

## Inondations urbaines en Amérique Latine: réflexions sur le rôle des facteurs de risque

**JUAN CARLOS BERTONI**

*Faculté des Sciences Exactes, Physiques et Naturelles, Universidad Nacional de Córdoba,  
Box 15, Pabellón Ingeniería, Ciudad Universitaria, (5000) Córdoba, Argentina*  
[jcbertoni@arnet.com.ar](mailto:jcbertoni@arnet.com.ar); [jcbertoni@isrh.uncor.edu.ar](mailto:jcbertoni@isrh.uncor.edu.ar)

**Résumé** On note en Amérique Latine une croissance continue des centres urbains et de l'occurrence d'inondations urbaines. Les conditions socio-économiques de la région ne permettent pas de résoudre facilement ce problème. Les scénarios d'évolution climatiques envisagés pourraient d'ailleurs aggraver le problème des inondations urbaines. Le présent article commence par rappeler quelques faits relatifs au processus d'urbanisation et aux inondations urbaines résultant de fortes précipitations. Deux cas de graves inondations survenues en Argentine (2003) et au Salvador (2005) seront également présentés. Nous identifierons les principaux facteurs affectant le risque hydrologique à travers l'aggravation de l'aléa et l'accroissement de la vulnérabilité. En raison du sentiment que l'évolution climatique serait une cause primordiale de l'accroissement du risque d'inondation urbaine, cet article souligne la nécessité pour la communauté scientifique et technique latino-américaine de bien reconnaître tout les facteurs caractérisant la vulnérabilité de ses espaces urbains.

**Mots clefs** inondations urbaines; changement global de climat; facteurs de risque; Amérique Latine

### **Urban floods in Latin America: reflections on the role of risk factors**

**Abstract** Latin America is characterized by the growth of its permanent urban centres and the occurrence of urban floods. The socio-economic problems of the region do not contribute to a simple solution for this situation. The new world climate scenario is another input that will aggravate the urban flooding problems. This paper initially reviews information relevant to the urbanization processes and urban floods associated with the occurrence of severe storms. Two severe floods that occurred in Argentina (2003) and El Salvador (2005) are presented. The principle factors that affect the hydrological risk are identified as the increase of the threat and of the vulnerability. A common perception is that climatic change is a primary factor in the increase of the urban flood risk, but this paper underlines the necessity for the scientific and technical community of Latin America to take a balanced view of all the factors that define the vulnerability of its urban spaces.

**Keywords** urban floods; global climate change; risk factors; Latin America

## **INTRODUCTION**

Selon les Nations Unies (cité par GTZ, 2003), une catastrophe est “*l'interruption de la capacité de fonctionnement d'une société, occasionnant des pertes de vies humaines, de biens naturels et de biens matériels, et qui dépasse la capacité de la société affectée*”

à récupérer par ses propres moyens”. A partir de cette définition un phénomène naturel extrême n’est pas catastrophique s’il n’a pas d’effets dramatiques pour les habitants. En conséquence, il n’y a catastrophe naturelle que si les habitants, ou une société entière, souffrent de dégâts et de pertes d’une sévérité telle qu’ils ont besoin d’une aide extérieure pour récupérer. Les inondations représentent la principale cause de catastrophe naturelle dans le monde. Tout au long des dernières années l’Amérique Latine a enregistré des inondations catastrophiques dans ses zones urbaines qui rassemblent, dans cette région un important pourcentage de la population. Le risque d’inondation des zones urbaines résulte de la conjugaison d’une menace (l’aléa) et de la vulnérabilité propre de la ville. Ce travail présente une analyse des facteurs de risque d’inondation des villes d’Amérique latine, avec une réflexion sur le rôle assigné à ceux que l’on considère comme les plus importants. L’urbanisation étant l’une des manifestations les plus significatives de l’activité humaine, nous présenterons tout d’abord ses principales caractéristiques au niveau mondial et les différences existant entre pays développés et non développés. Nous analyserons aussi les caractéristiques de ce phénomène en Amérique Latine. Nous reviendrons ensuite sur quelques informations relatives aux catastrophes naturelles et, en particulier, aux inondations au niveau mondial et en Amérique Latine. Deux cas représentatifs de la situation actuelle en ce qui concerne les inondations urbaines catastrophiques dans la région seront présentés: (a) l’inondation de la ville de Santa Fe en Argentine (avril-mai 2003), et (b) l’inondation de la zone métropolitaine de San Salvador (AMSS) au Salvador (octobre 2005). D’autres cas relatifs à des villes d’Amérique du Sud ont été présentés par Tucci & Bertoni (2003). Les informations réunies dans cet ouvrage permettent d’identifier les facteurs sociaux, techniques et de gestion communs à toute la région latino-américaine, où le cadre socio-économique ne permet pas d’apporter une solution simple aux problèmes. Un chapitre fondamental de cet ouvrage montre le processus d’augmentation de la vulnérabilité des villes aux inondations; il est bien connu qu’il existe une étroite relation entre le risque catastrophe et le niveau de développement d’un pays.

Le nouveau scénario mondial du changement climatique introduit un autre facteur supplémentaire au risque d’inondation des villes par l’augmentation potentielle de la menace. Le travail inclut l’analyse de la littérature consacrée à ces facteurs, en identifiant les différences entre l’Amérique Latine et les pays développés. Enfin nous présenterons les sujets qui devraient être approfondis pour améliorer la solution des problèmes.

## **LE PROCESSUS D’URBANISATION**

### **Dans le contexte mondial**

L’urbanisation est un phénomène universel et récent dans l’histoire de la planète. Son caractère explosif et les problèmes qui en découlent dans les grands conglomérats urbains constituent un des problèmes majeurs de notre temps. Pour une compréhension complète de ses implications il faut revenir sur les caractéristiques observées aux différents niveaux.

