbanisation qu'on y rencontre est constituée de petites maisons construites en dur et installées sur des concessions achetées aux agriculteurs qui exploitaient les terres de la vallée. Ces concessions sont généralement non clôturées. Les équipements urbains officiels de cette zone sont quasiment inexistant :

- on ne trouve aucune voirie goudronnée
- les habitants sont cependant alimentés en électricité par des branchements sauvages, qui donnent lieu à de gigantesques enchevêtrements de fils, chaque ligne étant identifiée par des objets divers : des chiffons rouges disposés sur toute la longueur marquent par exemple la ligne de M. Sanchez etc..
- l'approvisionnement en eau est fourni par quelques rares forages. Le développement de ces forages est envisagé par la Municipalité de Chalco. L'essentiel de l'approvisionnement reste cependant fourni par des camion-citernes, à un prix exorbitant.
- le drainage des eaux usées et pluviales se limite à quelques collecteurs primaires constitués par des fossés à ciel ouvert. L'extrême platitude de la zone rend en outre très difficile le drainage, et laisse penser que les inondations sont fréquentes en saison des pluies. Dans une zone voisine semi-urbaine, il subsiste encore de nombreuses étendues d'eau lors de notre visite intervenant plus de 3 mois après la fin de la saison des pluies : l'une des routes d'accès à Chalco s'interrompt d'ailleurs brutalement dans l'une de ces étendues.

L'objectif du programme peut être rapidement résumé en disant que l'on souhaite déterminer, dans la perspective de la prochaine décennie par exemple, l'évolution du paysage urbain de la vallée de Chalco et ses conséquences sur l'environnement et sur la planification des équipements, notamment en ce qui concerne les équipements liés aux problèmes de l'Eau dans la Ville.

Dans cette étude, les Sciences Humaines sont appelées à jouer le rôle moteur, dans la mesure où leur incombe la responsabilité d'établir une modélisation prévisionnelle de la dynamique de l'extension urbaine dans la vallée de Chalco. Sachant bien qu'il ne saurait y avoir d'avenir certain, surtout lorsque les éléments humains sont à prendre en compte, il s'agit d'essayer de définir différents scénarios possibles, affectés chacun d'une certaine probabilité.

Plus à l'aval, les Sciences de l'Environnement doivent examiner, pour chacun des scénarios définis précédemment, l'évolution des ressources et des éléments naturels. Cet examen demande naturellement de disposer d'outils adéquats, pouvant fonctionner en dehors du champ dans lequel ils ont été mis au point. Cette problématique rejoint les

objectifs visés par les Sciences Humaines dans ce programme, à savoir la modélisation prévisionnelle, et il serait intéressant de voir si les techniques de modélisation utilisées en Hydrologie peuvent être transposées dans le cadre plus général de la dynamique de l'urbanisation.

En fait, cette disposition des différentes disciplines de l'amont vers l'aval n'est pas si simple et les aspects Humain et Environnement doivent être pris en compte simultanément pour analyser la dynamique de l'urbanisation. Cependant, on peut considérer que l'élément humain est souvent largement prépondérant sur l'Environnement, et que, en conséquence il est souhaitable que les études portant sur le milieu socio-économique précèdent celles portant sur le milieu physique, pour initialiser la recherche du moins.

La vallée de Chalco représente dans ce programme un site expérimental à partir duquel les résultats obtenus pourront être étendus à la vallée de Mexico dans son intégralité, voire à d'autres régions du monde présentant des caractéristiques analogues.

3.2 moyens humains

Le programme d'étude du développement urbain de la vallée de Chalco fait appel à des collaborations pluridisciplinaires et internationales qui sont actuellement en cours de structuration.

Actuellement, seul le Comité Directeur du programme est mis en place. Il comprend les personnes suivantes :

- Arq. Roberto Eibenschutz, Rector de UAM-X
- Dr. Michel Portais, Représentant de l'ORSTOM à Mexico
- Représentant de la Communauté Economique Européenne à Mexico
- Arq. Concepcion Vargas Sanchez, Directeur du CyAD
- Dra. Sonia Comboni, Directeur CSH
- Dr. Fernando Mora, Directeur de CBS
- Dr. Bernard Lacombe, Directeur de projet pour l'ORSTOM
- Dr. Daniel Hiernaux, Directeur de projet pour la UAM-X

Les organismes autres que français et mexicains actuellement sollicités sont :

- l'Institut d'Urbanisme de Milan (Italie), disposant de spécialistes dans le domaine de la télédétection, de l'écologie urbaine et de l'architecture environnementaliste.
- l'Institut de Planification Urbaine d'Edimburgh (Grande-Bretagne), bénéficiant d'une expérience acquise en Afrique Anglophone dans le domaine de l'économie informelle

L'organisme mexicain co-directeur du programme est la UAM-X, à laquelle l'ORSTOM est liée par une convention de coopération.

L'absence de spécialistes en Hydrologie et en Hydraulique au sein de la UAM-X devrait conduire à s'associer également avec certains chercheurs de l'Instituto de Ingenieria de L'UNAM.

B. Lacombe a évoqué la possibilité d'établir des contacts ou de procéder à des échanges d'étudiants avec l'École de Chimie de Toulouse dans le laboratoire du Pr Bonnet, en ce qui concerne les problèmes liés à la pollution atmosphérique.

L'ORSTOM devrait intervenir à plusieurs niveaux dans ce programme :

- participation du département SDU : B. Lacombe (plein temps) et M. Portais (temps partiel), plus un allocataire de recherches travaillant sur la télédétection, Eberhart (temps plein).
- participation du département DEC : C. Bouvier (plein temps)

Toute cette organisation devrait être mise en place au mois de Mars, pour pouvoir entamer les travaux concernant la démographie et l'urbanisme au mois de Juin.

La part importante que devrait représenter la télédétection d'une part, la mise au point de modèles de planification d'autre part, conduit à rechercher dès maintenant les participations d'un thématique de la télédétection et d'un ou plusieurs informaticiens, apparemment non identifiés jusqu'à maintenant.

3.3 moyens financiers

Le programme bénéficie d'un financement de la Communauté Economique Européenne de 200.000 écus pour 2 ans. Ce financement devrait être obtenu ces jours-ci. L'ORSTOM a la charge de gérer ces crédits, dont 80.000 écus sont réservés à verser des compléments de salaires aux participants mexicains.

