PLUIES ET CRUES EXTREMES EN MILIEU URBAIN TROPICAL

Christophe BOUVIER, Jean-Louis PERRIN, Anne CRESPY, Leonardo CISNEROS, Benoît HINGRAY, Geoffroy WOTLING

IRD, B.P. 5045, 34032 Montpellier Cedex 1

Fonds Documentaire IRD
010021533

I INTRODUCTION

Dans les zones urbaines et péri-urbaines des PED, les crues brutales ou « éclair » représentent un risque potentiel important, qu'il est actuellement extrêmement difficile de caractériser. Les trois lacunes majeures concernent i) la variabilité spatiale des systèmes précipitants et son incidence sur l'estimation des crues extrêmes, ii) la réponse de la composante naturelle des bassins, souvent prépondérante en milieu tropical iii) la caractérisation des inondations et la définition d'indicateurs lisibles du risque. Dans les milieux montagneux, ces crues s'apparentent parfois davantage à des coulées boueuses alimentées ou non par glissements de terrain.

Ces différents aspects sont étudiées depuis 1995 par l'équipe du programme RUES, constituée de 3 chercheurs (Ch. Bouvier, J.L. Perrin, hydrologues, et V. Risser, géotechnicien en accueil de 1996 à 1998), 2 ingénieurs (A. Crespy, informatique ; J.L. Janeau, pédologue) et 3 doctorants (L. Cisneros, B. Hingray, G. Wotling).

Les études réalisées dans le cadre de ce programme reposent sur de nombreuses données expérimentales relatives à la bande inter-tropicale, en Afrique de l'Ouest (Niamey, Ouagadougou), en Amérique Latine (Mexico, Quito) et en Polynésie Française (Tahiti), qui combinent différentes conditions de relief et de pluviométrie : plateau continental et forte pluviométrie en Afrique de l'Ouest, volcanisme et faible pluviométrie en Amérique Latine (altitudes supérieures à 2000m), volcanisme et forte pluviométrie en Polynésie Française.

Bien que le soutien du PNRH ait principalement concerné le site de Quito, les objectifs et les résultats obtenus seront présentés dans ce qui suit sur l'ensemble des sites étudiés, qui procèdent d'une démarche équivalente et ne peuvent être dissociés.

Fonds Documentaire IRD
Cote : B*21533 Ex : 1

II MATERIELS ET METHODES

L'analyse des précipitations a été effectuée à partir de plusieurs jeux de données pluviométriques très consistants, dans le temps et dans l'espace : les sites de Mexico, Quito et Tahiti comptent de 20 à 50 postes en service sur 3 à 10 ans, sur des superficies de l'ordre de 1000 km^2. Sur ces trois sites montagneux soumis à une forte variabilité spatiale des averses, les objectifs visés portent sur la régionalisation des distributions statistiques des séries ponctuelles, sur l'incidence de la variabilité spatiale des averses dans l'estimation des crues, et enfin sur la simulation de champs précipitants.

L'étude des processus de formation des crues a été réalisée à partir de données recueillies sur neuf bassins expérimentaux, de quelques dizaines d'hectares à quelques dizaines de km^2, situés en Afrique de l'Ouest (2 bassins) et en milieu montagneux tropical (7 bassins). Les instrumentations les plus récentes sont particulièrement denses (8 pluviographes et 2 limnigraphes pour la quebrada Rumihurcu, à Quito, 10 km^2), afin d'obtenir une estimation fiable des entrées pluvieuses et de disposer de sous-bassins emboités. En complément des mesures d'écoulement à l'échelle du bassin, certains sites ont fait l'objet d'expériences de simulation de pluie, réalisées sur des parcelles de 1 m^2. Les sites ouest-africains avaient déjà fait l'objet de campagnes de mesure, en 1987. Depuis 1995, à Quito, de nouvelles simulations ont été réalisées sur une vingtaine de parcelles, chaque simulation comprenant une séquence de quatre expériences, avec des intensités de pluie variant en

cours d'expérience ; les humidités pondérales ont été mesurées avant et après chaque pluie ; chaque parcelle est également caractérisée par sa micro-topographie et sa granulométrie (Janeau, 1999).