En 1800, seulement 1% de la population mondiale était concentrée dans les villes. Résultat de la révolution industrielle, c'est à partir de la seconde moitié du XVIIIe siècle que l'urbanisation a augmenté de par le monde selon un rythme accéléré. Ce qui s'est passé au XXe siècle le montre bien: au cours de la première moitié du siècle passé la population totale mondiale a augmenté de 49% tandis que la population urbaine augmentait de 240% (Guglielmo, 1996).

Le Tableau 1 illustre l'augmentation annuelle de la population urbaine mondiale pendant la période 1955–2015. À l'heure actuelle la population totale mondiale est à peu près de 6480 millions d'habitants (US Census Bureau, 2005) et la population urbaine atteint 3150 millions, c'est à dire 48% de la population totale. Dans quelques années, et pour la première fois dans l'histoire de la planète, la population urbaine du monde sera égale à la population rurale.

D'après Guglielmo (1996), en 1950 seuls huit conglomérats urbains atteignaient ou dépassaient les cinq millions d'habitants (New York, London, La Ruhr, Shanghai, Paris, Buenos Aires et Moscou); et rassemblaient presque 7% de la population urbaine mondiale. Selon les Nations Unies (2003), au début du XXIe siècle 4% de la population mondiale était concentrée dans les 16 plus grosses métropoles (population supérieure à 10 millions d'habitants) du monde.

**Tableau 1** Augmentation annuelle de la population urbaine mondiale (période 1955–2015).

An	1955	1975	1995	2015
%	32	38	45	54

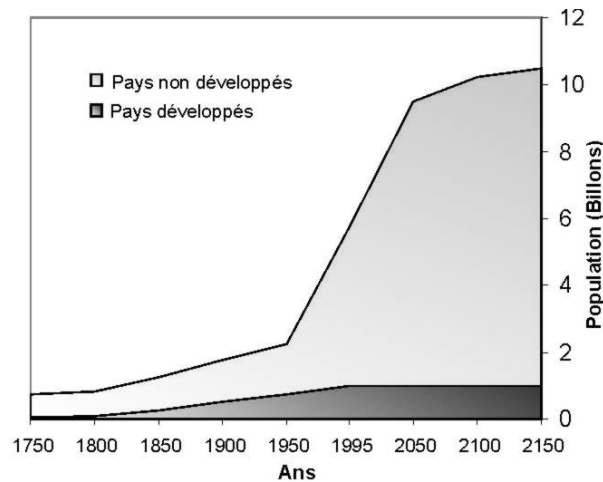
(Source: Fund of the UN to Population Attendance, 2000, cité par Tucci, 2005).

### Dans le contexte des pays développés et des pays non développés

Le processus urbain présente quelques différences entre les pays développés, localisés principalement dans l'hémisphère nord, et les pays non développés et émergents, plutôt localisés dans l'hémisphère sud. Tout au long de l'époque pré-industrielle les grandes métropoles de l'Amérique Latine ont fortement augmenté, résultat du vaste commerce colonial. Par contre, à l'époque de l'industrialisation le processus de concentration urbaine a enregistré une augmentation supérieure dans les pays développés.

En effet, dans la deuxième moitié du XIXe siècle ou, dans quelques cas, dans la première moitié du XXe siècle, les métropoles des pays industrialisés ont enregistré une accélération de leur croissance en raison de l'industrialisation. Au contraire, le développement industriel dans les pays les moins développés a été plus fort tout au long de la deuxième moitié du XXe siècle. Ainsi, en 1950 six des huit plus grosses villes dans le monde appartenaient à des pays développés. D'après Guglielmo (1996) des 37 villes du monde de plus de cinq millions d'habitants en 1990, 12 seulement appartenaient à des pays industrialisés de l'hémisphère nord.

Pelletier & Delfante (2000) soulignent aussi ces différences indiquant que les villes du tiers monde ont enregistré, à partir de la moitié du XXe siècle, une croissance explosive. Tout au long de cette période le taux annuel de croissance a été supérieur à 3% pour la plupart des métropoles du tiers monde. La Fig. 1 illustre ces tendances au niveau mondial.



**Fig. 1** Evolution de l'urbanisation dans les pays développés et non développés (Source: Tucci, 2005).

### Dans le contexte de l'Amérique Latine

La tendance générale à l'urbanisation du monde non développé est particulièrement illustrée en Amérique Latine. En effet, dès 1950, quatre des plus grosses villes du monde sont situées en Amérique Latine (México DF, São Paulo, Buenos Aires et Rio de Janeiro) alors que, en particulier au cours des dernières décennies, la concentration de la population dans les villes principales (Tableau 2) y a été plus importante que parmi les villes semblables dans le reste du monde. Le Tableau 3 montre les

**Tableau 2** Distribution de la population urbaine dans le monde.

Continent	Amérique du Sud	Amérique du Nord	Océanie	Europe	Amérique Centrale	Afrique	Asie	Monde
%	77	76	75	74	53	35	35	47

(Source: Fund of the UN to Population Attendance, 2000, cité par Tucci, 2005).