Les Italiens espèrent de leur côté obtenir un financement supplémentaire de la part de la CEE, d'un montant de 300.000 écus, incluant leurs propres traitements.

3.4 calendrier des opérations

La première opération devant intervenir consiste naturellement à définir clairement les objectifs du programme et à s'attacher les collaborations nécessaires à sa réalisation.

Cette définition des objectifs et des collaborations nécessaires est prévue pour le mois de Mars 1989. On trouvera plus loin dans le chapitre 4 des propositions concernant la participation du DEC à ce programme.

Les deux années du programme seront consacrées à la mise en place des matériels et méthodes nécessaires à :

- l'identification des variables devant être étudiées (Juin 1989)
- la collecte des données correspondantes permettant d'acquérir la connaissance nécessaire du milieu représenté par la vallée de Chalco (1989 et 1990)
- le traitement et l'analyse des données pour la publication des premiers résultats (1990).

Les résultats obtenus au cours de ces deux années doivent permettre d'aborder par la suite l'objectif de planification que se fixe le programme, et d'étendre par ailleurs les méthodes et techniques utilisées à d'autres régions connaissant les mêmes problèmes :

- 1991-1992 : modélisation de la dynamique de l'extension urbaine
 - simulation de scénarios de développement
 - conséquences sur l'environnement
 - simulation du fonctionnement des ouvrages d'équipement
- 1993 : extension des résultats à d'autres régions

4. PROPOSITIONS D'UN PROGRAMME D'ACTIVITES HYDROLOGIQUES

4.1 Nature des activités

D'après l'analyse réalisée dans le chapitre 1 concernant les problèmes liés à l'Eau dans la Ville de Mexico, l'intervention potentielle des Sciences de l'Eau peut se situer à 4 niveaux :

- traitement des eaux usées
- approvisionnement en eau potable
- analyse du fonctionnement de la nappe
- protection contre les inondations

L'ensemble des domaines cités, du moins les 3 derniers, a un support commun constitué par une étude détaillée et précise des ressources en eau, nécessitant une bonne connaissance des étapes du cycle de l'eau.

A Mexico comme dans l'ensemble du pays, les données semblent abondantes, notamment en matière de pluies journalières, d'intensités d'averses à pas de temps fixe (5,10,15..minutes), de débits journaliers, d'évaporation journalière, d'insolation journalière, de vitesse de vent moyenne journalière, d'humidité relative etc...Il existe également quelques mesures hydro-pluviométriques couplées effectués sur des bassins urbains : les seules à ma connaissance proviennent de 5 bassins étudiés à Mexico pendant 3 ans, se réduisant après critique à une seule station-année (Manual de Hidraulica Urbana, UNAM).

Cette abondance des données est néanmoins difficilement exploitée par les services mexicains, malgré la parution régulière d'annuaires, et le système de gestion des données climatologiques et hydrométriques reste assez lourd et incomplètement informatisé : ces services sont visiblement intéressés par la technologie ORSTOM de collecte, de gestion et de traitement des données .

En raison de l'importance de l'instabilité des sols, les relevés topographiques sont fréquents, notamment dans la vallée de Mexico.

En revanche, au niveau de l'interface sol-atmosphère, si les états de surface naturels bénéficient d'une bonne couverture cartographique traditionnelle, les caractéristiques hydrodynamiques de ces sols ont été peu étudiées. La connaissance du bâti et de son évolution semble également très fragmentaire.

La contribution de la télédétection à la cartographie et au suivi des sols naturels et du bâti est donc un axe de recherche dans lequel l'ORSTOM possède une expérience qu'il convient de développer. De façon complémentaire, il faut intensifier les connaissances portant sur les caractéristiques hydrodynamiques des sols naturels, destinées à être exploitées dans les problèmes de modélisation pluie-débit. Cette étude peut impliquer l'utilisation du mini-simulateur de pluie mis au point par l'ORSTOM.

En matière de modélisation, les chercheurs de l'UNAM, les plus compétents sur le sujet, se sont déclarés vivement intéressés par l'expérience de l'ORSTOM acquise en Afrique de l'Ouest en ruissellement urbain superficiel. Il existe effectivement à Mexico, dans les nombreuses zones d'urbanisation plus ou moins contrôlées, des bassins assez comparables à ceux étudiés par l'ORSTOM en Afrique sahélienne ou tropicale. D'autre part, l'exploitation des modèles développés par l'UNAM reste assez lourde par manque de convivialité des programmes.

Un autre axe de recherche est donc représenté par le développement des modèles de ruissellement de surface, d'une part sur le plan des performances (utilisation de modèles distribués) et d'autre part sur le plan de la convivialité (utilisation et adaptation de logiciels déjà existants). L'utilisation de modèles distribués sous-entend des travaux assez lourds, portant notamment sur la spacialisation des données de précipitations et des données d'occupation du sol et de topographie (Modèles Numériques de Terrain) d'une part, sur la mise au point de capteurs et de logiciels permettant l'exploitation automatique des données d'autre part.

Dans les domaines autres que l'hydrologie de surface, seules l'hydraulique souterraine et la connaissance du fonctionnement de la nappe peuvent justifier la proposition d'un programme de recherche de la part de l'ORSTOM. Cependant, la réalisation d'un tel programme compatible avec les moyens et le calendrier prévus pour l'exécution du programme Vallée de Chalco semble difficilement envisageable, dans l'immédiat du moins.

En fonction de ce panorama rapide des activités hydrologiques pratiquées au Mexique, les propositions du Département Eaux Continentales en vue d'une participation au programme d'étude du développement urbain de la Vallée de Chalco peuvent être résumées de la façon suivante :

Axes de Recherche

- Spacialisation des données de précipitations et d'occupation des sols dans la Vallée de Mexico :
 - analyse de la variabilité spatiale des paramètres statistiques d'ajustement des distributions des caractéristiques fines d'averses en fonction du relief
 - contribution de la télédétection à une cartographie spacialisée des sols naturels et du bâti
- Etude des caractéristiques hydrodynamiques des sols dans la Vallée de Mexico
- Mise au point d'un modèle distribué de ruissellement urbain intégrant les variables spacialisées étudiées précédemment :
 - rédaction informatique du modèle ou adaptation de versions déjà existantes
 - calage du modèle sur des données hydro-pluviométriques couplées, à acquérir éventuellement
 - développement de la convivialité et des applications graphiques du modèle pour la gestion et la planification du ruissellement urbain

Transfert de Technologie :

- utilisation des capteurs de données hydro-pluviométriques et des logiciels de traitement correspondants, mis au point par l'ORSTOM, sur un bassin urbain test, destiné ultérieurement au calage de modèles de ruissellement urbain.