Du point de vue méthodologique, les objectifs étaient à la fois descriptifs, pour identifier les fonctionnements dominants dans ces zones relativement peu explorées à l'échelle du petit bassin, et prospectifs, pour dégager les concepts relatifs à la transformation pluie-débit, ainsi que les indicateurs pertinents et accessibles associés à ces concepts.

Les glissements de terrain et laves torrentielles ont été étudiés exclusivement à Quito, ces phénomènes affectant la ville de façon récurrente en générant des dommages importants. Des campagnes de sondages géoélectriques et de perforations ont été réalisées pour déterminer les organisations géologiques, et les propriétés mécaniques des sols ont été caractérisées par essais triaxiaux (Risser, 2000). Il s'agissait de décrire la nature de ces phénomènes, puis d'en comprendre les mécanismes.

Enfin, la partie spécifiquement urbaine de nos recherches concerne la modélisation des inondations dans les secteurs urbanisés. Etape particulièrement importante puisqu'elle exprime l'impact des pluies et des crues sur le milieu sensible, c'est aussi la plus complexe. Notre contribution porte essentiellement sur une représentation sommaire des débordements du réseau, et sur la caractérisation des échanges de flux entre voiries et bâti en situation inondante.

III RESULTATS ET DISCUSSION

Pluies : dans les milieux montagneux que nous avons étudiés, le relief influence très fortement les précipitations, aussi bien au niveau des distributions des averses ponctuelles qu'au niveau de l'épisode lui-même. Les variations sont soumises à des effets locaux assez difficiles à appréhender sans tenir compte de la topographie détaillée.

Ce résultat a bien été mis en évidence à Tahiti, en ce qui concerne la régionalisation des paramètres des distributions statistiques des séries ponctuelles (Wotling et al., accepté). La méthode est basée sur des corrélations multiples entre les paramètres statistiques (nombre moyen d'averses et gradex) et les Composantes Principales du relief calculées sur des fenêtres d'espace, à l'aide d'un MNT. Elle dégage de façon objective les principaux *facies* du relief expliquant la variabilité spatiale des paramètres. Les résultats sont satisfaisants, et montrent l'aptitude de la méthode à reproduire les effets locaux, alors qu'une interpolation par krigeage restitue une variation très adoucie assez peu réaliste (Fig.1). Cette méthode devrait donner d'excellents résultats à Quito et à Mexico, ainsi que pour d'autres sites montagneux à relief très contrasté.

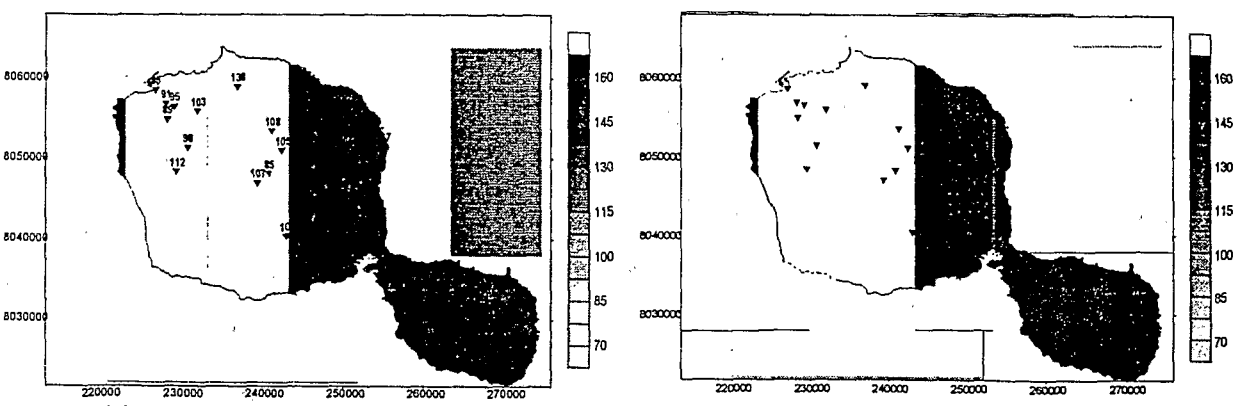

Figure 1 : Estimation du gradex des pluies horaires par régression CP (à gauche) et par krigeage (à droite)