**Tableau 3** Indices démographiques globaux et urbains de l'Amérique et de l'Europe.

Continent	Pays	Superficie (km <sup>2</sup> )	Population (hab. × 10 <sup>6</sup> )	Densité de population (hab. km <sup>-2</sup> )	Taux de croissance annuelle	Population urbaine (%)
Amérique	Argentine	2 791 810	35.4	12.67	1.79	90
	Venezuela	912 050	21.2	23.24	1.87	87
	Chili	756 950	13.9	18.36	1.2	86
	Brésil	8 457 000	159.2	18.83	2.29	79
	Etats Unis	9 159 000	262.8	28.70	1.21	76
	Mexique	1 958 200	88.543	45.22	1.90	75
	Colombie	1 138 910	36.33	31.90	1.66	74
Europe	France	550	58.0	105.54	0.26	75
	Royaume Uni	242	58.5	242.0	0.33	89
	Allemagne	349	81.7	234.0	0.72	87

différences des évolutions de l'urbanisation enregistrées pour quelques pays développés et pour l'Amérique Centrale. Actuellement, l'Amérique Latine compte 497 millions d'habitants, avec une concentration de 60% de la population sur 20% du territoire. Dans le monde sur un total de 388 villes dont la population est supérieure à 1 million d'habitants, 44 sont dans cette région (Nations Unies, cité par Tucci, 2005).

## **LES CATASTROPHES NATURELLES ET LES INONDATIONS**

### **Les catastrophes naturelles dans le monde**

Les organismes internationaux indiquent que, chaque année, les catastrophes naturelles affectent 220 millions d'habitants à travers le monde et aussi que le nombre de catastrophes associées à l'eau a augmenté au cours des dernières années: 90% des catastrophes naturelles qui ont eu lieu au cours de la décennie 1990 étaient liées à l'eau. Tout au long du XXe siècle 3.2 millions de personnes ont perdu la vie dans des inondations. Pour la période 1991–2000 les inondations ont affecté 1500 millions de personnes et on déplore actuellement 20 000 morts par an dans le monde.

Certains phénomènes naturels, comme les éruptions volcaniques, les tremblements de terre, les tempêtes ou les tsunamis, ne peuvent pas être influencés par l'homme. Sa vulnérabilité face à ces phénomènes dépend de son environnement de vie et du manque de mesures de prévention susceptibles de le protéger de leurs conséquences.

Il existe au contraire d'autres menaces, et en particulier les inondations, les glissements de terrain et les incendies de forêts, que l'action de l'homme peut engendrer ou accroître.

Les régions de la planète présentent différents niveaux de vulnérabilité aux catastrophes naturelles, l'Amérique Centrale étant par exemple très vulnérable à ces événements. Il y a aussi des différences dans les impacts de ces phénomènes: ils sont plus graves dans les pays pauvres que dans les pays riches. Selon Münchner Rück (2002) on a dénombré en 2001 près de 20 000 morts dans les pays pauvres contre 160 dans les pays très développés. Les dégâts, bien qu'inférieurs en chiffres absolus, affectent beaucoup plus les biens économiques des pays non développés. En conséquence, le rétablissement de ces pays est plus difficile et plus douloureux.

### **Les inondations dans le monde**

La Commission Économique et Sociale des Nations Unies a reconnu trois causes principales en ce qui concerne les inondations:

- (a) le processus de déforestation des bassins versants,
- (b) les changements d'usage du sol, et
- (c) l'expansion des régions urbaines.

Avant d'aller plus loin, il faut distinguer entre deux concepts voisins mais différents: celui de crue et celui d'inondation, qui sont parfois malheureusement confondus. La crue d'un cours d'eau est la réponse naturelle d'un bassin versant à une

précipitation sur sa zone d'alimentation. Elle entraîne une variation des débits et des niveaux de la surface de l'eau au cours du temps. L'inondation par contre est une submersion temporaire, par de l'eau provenant du débordement d'un cours de l'eau ou de quelque autre source, affectant partiellement ou totalement un espace généralement sec. Par conséquent toutes les crues, naturelles ou artificielles, ne provoquent pas nécessairement des inondations. L'inondation affecte l'environnement résultant de l'utilisation du terrain par l'homme.

Dans les zones urbaines il existe deux types d'inondations:

- (a) celles résultant de la croissance urbaine, et
- (b) celles correspondant aux secteurs riverains, souvent confondues par le public.

Les premières sont provoquées par l'augmentation permanente et sans aucun contrôle des surfaces imperméables et des réseaux d'assainissement urbain. Ces deux facteurs produisent une augmentation du volume ruisselé et des débits de pointe ainsi que l'accélération des flux par rapport aux conditions existant avant l'urbanisation. Ces inondations peuvent être régulières ou occasionnelles. Elles dérivent, généralement, de la conception *hygiéniciste* (Desbordes, 1987) de l'assainissement urbain.

Les inondations des secteurs riverains sont liées à l'urbanisation inadéquate des secteurs voisins des cours de l'eau, ce qui signifie qu'ils résultent de l'utilisation du lit majeur (ou des terrasses), des cours de l'eau par l'homme. Quand ce type d'inondation est associé à des événements sévères, les résultats sont fréquemment catastrophiques.

Au niveau mondial on a pu en voir différents exemples ces dernières années. En Asie les inondations de 1998 de secteurs riverains au Bangladesh, en Chine, en Inde et au Vietnam ont totalisé 7000 morts. Au Japon la plus grosse précipitation enregistrée depuis 1981 a touché 45 000 habitants. Les violentes averses qui ont touché le Sud Est asiatique tout au long de l'année 2000, ont affecté 490 000 personnes dans le delta du Mékong (Cambodge et Vietnam) et 90 000 au Laos.

Le continent européen a aussi connu de sévères inondations des secteurs riverains des villes. En 2002 les dégâts dans la République Tchèque ont atteint 3000 millions d'euros, 35 millions en Slovaquie, 15 millions en Allemagne et 2 millions en Autriche. Une situation semblable, bien que moins critique, a été enregistrée en 2005 en Romaine, en Autriche, en Bulgarie et en Suisse. Dans ce cas le bilan a été de 40 morts. Les informations indiquent qu'en France il existe 8000 centres urbains susceptibles de voir leurs secteurs riverains inondés. Ces secteurs sont peuplés de 4.5 millions d'habitants (MEDD-DPFR-SDPRM, 2004).