- utilisation du mini-simulateur de pluie pour l'étude des caractéristiques hydrodynamiques des sols naturels

Formation :

- formation de techniciens des services hydrologiques Mexicains à l'utilisation des capteurs de données hydro-pluviométriques et des logiciels de gestion correspondants, mis au point par l'ORSTOM.
- participation à un cycle universitaire de cours consacrés aux problèmes de planification urbaine.

4.2 Calendrier des opérations

Les activités proposées dans le paragraphe précédent constituent une liste indicative d'opérations susceptibles d'intéresser les services et institutions mexicaines d'une part, de développer des recherches communes dans de bonnes conditions d'autre part.

La réalisation de ces opérations doit cependant tenir compte des impératifs suivants :

- ces opérations, dans la mesure où elles s'inscrivent dans le cadre du programme d'étude du développement urbain de la Vallée de Chalco, sont soumises à des échéances, dont la première est fixée au début de l'année 1991.
- ces opérations sont également déterminées par le choix de la structure d'accueil, à la fois pour fixer les moyens disponibles en personnels et pour fixer les thèmes d'études retenus.

La mise en place du calendrier des opérations justifie donc d'effectuer une nouvelle mission à Mexico pour discuter les modalités d'une participation des chercheurs de la UNAM au programme Vallée de Chalco sous son aspect impact de l'urbanisation sur l'environnement.

Cette mission se déroulera probablement au début du mois de juillet 1989.

Il est déjà cependant possible de préciser que le thème de recherche à aborder prioritairement concerne l'utilisation de la télédétection pour la caractérisation et le suivi des états de surface d'une part : ce thème constitue un aspect primordial de l'étude du développement urbain et de ces conséquences sur l'environnement, et constitue dans un premier temps une préoccupation commune à l'ensemble des disciplines réunies dans le cadre de l'étude du développement urbain de la Vallée de Chalco.

CONCLUSION :

La mission effectuée à Mexico du 5 au 21 janvier 1989 a permis de jeter les bases d'un programme de Recherche en Coopération développé par le Département Eaux Continentales dans la région de Mexico.

Le contenu de ce programme peut être défini par :

- des axes de recherche centrés sur l'utilisation de la télédétection et sur le développement des modèles pour le ruissellement urbain
- des échanges portant sur les technologies utilisées en matière de collecte, de gestion et de traitement des données climatologiques et hydrométriques
- des actions de formation de gestionnaires de données climatologiques et hydrométriques, et de formation des étudiants dans le cadre d'un cycle de cours sur les problèmes de planification urbaine.

Dans l'ensemble de ces domaines, l'ORSTOM peut en effet faire valoir son expérience, acquise :

- en Afrique de l'Ouest dans la réalisation de réseaux de mesures hydro-pluviométriques en milieu urbain et dans la maîtrise de la modélisation du ruissellement dans les zones à urbanisation mal contrôlée.
- en Afrique de l'Ouest et en Amérique Latine dans l'utilisation de la télédétection pour la cartographie des états de surface
- au Laboratoire d'Hydrologie :
 - dans la mise au point des capteurs pluviographiques et limnimétriques (Oedipe et Chloé, avec la collaboration de ELSYDE), et dans la mise au point des logiciels de gestion (Pluviom et Hydrom) et de traitement (Dixloi, Cartovl, Statg etc..) des données climatologiques et hydrométriques.
 - dans la formation des techniciens et des étudiants en hydrologie de surface.

A la lumière du tour d'horizon réalisé auprès des instances mexicaines de traitement des problèmes urbains liés à l'Eau, il apparaît qu'un tel programme doit de préférence être entrepris avec l'Instituto de Ingenieria de l'UNAM : cet institut possède le double avantage de compter des chercheurs et ingénieurs de haut niveau en hydrologie et en hydraulique d'une part, et d'entretenir des relations étroites avec les circuits de décision ministériels d'autre part.

Une nouvelle mission à Mexico est prévue pour le mois de juillet 1989 pour préciser la thématique et les modalités d'exécution du programme proposé.

Dans le cas d'une évolution favorable, cette proposition devrait conduire à l'affectation de C. Bouvier à Mexico avant la fin de l'année 1989.

Fait à Montpellier, le 2 février 1989.

BIBLIOGRAPHIE

- Bataillon C., Panabière L. - 1986
Mexico, la plus grande ville du monde. PUBLISUD
- BURGEAP - 1987
Recarga del Acuífero de Mexico.
- Departamento del Distrito Federal - 1974
Memorias sobre el desagire profundo del Valle de Mexico.
- Departamento del Distrito Federal - 1982
Manual de Hidraulica Urbana - Toma 1 - Teoria General.
- Departamento del Distrito Federal - 1987
Atlas de la Ciudad de Mexico.
- Lacombe B. - 1985
De quelques questions en matière de recherche en Sciences Sociales. Note du Département SDU - ORSTOM.
- Niederberger Betton C. - 1987
Paléopaysages et Archéologie pré-urbaine du bassin de Mexico - Tome 1.
CEMCA
- Palacios O. L., Cuevas R. - 1988
Development of an interactive computer graphic system for the design of agricultural (surface) drainage. Note de l'Instituto de Chapingo.
- SARH - 1987
Boletín Hidrológico nº 33 - Datos del Valle de Mexico correspondientes al año 1980.

CONCLUSION GENERALE :

Les systèmes d'assainissement pluvial basés sur le concept hygiéniste de l'évacuation rapide semblent avoir atteint, voire dépassé, leurs limites dans les pays en voie de développement. Une amélioration en profondeur de leurs performances passe par l'adoption d'un nouveau concept, basé davantage sur la rétention temporaire ou définitive d'une partie du ruissellement pluvial. Les ouvrages correspondants permettent en effet de :

- . diminuer la charge des réseaux, et par conséquent les coûts d'investissement
- . augmenter la flexibilité des systèmes dans leur ensemble
- . réutiliser la ressource en eau dans les zones où cette ressource est faible.