A l'échelle de l'épisode, les pluies varient rapidement dans l'espace : à Quito, le coefficient de corrélation moyen des cumuls journaliers est de 0.3 pour une distance de 5 km (Bouvier et al., 1999). Un modèle de génération de champs pluvieux journaliers a été proposé pour la zone de Quito (Cantens, 1995) : il s'appuie sur la normalisation des distribution ponctuelles des pluies

journalières, et sur la diagonalisation de la matrice des corrélations inter-postes. La forte localisation des averses est cependant susceptibles d'altérer les corrélations spatiales (poids des valeurs nulles, avec ou sans anamorphose préalable pour normaliser les distributions), et une autre méthode de génération, basée sur la composition de cellules pluvieuses est actuellement testée sur les données de Mexico (Cisneros, 1998). Chacun des modèles sera validé sur son aptitude à reconstituer différentes variables associées à une ou plusieurs séries ponctuelles.

Crues : Les modèles de transformation pluie-débit sont maintenant relativement satisfaisants pour les milieux fortement urbanisés, pour lesquels les processus de production sont simplifiés et la géométrie du drainage relativement accessible. Dans le cas des PED, l'urbanisation reste cependant le plus souvent assez peu dense et les bassins présentent une forte proportion de surfaces naturelles. Ces surfaces contribuent au ruissellement sous l'effet des intensités extrêmes, voire courantes en milieu tropical. De plus, l'apport des bassins péri-urbains est souvent déterminant en termes d'extrême. La transformation pluie-débit se pose donc alors dans les mêmes termes qu'en hydrologie des milieux naturels, et pose les questions classiques du choix des concepts de modélisation et des indicateurs associés à ces concepts.

A Quito, l'étude de la quebrada Rumihurcu (Fig.2) montre la diversité des fonctionnements hydrologiques qui interviennent dans la formation des crues (Perrin et al., accepté) : contribution urbaine (U) caractérisée par un coefficient de ruissellement stable, contribution à dominante hortonienne des couches de cendres anciennes en aval (Cg : *Cangahua*), peu filtrantes, contribution à dominante aires contributives des couches de cendres récentes en amont (And : *Andosols*), localisées au voisinage des talwegs. D'autres exemples de semblable diversité ont été mis en évidence, à Tahiti (Wotling, 1999).