Dans le contexte Amérique Latine et Caraïbe, les inondations causées par des phénomènes météorologiques sévères sont aussi très importantes. Dans cette région, entre 1960 et 1989, les inondations associées à des ouragans ont provoqué 28 000 victimes et des dégâts de US\$ $16 \times 10^9$ . Au Nicaragua les inondations de l'année 1990 ont affecté 100 000 personnes. L'ouragan Mitch (1998), un des plus sévères dans l'histoire récente de l'Amérique Centrale, a touché la majorité des pays de la région, provoquant des inondations généralisées des régions rurales et également des centres urbains. Plus récemment, la succession des tempêtes tropicales de l'année 2005 a produit des inondations et des glissements de terrains catastrophiques pour les zones urbaines de la région. Comme on le montrera plus bas, le secteur métropolitain de San Salvador (AMSS), au Salvador, a été un des lieux les plus touchés par la tempête "*Stan*".

En Amérique du Sud les fortes inondations des secteurs riverains des villes sont aussi fréquentes. Le phénomène *El Niño* a engendré (1982–1983) des inondations généralisées en Équateur, au Pérou, dans l'est de la Bolivie et du Paraguay, au sud du Brésil et dans la région mésopotamienne (Centre Est) de l'Argentine. Ce dernier pays est au 14<sup>ème</sup> rang dans le monde pour les inondations, avec des dégâts atteignant 1.1% du PIB.

La croissance démographique et le processus d'urbanisation dans les pays non développés et émergents conduisent à une augmentation de la densité des installations humaines. Avec pour conséquences, la surexploitation des ressources naturelles et l'occupation de zones particulièrement vulnérables (secteurs riverains, pentes, etc.).

## **ETUDE DE CAS 1 : L'INONDATION CATASTROPHIQUE DE LA VILLE DE SANTA FE, ARGENTINE (2003)**

### **Introduction**

En Argentine la fréquence des inondations avec toutes leurs conséquences est grande; les statistiques indiquent, en moyenne, un événement important tous les dix ans. La Banque Mondiale (2000, cité par Bertoni, 2004) a classé les inondations en Argentine selon quatre types de base selon les régions géographiques:

- (a) en vallée des grands fleuves et rivières,
- (b) dans les piedmonts de la Cordillère des Andes,
- (c) en villes et zones rurales associées aux averses très fortes (*flash flood*), et
- (d) en zones plates, associées à une gestion inappropriée des ressources naturelles, particulièrement du sol et de la végétation.

Les inondations du premier type sont importantes par leur durée et par leur emprise. Elles sont normalement associées aux grands fleuves du bassin versant du Plata (le 5<sup>ème</sup> du monde). Cette importante région produit plus du 76% du PIB du pays et accueille 70% de sa population.

### **Déroulement de la catastrophe**

La portion inférieure du bassin versant de la rivière Salado (55 950 km<sup>2</sup>) se trouve intégralement dans l'état de Santa Fe, région centrale de l'Argentine. La région est très plate, avec un important secteur agissant comme un grand stockage (les *Bajos Submeridionales*). Les limites des sous bassins versants sont parfois mal définies; et ils subissent de constantes modifications dues aux actions de l'homme, particulièrement à travers les réseaux routiers et hydrauliques (Ferreira, 2005). Le climat de la région présente une transition entre le sub-humide oriental et semi-aride occidental, avec un gradient de précipitation annuelle allant de 800 à 1100 mm (période 1941–1970). Au cours des trois dernières décennies (1971–2000) les précipitations moyennes ont augmenté de 900 mm à 1200 mm (Paoli, 2004). L'activité dans le bassin versant est typiquement rurale: agriculture (soja/blé), industrie du lait et élevage.

Il existe plusieurs centres urbains dans le bassin versant. La ville de Santa Fe (400 000 habitants), capitale de l'état de Santa Fe, est la plus importante. Elle est localisée sur l'embouchure de la rivière Salado dans le système du fleuve Paraná (Fig. 2(a)).

Les 500 000 habitants se trouvent dans sa région d'influence directe. Au moment où l'inondation s'est produite le taux chômage dans la région était de 23.5% et 53% des foyers se trouvaient en situation de pauvreté.

L'inondation d'Avril–Mai 2003 a été produite à l'origine par une succession des pluies tombées essentiellement entre le 22 et le 24 d'avril. L'anomalie positive de précipitation tout au long d'avril 2003 a été de 200 mm. En raison des importantes précipitations de l'été 2002–2003, en avril les sols du bassin versant se trouvaient proche de la saturation. En conséquence, une partie importante de la pluie a été transformée en ruissellement superficiel. La Fig. 3 montre les hydrogrammes correspondants à trois crues de la rivière Salado. On observe que les pentes des courbes de crue et de récession étaient plus importantes que pour d'autres crues historiques. Une étude fondée sur une analyse statistique des informations (laisses de crue) historiques et systématiques disponibles (Bertoni *et al.*, non publié), a montré que le temps de retour du débit de pointe de cette crue était de 800 ans.

La perception historique de l'inondation des secteurs riverains de la ville est associée au comportement du fleuve Paraná. Le gouvernement de l'état de Santa Fe a donc construit, tout au long des années 90 et grâce à des crédits internationaux d'un montant de US\$25 × 10<sup>6</sup>, un système de protection constitué de digues et de terrassements destinés à protéger la ville et ses banlieues. Ce système a permis dans une certaine mesure de s'affranchir des crues du fleuve Paraná.