Dans les pays industrialisés, cette évolution s'est produite dans un passé assez récent, accompagnée de nombreux développements concernant les modèles d'évaluation du ruissellement pluvial [9].

Pour les pays en voie de développement, cette orientation des techniques d'assainissement pluvial doit être sérieusement étudiée et définie dans un proche avenir le problème en ces termes :

quelles sont les solutions techniques les mieux adaptées au drainage des eaux pluviales dans les villes des PVD, et comment dimensionner ces aménagements.

Cette définition fait clairement apparaître deux axes de recherche principaux, portant sur :

- . la proposition et l'expérimentation des aménagements
- . la modélisation du fonctionnement de ces aménagements, comportant d'une part la modélisation du fonctionnement hydraulique de l'aménagement lui-même, et d'autre part la modélisation du fonctionnement de l'unité hydrologique élémentaire associée à cet aménagement.

Cette définition fait aussi clairement apparaître une chronologie à respecter dans les recherches à mener sur ces deux axes : à chaque solution technique correspond en effet une unité hydrologique élémentaire particulière, donc un niveau d'échelle particulier, qui conditionne le type de conceptualisation des mécanismes de fonctionnement à utiliser. Dans ces conditions, le choix des aménagements doit a priori intervenir d'abord, pour fixer le cadre des travaux de recherche portant sur la modélisation. Pour plusieurs raisons néanmoins, il semble important de poursuivre dès maintenant les travaux portant sur la modélisation des écoulements :

- . pour le type d'aménagement basé sur le concept hygiéniste, actuellement en vigueur dans les PVD et sans doute appelé à perdurer, les modèles proposés restent perfectibles, et justifient le test de nouveaux concepts portant sur les mécanismes, de nouveaux protocoles de calage et de nouvelles échelles de définition des surfaces élémentaires (voir document n°1, 3.1 et 3.2)

l'expérience acquise en travaillant sur les données des villes d'Afrique de l'Ouest montre que, indépendamment de la conception des systèmes d'assainissement, l'utilisation des modèles est très rapidement limitée :

- * par les incertitudes météorologiques
- * par le volume des données à acquérir et à gérer.

Le développement de nouveaux capteurs permettant une collecte et une gestion informatisées des données doit être entrepris sans tarder, en collaboration avec d'autres programmes à l'ORSTOM (voir document n°1, 3.3).

Dans ce même domaine, il est impératif d'associer aux modèles développés pour la recherche une version informatisée, modulaire et évolutive destinée à servir en mode opérationnel.

dans certains cas, il est possible de prévoir l'évolution de la conception des systèmes d'assainissement : ainsi, dans la vallée de Mexico, cette évolution est nettement représentée par la réinjection des eaux pluviales dans la nappe, au moyen de forages. Le BURGEAP et l'Ecole des Mines de Paris sont actuellement impliqués dans ce projet. Ce cadre technique pourrait servir de base pour structurer un programme de modélisation des écoulements dans la Vallée de Mexico s'inspirant des points précédents.

Les grands axes de recherche ayant été définis, voyons maintenant comment l'ORSTOM pourrait et devrait s'y impliquer.

En ce qui concerne l'hydrologie, je rappelle que les modèles proposés jusqu'à maintenant correspondent, à des degrés divers, à des "boîtes noires" et n'ont pas permis de déterminer la nature des mécanismes d'écoulement en milieu urbain. Ces mécanismes sont cependant d'une importance fondamentale pour espérer extrapoler temporellement et spatialement l'application d'un modèle donné, ceci étant d'autant plus vrai que le bassin est susceptible de se modifier.

J'insiste donc sur le fait que les travaux en matière de modélisation doivent être poursuivis :

en Afrique de l'Ouest:

- * sur la base d'une conception linéaire du drainage des eaux pluviales
- * sur une autre base qui pourrait être définie au cours de la réunion programmée par le CIEH en septembre 1989 à Montpellier, entre le CIEH, l'ORSTOM, le LHM, l'Université de Karlsruhe, le BURGEAP, le BETURE-SETAME, le BCEOM, le STU.

dans la vallée de Mexico, sur la base de la réinjection des eaux pluviales dans la nappe.

Actuellement, je suis le seul chercheur de l'ORSTOM à travailler sur ces problèmes de modélisation en milieu urbain. Ma prochaine affectation à Mexico ne me permettra pas d'assurer la totalité de ce programme. Je demande donc qu'un autre chercheur ou ingénieur soit pressenti pour prendre en charge la continuité du programme en Afrique de l'Ouest.

Dans un cadre plus général maintenant, et indépendamment de la zone géographique considérée (Afrique de l'Ouest ou Mexique), la programmation des activités potentielles doit tenir compte des points suivants :

- . le choix des solutions techniques dépasse largement les compétences et les attributions de l'ORSTOM. Cependant, plusieurs disciplines représentées à l'ORSTOM sont concernées par ce problème (santé, urbanisme, économie, hydrologie) et pourraient participer à un groupe de réflexion créé pour la circonstance. Des contacts internes ont déjà été pris dans ce sens (réunions LHM, DEC, SDU et Santé le 2 mai et le 29 juin 1988), mais n'ont pas connu de suite, bien que tous les participants fussent d'accord sur la conduite à tenir et les opérations à mener ! La première cause de cet échec est sans doute l'absence de structure officielle (unité de recherche par exemple).

- . le suivi des expérimentations d'aménagements alternatifs est quant à lui tout à fait dans le registre des activités de l'ORSTOM, qui, par son expérience du terrain et sa présence dans les PVD, est sans doute le mieux placé pour intervenir, aussi bien dans le domaine des sciences physiques que dans celui des sciences humaines.

- . le dimensionnement des ouvrages passe par la connaissance des écoulements superficiels, voire souterrains, des bassins. Là aussi, nous sommes actuellement parmi les mieux placés, aussi bien sur le plan de la modélisation que sur le plan des relations avec les PVD (notamment avec les états africains) pour intervenir.