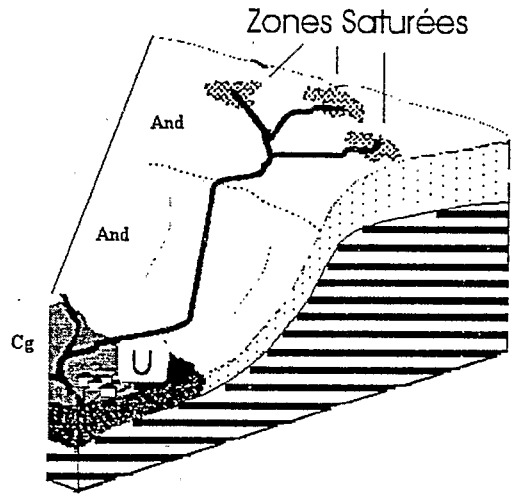

Figure 2 : Fonctionnements dominants sur la quebrada Rumihurcu

Les mesures sous pluies simulées avaient pour but de fournir des indicateurs de production, voire de transfert. Ces mesures, réalisées sur des parcelles de 1 m^2, caractérisent entre autres la conductivité hydraulique à saturation, le volume stocké dans le sol avant établissement d'un régime permanent, la variation de la rétention de l'eau dans le sol entre les différents épisodes pluvieux et la vitesse moyenne de transfert à la surface de la parcelle. Les résultats obtenus à Quito montrent qu'il est effectivement possible d'accéder à une caractérisation pertinente de l'hydrodynamique locale en fonction des types de sols et de leur occupation, et que les indicateurs retenus peuvent être, directement ou partiellement, reliés aux paramètres des modèles appliqués à l'échelle du bassin. Dans le cas de fonctionnement de type aires contributives, la simulation de pluie est évidemment insuffisante, mais fournit néanmoins des informations exploitables au niveau des conductivités verticales et latérales, sous l'hypothèse d'un milieu isotrope. En complément, il a été montré que les fluctuations du débit de base étaient bien corrélées aux coefficients de ruissellement événementiels (Perrin et al., accepté), et pouvaient bien traduire les variations de superficie des zones saturées. Les travaux en cours portent sur le test de Topmodel et des indicateurs associés.

En ce qui concerne le transfert superficiel, les données expérimentales font actuellement l'objet d'une comparaison entre modèles conceptuel, de type « lag and route » (Bouvier et al., 1994) et mécaniste (onde cinématique), appliqués à une structure discrétisée en mailles carrées régulières. L'application correcte de ces modèles, dont les performances sont équivalentes en calage, nécessite d'adopter des valeurs très faibles pour les coefficients de rugosité sur les mailles versants. De façon plus générale, l'application de ces modèles au versant se heurte à la méconnaissance d'indicateurs géométriques et hydrauliques pertinents, vers lequel notre recherche s'oriente désormais.

Enfin, sur le plan logiciel, un effort particulier a été réalisé pour développer la plate-forme de modélisation ATHYS (Bouvier et al., 1996), qui réunit le traitement des données hydro-pluviométriques et géographiques et différents modèles hydrologiques spatialisés dans un environnement convivial et homogène.

Glissements de terrain et coulées boueuses : La pluviométrie, les caractéristiques mécanique des sols et leur organisation géologique ont été pris en compte dans un modèle de calcul de facteurs de sécurité (Risser, 2000). Les volumes en mouvement sont de l'ordre de quelques centaines à quelques milliers de m^3, et relativisent fortement les estimations antérieures. Les zones de risques majeurs sont constituées par les petites *quebradas,* dont les fortes pentes débouchent directement en ville : dans ces zones, quelques dizaines de mètres cubes initialement mis en mouvement peuvent acquérir une vitesse et une compétence importantes, comme en témoigne l'accident de la quebrada La Comuna (Perrin et al., accepté). L'observation et l'analyse de cet exemple, en association avec la Division « érosion torrentielle » du CEMAGREF, a permis de mettre en évidence la nature granulaire des laves torrentielles, dont la loi de comportement reste relativement méconnue. Dans ce contexte, Quito pourrait être considéré comme un site intéressant d'études.

Inondations urbaines : Les premiers essais de modélisation des champs d'inondations ont permis de déterminer les flux transitant par les voiries et les principaux axes drainants en situation inondante (Bouvier et al., 1996). On a ensuite cherché à caractériser l'envahissement des zones bâties en situation inondante (Fig.3a). Un indicateur géométrique de porosité "verticale" des façades bordant les voiries, l'Histoseuil (Ls), a été défini à l'échelle du bloc de concessions et relié à une typologie de l'habitat (Hingray et al., 2000a). Combiné avec un indice d'occupation des sols (Sp), cet indicateur est également pertinent pour calculer la vulnérabilité hydraulique d'un îlot d'habitations (Fig.3b), en termes de hauteur et de durée de submersion (Hingray et al., 2000a).