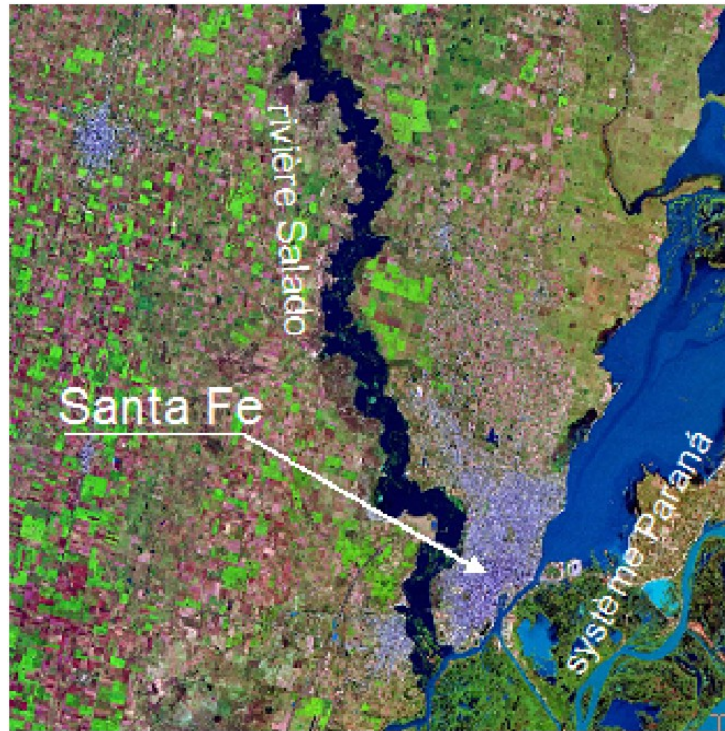
Pour la rive orientale de la rivière Salado le système de protection par terre-plein avait quelques caractéristiques particulières. Il s'agissait d'un ouvrage routier et hydraulique. En effet, il a été conçu en trois parties comme protection du boulevard périphérique occidental de la ville, construit au cours de la période 1995–1997. Néanmoins, seules les deux parties de ce système routier-hydraulique les plus proches de l'embouchure de la rivière (secteur sud) ont été réalisées (Fig. 2(b)). En conséquence, au moment de la crue de 2003, il existait une section non protégée (brèche d'à peu près 500 m) à partir de l'extrême nord du système de défense. Le projet original du système considérait qu'il était nécessaire de mettre en place dans le secteur de la brèche un terre-plein provisoire d'urgence (sacs de sable) pendant les crues de la rivière Salado.

Un exemple d'intervention humaine inadaptée est donné par la construction à l'aval de la rivière Salado, en 1971, d'un pont (autoroute AP01) dont la capacité d'évacuation était insuffisante. Le lit majeur de la rivière (totalement utilisé tout au long des crues) a une largeur de 2500 m. La version originale du pont, avec une ouverture de 155 m, a été détruite par la crue de 1973. Deux ans plus tard une deuxième version de ce pont, avec la même ouverture libre, a été réalisée. L'unique amélioration technique permettant d'augmenter la sécurité du pont a été l'exécution de piliers plus profonds.

Pour mieux comprendre la situation il faut citer trois éléments supplémentaires:

- (a) la brèche du système de protection occidental de la ville a été localisée approximativement à 900 m en amont du pont de l'autoroute AP01;
- (b) comme la conception de ce système a obéi d'abord à des préoccupations routières



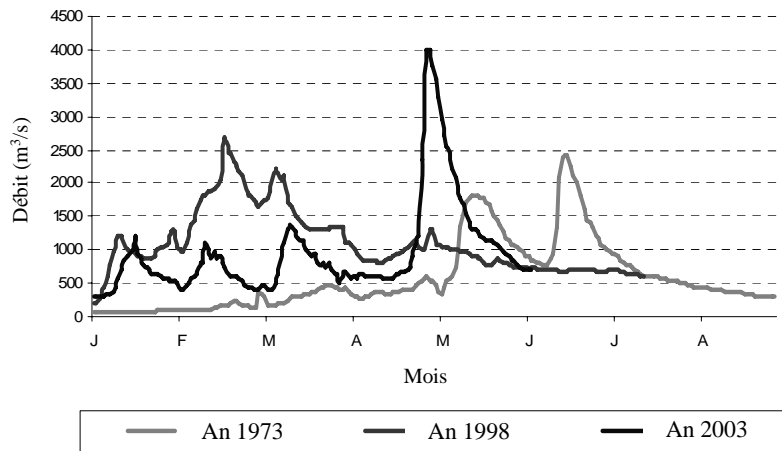


(a)



(b)

**Fig. 2** (a) Ville de Santa Fe à l'embouchure de la rivière Salado dans le système du fleuve Paraná. (b) Secteur inondé en avril-mai 2003.



**Fig. 3** Hydrogrammes correspondants à trois crues de la rivière Salado (Source: Paoli, 2004).

(sans intervention de l'organisme public compétent en matière d'eau), l'extrémité finale du terre-plein (bord de la brèche) ne présentait pas les caractéristiques nécessaires pour supporter le contact avec le courant;

- (c) les conditions topographiques existantes aux alentours de l'extrémité du système ont favorisé la concentration du courant vers la brèche et, à partir de là, vers la ville.

Finalement, il faut souligner une caractéristique commune aux ouvrages de protection contre les inondations basés sur les terre-pleins et les digues latérales: ils offrent une fausse sensation de sécurité.