L'ORSTOM réunit donc les compétences et les conditions nécessaires pour remplir une mission d'expertise sur le premier point évoqué ci-dessus, et pour participer aux opérations intervenant dans les deux points suivants. Il me semblerait dommage d'abandonner cette position privilégiée, concernant un domaine qui constitue actuellement une préoccupation prioritaire des PVD : les récents événements survenus à Djibouti (voir article du Monde du 11 avril 1989) sont sans doute appelés à se reproduire de plus en plus fréquemment dans les PVD...et ailleurs (Nîmes n'est pas si loin).

Le volume et la diversité des problèmes justifient largement la création d'une structure interdisciplinaire officielle à l'ORSTOM, regroupant des hydrologues, des médecins entomologues, des géographes et des démographes (liste non exhaustive !):

- . il semble indispensable de recenser et de mettre en commun les connaissances acquises par ces disciplines sur le thème de l'eau dans la ville :

- * quantification spatiale et temporelle des écoulements et de la ressource en eau, pour l'hydrologie

- conditions de développement des maladies virales (typhoïde, choléra, hépatite) et des maladies à vecteur (paludisme, bilharziose ,onchocercose) en fonction du type d'écoulement et de la qualité des eaux, dans le domaine de la santé
- perception sociale, économique ou culturelle des aménagements par les "usagers" de l'assainissement, dans le domaine des sciences sociales

sur cette base, le premier objectif de cette structure doit être l'étude, en milieu urbain, des interactions du drainage des eaux pluviales, de l'état et de la gestion de la ressource en eau.

d'autres développements sont à prévoir en fonction du rôle que pourrait jouer les disciplines axées sur les sciences humaines. L'objectif le plus intéressant serait d'essayer de modéliser la dynamique du développement urbain du point de vue de la démographie et de l'occupation des sols, et d'en dégager quelques scénarios prévisionnels. Ce type de modélisation prévisionnelle permettrait de définir des orientations en matière d'aménagement urbain, et en matière de drainage et d'assainissement en particulier.

Je vous prie donc d'examiner également la possibilité de créer cette structure officielle pluridisciplinaire et espère trouver auprès de vous un accueil favorable à cette proposition.

Montpellier, le 12 avril 1988

DJIBOUTI : 8 morts et 150 000 sans-abri

Des pluies diluviennes ont dévasté la capitale

La ville de Djibouti est sinistrée à 70% après les pluies diluviennes qui se sont abattues, depuis jeudi 6 avril, sur tout le pays. Le bilan provisoire s'établit à huit morts et au moins cent cinquante mille sans-abri. Un plan d'urgence a été décrété et une cellule de crise, placée sous l'autorité du ministre de l'intérieur, a été mise en place.

Le niveau des eaux a atteint jusqu'à 1,70 mètre dans les quartiers les plus bas de la ville; des casernes et l'hôpital militaire français ont été inondés. Entre le 5 et le 8 avril, il est tombé à Djibouti 185 millimètres de pluie, alors que la moyenne annuelle des précipitations est de 130 à 150 millimètres.

L'armée et la police djiboutiennes, aidées par les forces françaises stationnées à Djibouti, continuent leurs opérations d'assistance aux populations sinistrées, rassemblant les sans-abri dans vingt-trois

centres, sous des tentes, dans les mosquées, les casernes et les écoles de la capitale. La ville a été découpée, pour les besoins de la cause, en trois zones d'intervention.

L'armée et la police djiboutiennes ont installé des cuisines roulantes et des moto-pompes dans les quartiers les plus touchés qui disparaissent sous les eaux. La plupart des véhicules militaires ont été mis à la disposition de la cellule de crise.

Aide française

Réuni en séance extraordinaire sous la présidence du chef de l'Etat, M. Hassan Gouled Aptidon, le gouvernement a lancé un « appel à l'aide de la communauté internationale et des pays amis ». C'est ainsi que le gouvernement français, « afin de manifester sa solidarité agri-

sante », a envoyé samedi par avion « d'importants moyens » de secours et de lutte contre les inondations. Ces moyens comprennent notamment vingt moto-pompes avec le matériel d'accompagnement, des rations alimentaires et un détachement et vingt et un marins et sapeurs-pompiers, ainsi que des tentes et des couvertures.

Cette aide s'ajoute à celle des forces françaises stationnées sur place. Celles-ci, dans les premières soixante-douze heures de la catastrophe, ont pu sauver de la mort grâce à des hélicoptères plus de soixante-dix personnes.