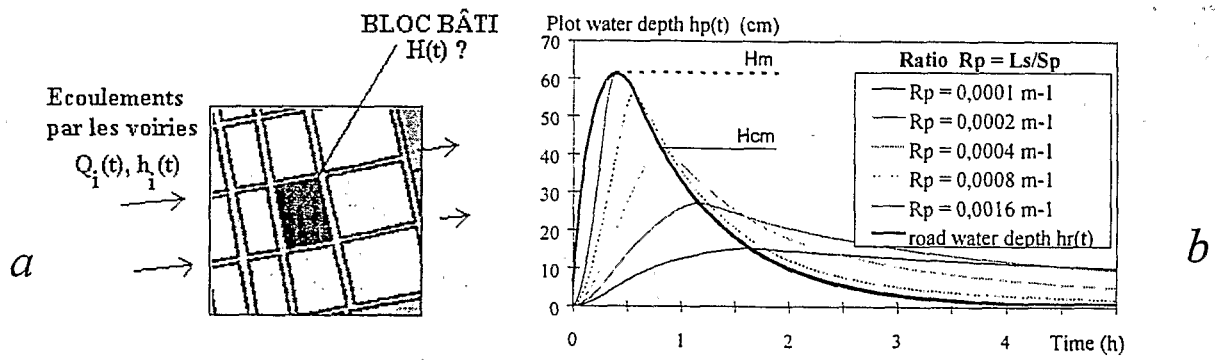

Figure 3 : Schématisation des échanges hydrauliques entre voiries et bâti

IV CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les travaux réalisés dans le cadre du programme RUES depuis 1995 ont été soutenus par le PNRN, puis par le PNRH, que nous remercions chaleureusement ici. Ils contribuent à une meilleure connaissance des mécanismes hydro-pluviométriques en milieu tropical volcanique, jusque là peu explorés à l'échelle du petit bassin versant. Ils intéressent certains milieux urbanisés insulaires, ainsi que de nombreuses grandes villes d'Amérique Latine, situées au pied de versants à fortes pentes souvent envahis par l'urbanisation, de la cordillière andine jusqu'à la Sierra Madre mexicaine.

L'évaluation des crues extrêmes est notamment améliorée à plusieurs niveaux : prise en compte de la variabilité spatiale des pluies, caractérisation de l'aptitude au ruissellement des sols volcaniques, proposition de concepts et d'indicateurs de production et de transfert. L'abondance des données permet de contrôler les hypothèses formulées, pour les sites montagneux (Quito, Mexico, Tahiti) et ouest-africains (Ouagadougou, Niamey). Certains éléments qualitatifs, en particulier sur la nature des glissements de terrain et des coulées boueuses, doivent permettre d'orienter les recherches à venir. Enfin, un effort particulier a été apporté au développement logiciel d'une plate-forme de modélisation spatialisée, ATHYS.

Plusieurs aspects doivent maintenant être approfondis, ou appellent de nouveaux développements qui seront traités dans le cadre de l'UMR Hydrosciences à Montpellier, que l'équipe RUES vient d'intégrer :

- on proposera des modèles Intensités-Durée-Fréquence-Superficie pour Mexico et Quito ; on étudiera la pertinence de ces modèles pour le calcul des crues extrêmes, en comparant sur différentes superficies, les crues calculées à l'aide d'une pluie moyenne et des pluies observées réellement distribuées dans l'espace ;

- on approfondira l'analyse des indicateurs de production et de transfert. On cherchera à interpréter les résultats de simulation de pluie en fonction des caractéristiques des sols (minéralogie, texture, structure, micro-topographie...). On étudiera les caractéristiques du transfert sur de petites superficies (de 1 à 1000 m^2), et on essaiera de proposer une interprétation géomorphologique (basée sur la pente et la superficie drainée par exemple) des caractéristiques géométriques et hydrauliques (notamment largeur et rugosité) du transfert sur versant ;

- on cherchera à intégrer les échanges voirie-bâti dans une modélisation conceptuelle des inondations, et on étudiera la représentation des défluences (aux carrefours, dans les zones d'épandage) par un modèle de drainage multidirectionnel.

V REFERENCES

BOUVIER C., FUENTES MARILES G., DOMINGUEZ MORA R., 1994. "MERCEDES, un modèle hydrologique d'analyse et de prévision de crues en milieu hétérogène". 4p., 23è Journées de l'Hydraulique - Congrès de la SHF, Nîmes (France), Septembre 1994, pp.257-260.