Tout au long des journées des 25 et 26 avril 2003 la montée du niveau de l'eau de la rivière Salado avait été inquiétante. Pendant l'après midi du dimanche 27 avril l'eau est entrée initialement par la brèche comme un petit écoulement très concentré. Bien que certaines autorités aient détecté le problème, on a plutôt assisté à une certaine inaction des gouvernements municipaux et départementaux dans les banlieues de la ville. Il est intéressant de noter que cette journée était celle à des élections départementales et nationales.

Le lundi 28 le flux a augmenté considérablement et les autorités ont tenté, sans succès, de fermer partiellement la brèche, ce qui a causé l'inondation de quelques quartiers. Dans la matinée du 29 avril, alors que le débit augmentait constamment, l'extrémité nord du terre-plein a cédé.

Le débit incontrôlé vers la ville a atteint  $700 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ; le niveau des eaux dans quelques secteurs urbains atteignant jusqu'à 3.5 m. Cette situation a perduré pendant 24 à 26 h (Fig. 4). Le système de protection par terre-pleins a empêché la sortie de l'eau du secteur urbain, causant l'inondation de la troisième partie de la ville. L'absence de plan d'intervention municipale et d'autres déficiences du projet de protection ont rendu plus difficile l'ouverture de brèches pour la sortie de l'eau stockée. Ces brèches, localisées sur le secteur sud-ouest du système de protection, n'ont été réalisées que seulement un jour et demi après l'arrivée des eaux.

Le bilan a été très lourd: 23 morts pendant l'inondation, 43 dans les jours suivants, 35% de la ville inondés, 27 500 maisons affectées, 135 000 personnes évacuées. Le



**Fig. 4** Inondation dans les quartiers ouest de la ville de Santa Fe, Argentine (Source: Paoli, 2004).

nouvel hôpital des enfants, qui avait été construit quatre ans plutôt, dans l'un des secteurs les plus bas de la ville, (un investissement de  $US\$11 \times 10^6$  financé par la Banque Mondiale), a été très affecté, surtout pour les services d'imagerie. Un des problèmes pendant la période d'urgence a été celui du contrôle des maladies véhiculées par l'eau polluée stagnante dans la ville. CEPAL (2003) a rapporté 162 cas d'hépatite et 111 cas de leptospiroses. De façon globale, plus de 200 000 personnes ont été directement ou indirectement affectées. Les dégâts totaux attribués à l'inondation (secteurs rural et urbain), ont été estimés à  $US\$1000 \times 10^6$  (CEPAL, 2003).

Cette inondation a constitué la plus grave catastrophe environnementale de l'histoire récente de l'Argentine. Un report technique sollicité par le gouvernement a assigné au changement climatique global un rôle prépondérant dans la génération de cette inondation. L'hypothèse a été confortée par l'augmentation de la précipitation annuelle dans la région.

Pourtant une analyse détaillée du phénomène indique que, malgré les conditions climatiques qui ont prévalu dans la région pendant l'été 2002–2003, l'inondation à Santa Fe a été en fait aggravée par:

- (a) *des causes structurelles*: l'inexistence d'une vision de gestion intégrée au niveau du bassin versant; l'occupation des zones très vulnérables à l'inondation par l'urbanisation; les déficiences des aménagements de protection de la ville; la présence du pont de l'autoroute AP01; les actions anthropiques dans le bassin versant (qui ont augmenté et accéléré le débit de pointe de la crue) et les problèmes découlant de la multitude de juridictions concernées (municipale, départementale, nationale);
- (b) *des causes non structurelles*: l'absence d'un système de prévision hydrologique; des déficiences de gestion pendant l'urgence à cause du manque de plan d'intervention.

Les inondations de ce type sont peu fréquentes au niveau mondial, mais les événements survenus aux Etats Unis à la Nouvelle-Orléans en août 2005 présentent certaines analogies avec ceux de Santa Fe.

## ETUDE DE CAS 2: INONDATIONS DE LA ZONE METROPOLITAINE DE SAN SALVADOR, SALVADOR

### Introduction

De la population du Salvador, 55.4% vivent dans des centres urbains. La zone métropolitaine de San Salvador (AMSS) a deux millions de habitants; 10% de sa population vivent dans des conditions d'extrême pauvreté; localisés principalement dans des secteurs à haut risque (zones inondables, pentes sujettes à des glissements de terrain, etc.). Des habitations, 75% sont desservis par le système d'assainissement, mais seulement 8% des flux collectés subissent un traitement (Fig. 5).

L'AMSS se situe sur deux bassins versants: Acelhuate et Ilopango. La plus grande partie de l'AMSS est localisée sur le premier de ces bassins, dont la rivière reçoit un débit de  $5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  provenant des égouts (sans traitement). La pollution de l'eau est un problème permanent. En effet, dans la région de l'AMSS l'approvisionnement de l'eau est insuffisant pour la demande des nouveaux secteurs urbanisés et il est nécessaire de trouver des nouvelles ressources en eau en quantité et en qualité suffisantes. Pendant longtemps les solutions pour l'assainissement pluvial urbain ont été fondées sur une conception *hygiéniste*. Parallèlement, la région a subi une croissance incontrôlée de ses surfaces imperméabilisées.

### Inondations associée à la tempête tropicale *Stan*

Pendant les premiers jours d'octobre 2005 la tempête tropicale *Stan* a affecté plusieurs pays d'Amérique Centrale, et nous examinerons quelques aspects de la situation au Salvador.