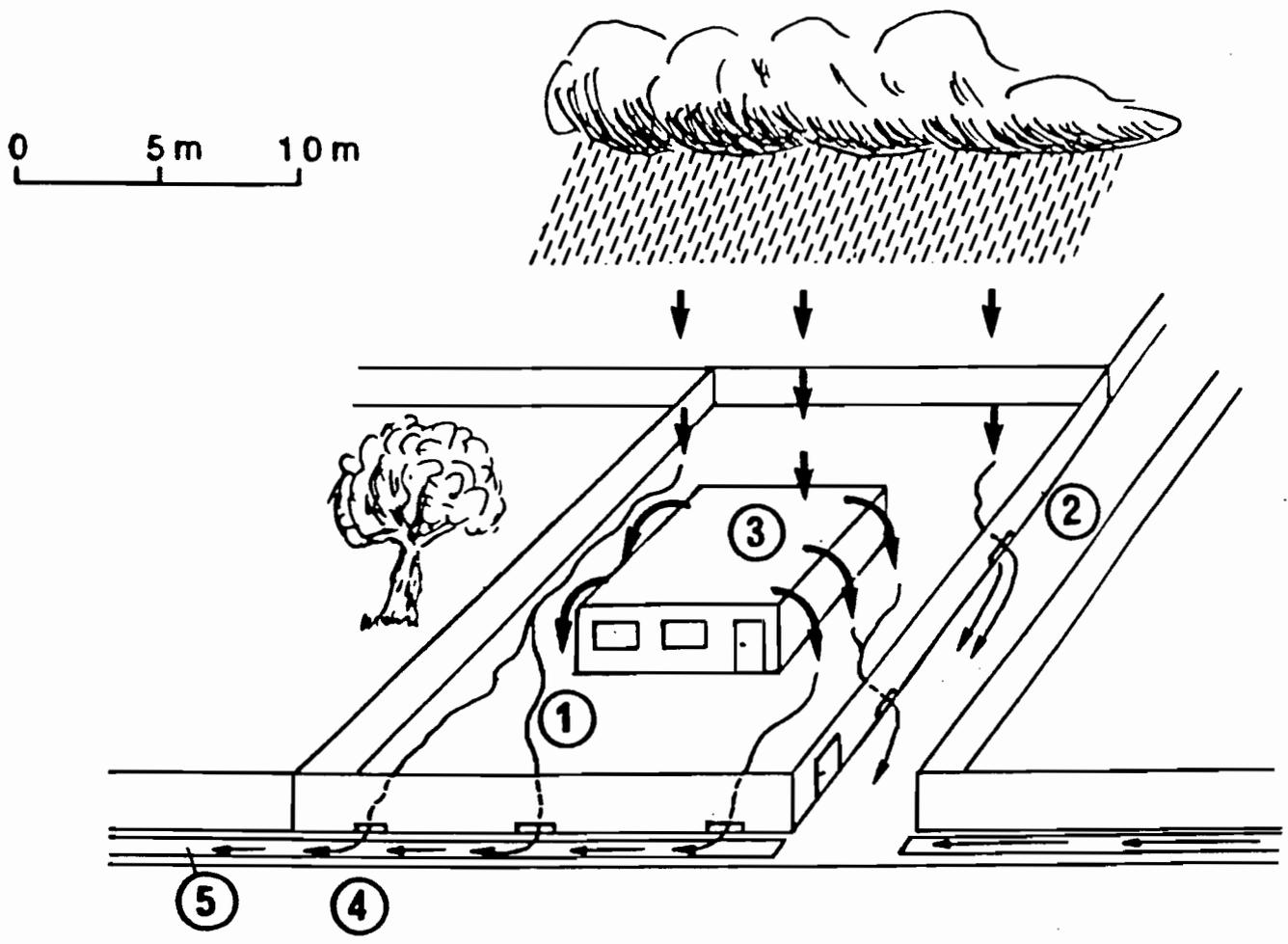
Des pluies torrentielles sont aussi tombées sur plusieurs régions de l'ouest du Yémen du Sud, notamment sur le gouvernorat et de Shabwa. Ces inondations auraient déjà fait plus de dix-huit morts et près de cinquante mille sinistrés.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] N'DOYE I. - 1988
"Etude fréquentielle comparative de quelques caractéristiques des averses en Afrique de l'Ouest".
Mémoire d'ingénieur de l'EITARC
- [2] BOUVIER C., GATHELIER R., GIODA A. - 1986
"Campagne de simulation de pluies en milieu urbain - Niamey".
ORSTOM-CIEH
- [3] BOUVIER C., BERTHELOT M., JANEAU J.L. - 1987
"Campagne de simulation de pluies en milieu urbain - Abidjan-Yopougon".
ORSTOM-CIEH
- [4] BOUVIER C., DELFIEU J.M., JANEAU J.L. - 1987
"Campagne de simulation de pluies en milieu urbain - Ouagadougou".
ORSTOM-CIEH
- [5] BOUVIER C., MAILLAC P., SEGUIS L., SMAOUI A., JANEAU J.L. - 1987
"Campagne de simulation de pluies en milieu urbain - Lomé".
ORSTOM-CIEH
- [6] BOUVIER C., JANEAU J.L. - 1988
"Simulation de pluies en milieu urbain - Rapport de synthèse".
ORSTOM-CIEH
- [7] BOUVIER C., THEBE B. - 1988
"Urbanisation et coefficients d'occupation des sols en Afrique de l'Ouest".
ORSTOM-CIEH
- [8] BOUVIER C., GUIGUEN N., PEPIN Y. - 1988
"Les bassins urbains de Niamey - Campagne 1987".
ORSTOM-CIEH
- [9] DESBORDES M. - 1987
"Contribution à l'analyse et à la modélisation des mécanismes hydrologiques en milieu urbain".
Thèse de doctorat d'état - USTL

ANNEXE 1 :
ELEMENTS CONCERNANT LA PROBLEMATIQUE DE LA
MODELISATION DU RUISSELLEMENT PLUVIAL DANS LES VILLES
D'AFRIQUE DE L'OUEST

Figure 1 : schéma d'une concession



- 1 cour en sol naturel
- 2 voie secondaire non goudronnée
- 3 toiture
- 4 voie principale goudronnée
- 5 collecteur

1. Généralités sur le fonctionnement des bassins urbains

Par rapport aux bassins situés en milieu naturel, les bassins urbains comportent deux particularités principales :

- une proportion importante de surfaces imperméables
- un système de drainage dense dont les caractéristiques géométriques sont homogènes.

Ces particularités autorisent à penser que les lois qui régissent les écoulements sur ces bassins sont davantage du ressort de l'hydraulique que de l'hydrologie traditionnelle. Ou du moins, que les mécanismes hydrologiques classiques y trouvent de nombreuses simplifications.

Dans les pays industrialisés, la plupart des auteurs ne prennent en compte que les surfaces imperméables pour expliquer le ruissellement urbain. D'autres vont plus loin encore, en ne considérant que les surfaces imperméables directement reliées au réseau de drainage.

A la différence des pays industrialisés, l'urbanisation des bassins des PVD, du moins de la plupart d'entre eux, est caractérisée par une relative importance des surfaces naturelles par rapport aux surfaces imperméabilisées. L'étude détaillée du milieu a montré que la proportion de surfaces bâties se situait en moyenne autour de 30%.

La difficulté de comprendre et d'analyser le fonctionnement de ces bassins n'est cependant pas liée directement à ces faibles pourcentages de bâti, mais bien davantage au fait qu'il n'est guère possible d'y dissocier à une échelle globale les zones bâties et les zones naturelles.

En effet, il n'est à priori pas question ici de déterminer séparément les contributions respectives de ces zones, comme on pourrait le faire dans les pays industrialisés, pour lesquels zones bâties et naturelles représentent des unités homogènes de dimensions importantes (zones non constructibles (!!), forêts...) ou réduites (jardins gazonnés.), mais toujours bien individualisées des zones imperméabilisées. Au contraire, l'imbrication parcellaire des surfaces bâties et naturelles est poussée à son extrême dans les PVD, comme l'illustre la disposition traditionnelle des concessions (figure 1) : les maisons y sont la plupart du temps entourées de cours en sol naturel dans lesquelles se déversent l'écoulement pluvial.