BOUVIER CH., DELCLAUX F., CRESPY A., 1996. ATHYS : Atelier Hydrologique Spatialisé. In. "L'Hydrologie tropicale : géoscience et outil pour le développement" *Publication AISH n°238*, pp.425-435.

BOUVIER J.C., AYABACA E ., PERRIN J.L., CRUZ F., FOURCADE B., ROSARIO S., CARRERA L., 1999. Variabilités temporelle et spatiale des averses en milieu andin : exemple de la ville de Quito (Equateur). *Revue de Géographie Alpine* 1999 n°3.

CANTENS T., 1995. Génération de champs de pluie dans la zone métropolitaine de Quito (Equateur). *Mémoire ISIM 3è année, Université Montpellier 2*

CISNEROS L., 1997. Etude descriptive de la répartition spatio-temporelle des pluies journalières à Mexico. *DEA Sciences de l'Eau dans l'Environnement Continental, Université Montpellier 2.* 54 p.

CISNEROS L., BOUVIER J.C., DOMINGUEZ R., 1998. Application du krigeage à la construction des champs d'averses à Mexico. *18è Congrès Latino-Américain d'Hydraulique, Oaxaca (Mexique)*, 12-16 oct 1998.

HINGRAY B., 1999. Comportement et modélisation hydraulique des zones bâties en situation d'inondation : le cas des zones cloisonnées d'habitat individuel de Ouagadougou. *Thèse de doctorat, Université Montpellier 2*, Mémoires Géosciences Montpellier n°13, ISTEEM, 316p. et annexes.

HINGRAY B., BOUVIER B., DESBORDES M. ET CAPPELAERE B, 1999. Urban flooding : hydraulic behaviour and modelling of built-up areas. *8th International Conference on Urban Storm Drainage*, Sidney (Australie), vol. 3, 1457-1465.

HINGRAY B., CAPPELAERE B., BOUVIER J.C., DESBORDES M., accepté, Hydraulic vulnerability of an elementary urban cell. *Journal of Hydrological Engeenering.*

HINGRAY B., BOUVIER J.C., CAPPELAERE B., DESBORDES M., accepté. Inondations urbaines dans les PED : un indicateur géométrique caractéristique du comportement hydrodynamique du bâti. *Revue des Sciences de l'Eau.*

JANEAU J.L., 1999. Simulation de pluie sur les versants du volcan Pichincha. *Rapport IRD*, 212 pages.

PERRIN J.L., FOURCADE B., POULENARD J., RICHARD D., SIERRA A. , accepté. Quito face à un risque d'origine naturelle - Les laves torrentielles. *Revue de Géographie Alpine.*

PERRIN J.L., BOUVIER CH, JANEAU J.L., 1999. Mécanismes de production des crues sur un petit bassin montagneux périurbain, Quito (Equateur). *Colloque « Crues : de la normale à l'extrême »*, SHF, mars 99., 9 p.

PERRIN J.L., BOUVIER J.C., JANEAU J.L., MENEZ G., CRUZ F., accepté. Rainfall-runoff processes in a small catchment in Andes mountains - The Rumihurcu Quebrada, Quito (Ecuador). *Hydrological Processes.*

RISSER V., 2000. Mouvements de terrain sur les versants orientaux du volcan Pichincha. *Rapport IRD*, 87 pages et annexes.

WOTLING G., 2000. Caractérisation et modélisation de l'aléa hydrologique à Tahiti. *Thèse de l'Université Montpellier 2*, éditions de l'ISTEEM, 310 p. et annexes

WOTLING G., BOUVIER CH., DANLOUX J., FRITSCH J.M. , accepté. «Regionalization of extreme precipitation distribution using the principal components of the topographic environment». *Journal of Hydrology.*

INSU

BRGM CEMAGREF CIRAD CNES CNRS/SPI

INRA IRD LCPC METEO FRANCE

Colloque PNRH 2000

PROGRAMME NATIONAL DE RECHERCHE EN HYDROLOGIE

Centre International de Conférences/METEO-FRANCE
42, avenue Coriolis – 31 057 Toulouse Cedex

16-17 Mai 2000