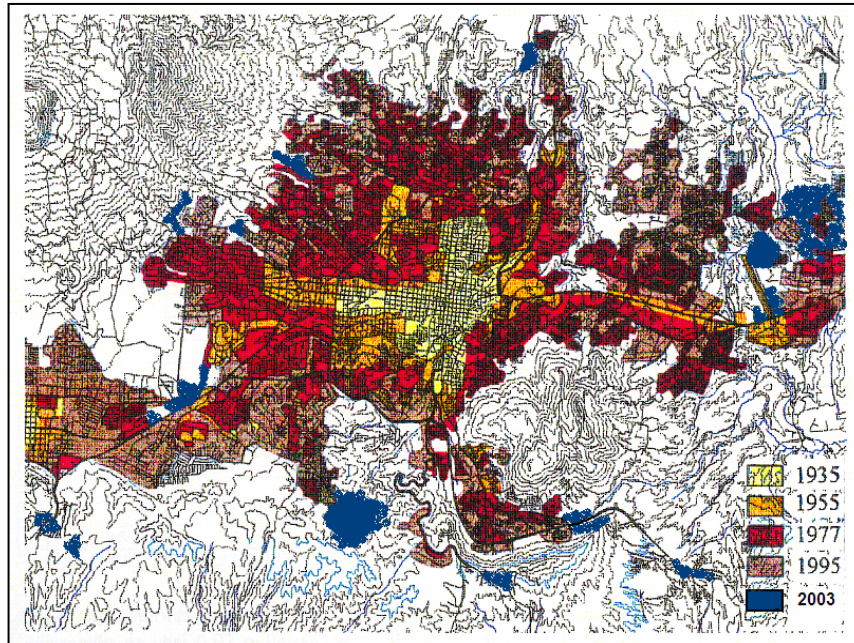
A partir du 28 septembre 2005 les précipitations sur le Salvador ont commencé à saturer les sols. Le 1 octobre 2005 une zone de basses pressions (1008 millibars) dans la région côtière pacifique du Salvador a favorisé le déplacement d'humidité vers le territoire national. La Zone de Convergence Intertropicale a provoqué depuis le matin de ce jour des pluies et des averses sur tout le territoire du Salvador, principalement dans la frange centrale.

Pendant toute une semaine la tempête *Stan* a produit d'importantes précipitations; pour l'AMSS la lame de pluie en six jours a été supérieure à 500 mm (Fig. 6) alors que selon SNET (2005) la précipitation moyenne correspondant au mois d'octobre est de 205 mm. La succession des inondations et des glissements de terrain qui se sont produits dans les 14 municipalités qui composent l'AMSS ont provoqué la mort de 65 personnes et un grand nombre de sinistrés. La Fig. 7 illustre le phénomène dans le secteur urbain.

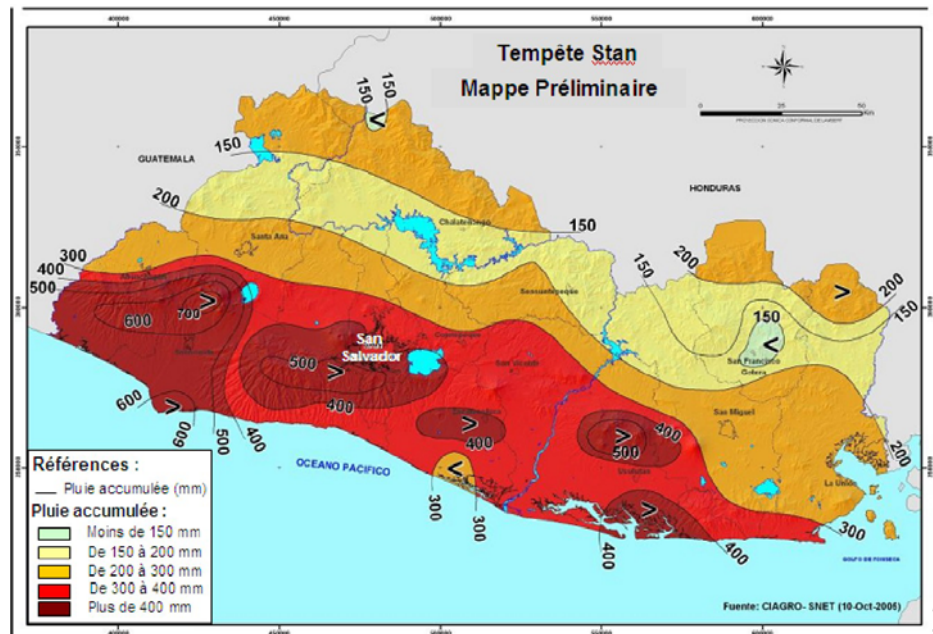
Certaines sources d'information ont attribué presque exclusivement cette situation au changement climatique planétaire. Bien que les conditions météorologiques dans la région aient été particulièrement sévères, les causes réelles de beaucoup des problèmes observés doivent être associées à un ensemble des facteurs sociaux, techniques et de gestion.

En effet, comme cela a été souligné par Cruz & de Salguero (2004), le réseau de drainage des eaux de pluie de l'AMSS souffre d'une série de problèmes. Parmi ceux-ci





**Fig. 5** Évolution de la zone métropolitaine de San Salvador (AMSS) de 1935 à 2003 (Source: OPAMSS, 2005).



**Fig. 6** Distribution de la pluie pendant la tempête *Stan* sur le Salvador (Source: SNET, [www.snet.gob.sv](http://www.snet.gob.sv)).

il faut citer l'absence d'une institution légalement responsable de la planification, de l'entretien et du nettoyage, raison pour laquelle le réseau se trouve actuellement très détérioré, et fonctionne dans de mauvaises conditions. Le Ministère des Travaux Publics a été un temps responsable de l'entretien partiel du système, en tant que partie du réseau relatif à la voie publique, mais, en 2000 il a initié un processus visant à libérer de cette responsabilité.