Il est clair qu'à priori ce type d'occupation des sols est susceptible d'induire des discontinuités peu compatibles avec l'utilisation de modèles globaux classiques. Supposons en effet que l'unité hydrologique élémentaire sur laquelle nous travaillons soit constitué d'un système toiture-cour à sol très perméable : le ruissellement résultant pourrait être nul là où l'application d'un modèle global conduirait à un résultat non nul.

Cependant, cet exemple montre également à quelle niveau d'échelle il faudrait descendre pour prendre en compte ces discontinuités. Et l'utilisation d'un modèle distribué comporte suffisamment de contraintes, actuellement du moins, pour que le problème mérite d'être considéré d'abord à une échelle plus ou moins globale.

Ceci explique la démarche que nous avons suivi pour modéliser le ruissellement pluvial, que l'on peut résumer par la double question suivante :

quelles sont les surfaces élémentaires que l'on doit considérer pour expliquer globalement le ruissellement sur les bassins urbains étudiés dans les PVD, et comment doit-on y représenter les mécanismes de ruissellement ?

2 Conceptualisation des surfaces élémentaires

Nous avons choisi d'établir cette conceptualisation des surfaces élémentaires en fonction du double impératif suivant :

- . la prise en compte globale de catégories destinées à limiter les discontinuités susceptibles d'apparaître compte tenu des positions respectives des différents états de surface
- . la prise en compte des différentes caractéristiques hydrodynamiques

Nous avons donc retenu plusieurs niveaux de définition de surfaces élémentaires :

Niveau 0 : le bassin est considéré dans sa globalité (1 surface élémentaire)

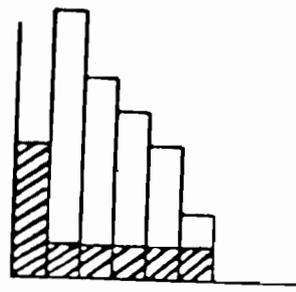
Niveau 1 : les surfaces élémentaires sont les surfaces bâties d'une part et les surfaces naturelles d'autre part.(2 surfaces élémentaires, IMP et PER)

Niveau 2 : les surfaces précédentes sont sous-classifiées en fonction de leurs positions respectives. On distingue les surfaces imperméables reliées directement ou non au réseau, et les surfaces naturelles recevant ou non de l'eau en provenance des surfaces imperméables (4 surfaces élémentaires, IMP1, IMP2, PER1, PER2)

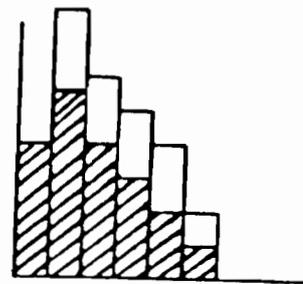
Niveau 3 : pour les surfaces naturelles PER2, on établit une nouvelle sous classification en fonction de la présence ou de l'absence de végétation (5 surfaces élémentaires, IMP1, IMP2, PER1, PER2_{nu}, PER2_{veget})

Figure 5 : Schémas de fonctionnement
de production et de transfert
de l'écoulement

Production :



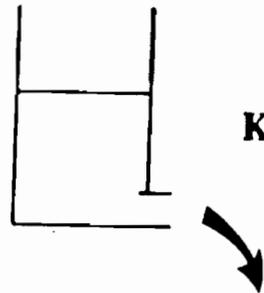
STO et INF



STO et COEF



Transfert :



DESTO :

$$\text{Stock}_{\text{début}}(i) = \text{stock}_{\text{fin}}(i-1) \cdot \text{EXP}(-\text{DESTO} \cdot (t_{\text{début}}(i) - t_{\text{fin}}(i-1)))$$

3. Conceptualisation des mécanismes de ruissellement

Les mécanismes de transformation de la pluie en débit sont conceptuellement représentés par un schéma de production, qui transforme la pluie brute en pluie nette, et par un schéma de transfert, qui transforme le hyétogramme de la pluie nette en hydrogramme de ruissellement.

Dans notre étude, nous avons voulu étudier les performances de schémas simples, compatibles avec le volume de données disponibles, et utilisés par ailleurs de façon classique dans les pays industrialisés.

Les schémas de production testés, définissant les pertes à l'écoulement, se répartissent en 2 groupes principaux :

- un premier schéma constitué de pertes initiales constantes et de pertes continues dans le temps également constantes
- un autre schéma qui se différencie du précédent par le fait que les pertes continues dans le temps sont proportionnelles à l'intensité de l'averse.

Chaque schéma fait appel à 2 paramètres, STO et INF pour le premier schéma, STO et COEF pour le deuxième.

Pour chacun de ces schémas, nous avons introduit une variante consistant à admettre que les pertes à l'écoulement initiales peuvent varier d'un événement à l'autre, en fonction des précipitations antérieures par exemple. Cette variante introduit un paramètre supplémentaire, DESTO, représentant conceptuellement la diminution de la lame stockée de la fin d'une pluie au début de la suivante.

Chacun de ces schémas de production a été associé à un schéma de transfert unique, constitué par un modèle, dit de stockage, à un réservoir linéaire.

Ce schéma fait intervenir un paramètre, K, et l'équation de transformation de la pluie nette L_r en débit Q s'écrit :

$$Q(t) = \int_0^t L_r(\tau-t) \cdot 1/K \cdot \exp(-t/K) \cdot d\tau$$

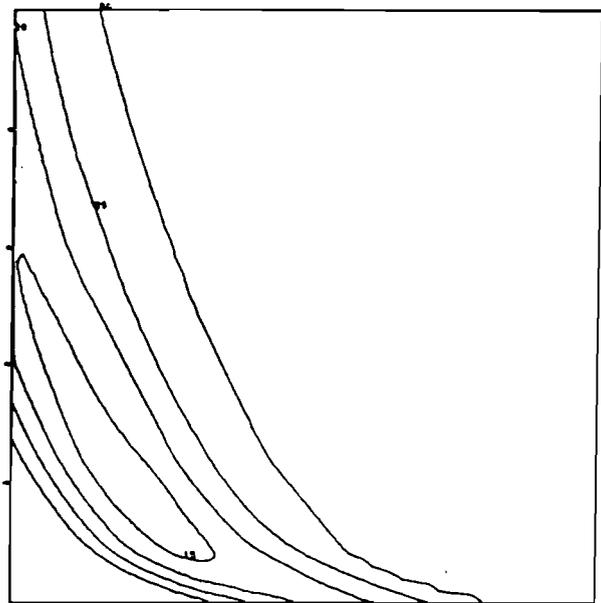
La figure 2 illustre le fonctionnement des différents schémas utilisés pour décrire les mécanismes de transformation de la pluie en débit.

Figures 2 et 3 : lignes d'isovaleurs de la fonction critère

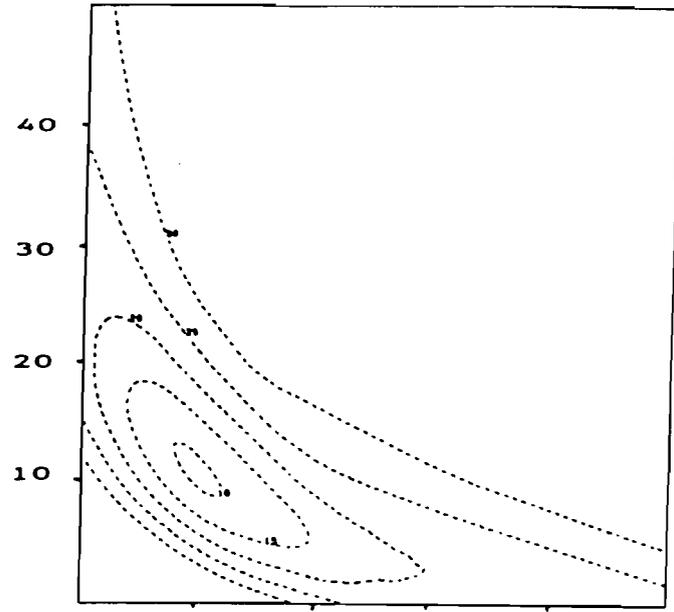
Sous-échantillon n°1

Sous-échantillon n°2

INF en mm/h



INF en mm/h



STO en mm

STO en mm



$$\text{Nouveau critère} = \text{Min}(\text{Max}(\text{crit1}, \text{crit2}))$$

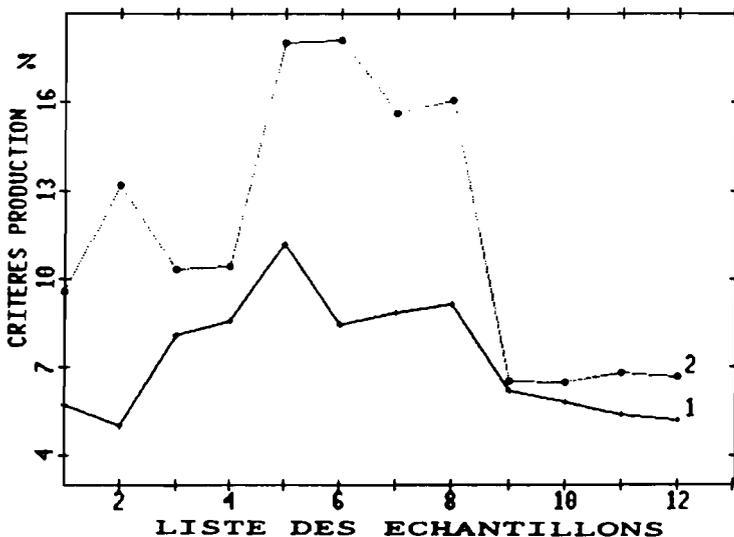


Figure 4 : comparaison des critères "stabilisés" sur 6 bassins (12 demi-échantillons)

4. Illustration de la méthodologie utilisée pour le calage des modèles

a) les figures 3 et 4 montrent les variations de la fonction critère associée à une fonction de production à 2 paramètres donnés, INF et STO. Ces variations ont été calculées sur chaque moitié de l'échantillon des données d'un bassin de Ouagadougou.

b) à partir des critères calculés sur les 2 demi-échantillons, le maximum de ces deux critères est déterminé pour chaque couple de paramètres, et fournit un nouveau critère pour l'ensemble de l'échantillon, qu'il convient de minimiser. A la valeur minimale correspond un jeu de paramètres convenant simultanément aux deux sous-échantillons. Ce jeu de paramètres fixe pour les 2 sous-échantillons les valeurs des critères qui serviront à la validation du modèle.

c) la figure 5 représente les critères de production ainsi obtenus pour un ensemble de 6 bassins, pour lesquels nous avons testé l'adéquation du choix de 2 niveaux différents de définition des surfaces élémentaires, niveau 1 contre niveau 2. Dans le cas présent, l'hypothèse n°1 (niveau 1) donne de meilleurs résultats que l'hypothèse n°2 (niveau 2) : la précision du modèle diminue donc pour une description plus fine des surfaces élémentaires. Ce résultat peut cependant provenir de différentes causes (données, conceptualisation des mécanismes de fonctionnement) et doit être évidemment analysé plus en détail.

Par rapport à la démarche plus classique consistant à cheminer dans l'espace pour déterminer le jeu de paramètres "optimisé", la méthodologie de calage proposée intègre beaucoup plus d'éléments d'information, pour un temps de mise en oeuvre équivalent. Elle permet, tout en respectant la différenciation des étapes de calibration et de validation :

- . d'analyser le fonctionnement du modèle sur une plage très large de jeux de paramètres, pour plusieurs sous-échantillons (2 dans notre cas)
- . de minimiser les biais numériques dans la détermination des paramètres, qui résulteraient d'une optimisation ponctuelle réalisée avec des échantillons de faible effectif ou de faible variance
- . de déterminer les influences respectives de chacun des paramètres
- . d'analyser la sensibilité du modèle à ces paramètres

Cette démarche peut être généralisée pour des modèles comportant plus de 2 paramètres, et peut être utilisée avec autant de sous-échantillons qu'on le désire.