**Fig. 7** Inondation à San Salvador (rivière La Lechuza) pendant la tempête *Stan*. (Source: OPAMSS, 2005).

Le système souterrain de l'AMSS se compose presque en totalité de collecteurs en béton de section circulaire. Entre autres problèmes identifiés dans le réseau de drainage il faut citer (Cruz & de Salguero, 2004) de graves déficiences structurales, un manque de capacité hydraulique, des mélanges d'eaux usées et d'eaux industrielles, une conception déficiente, avec des rétrécissements de diamètre et des puits bouchés par le revêtement des chaussées.

Parmi les facteurs contribuant à la détérioration structurale du système nous citerons:

- (a) les mouvements sismiques fréquents dans le pays,
- (b) l'installation inadéquate du système, sans supervision et sans normes, et
- (c) le manque d'entretien.

Un autre facteur important à mentionner est le fait qu'il existe deux saisons bien marquées: une saison pluvieuse et une saison sèche. Cette dernière a une durée moyenne de cinq à six mois pendant laquelle s'accumulent les ordures, les résidus et toutes sortes de rebuts. A l'arrivée des pluies ces déchets sont entraînés et s'introduisent dans les collecteurs pluviaux.

Tout cela est le résultat, d'une part d'un manque de planification propre du système et du manque de réglementation dans la conception et la construction et d'autre part des très grosses déficiences de la planification de la croissance urbaine.

## **LES FACTEURS DE VULNERABILITE DES VILLES DE L'AMERIQUE LATINE A DES INONDATIONS**

Dans la section précédente deux cas d'inondations urbaines associées à des averses ont été présentés. Tucci & Bertoni (2003) ont présenté quelques autres cas significatifs dans les pays d'Amérique du Sud. En général, les facteurs géomorphologiques, topographiques, pédologiques et climatiques sont assez différentes. Cependant, les

résultats sont toujours presque similaires et il existe à l'évidence des facteurs communs dans tous les cas. Parmi les caractéristiques qui causent une importante vulnérabilité des villes de la région aux inondations urbaines il faut indiquer:

### **Facteurs Sociaux**

- Forte concentration de population sur des espaces réduits. Elle provoque des conditions environnementales inadéquates pour les services, la santé, la qualité de vie, etc.
- Installation des habitants selon une urbanisation spontanée, non contrôlée (initialement supposée temporaire ou sauvage), dans la périphérie des villes et dans les endroits hautement vulnérables aux inondations. La plupart du temps les habitants ont des revenus très bas, sans alternative immédiate de relogement.
- Développement permanent des quartiers de la périphérie des villes, phénomène catalysé par: (a) l'importante croissance démographique de sa population, et (b) l'exode des régions rurales. L'augmentation de la croissance démographique naturelle de la population des villes des pays de l'Amérique Latine est liée à une réduction de la mortalité et à un très faible ralentissement de la natalité. Un des résultats est la jeunesse caractéristique des villes de la région. L'exode rural est lié aux problèmes des économies régionales, une situation qui découle parfois des subventions agricoles des pays développés. Les problèmes de sécurité, de délinquance et de trafic de drogues dans les secteurs marginaux des villes, empêchent aussi le travail cohérent des bureaux municipaux.
- Caractéristiques culturelles de la population, et des autorités municipales et nationales, en privilégiant des mesures médiatiques par rapport à un ensemble de mesures organisées selon un Plan Directeur d'Assainissement Urbain (PDAU).

### **Facteurs techniques et de gestion**

- Absence d'une politique nationale et départementale d'urbanisation et d'une vision intégrée de la gestion de l'espace urbain.
- Absence (ou difficulté) d'une politique municipale orientée vers l'organisation de l'urbanisation selon une planification rationnelle de l'usage du sol urbain (PDAU). Particulièrement, absence de restrictions municipales à l'occupation des zones particulièrement vulnérables au risque d'inondation. ASCE (1992) et Tucci (1994) ont énuméré divers principes pour la formulation d'un PDAU.
- Succession d'années relativement sèches, provoquant "l'oubli" des acteurs immobiliers, des autorités et du public en général.
- Manque de formation des professionnels (urbanistes, architectes, ingénieurs, etc.) latino-américains, situation qui découle de l'utilisation excessive, exclusive et permanente de l'ancienne conception *hygiéniste* liée à l'assainissement urbain (reproduction de ce processus pendant quelques décennies).
- Tendances à la solution des problèmes de l'assainissement urbain et des inondations exclusivement par des ouvrages (solutions *structurelles*) au détriment

des mesures *non structurelles* (plan d'alerte hydrologique, réglementation municipale, etc.).

- Manque de plans d'intervention (et/ou de leur application effective).
- En ce qui concerne l'Amérique Centrale il faut souligner que l'origine volcanique de la grande majorité des sols de la région devrait stimuler l'utilisation de dispositifs d'infiltration contrôlée dans les régions urbaines. Néanmoins, ce type de mesure est: (a) encore très peu utilisé, (b) parfois utilisé sans aucun contrôle de la qualité de l'écoulement urbain infiltré.

En résumé, la tendance générale en Amérique Latine a été (et continue d'être) orientée vers la concentration des activités socio-économiques et administratives dans un petit nombre de villes dans chaque pays. Cette tendance s'est développée dans le contexte d'un faible taux de croissance économique et d'inégalité dans la distribution des revenus qui a conduit à un processus d'urbanisation de la pauvreté.

Comme le soulignent bien Lavell & Cardona (2000), toutes les causes énumérées ci-dessus ne doivent pas être regardées isolément parce que elles sont interconnectées et révèlent la relation étroite existant entre le risque de catastrophe et le niveau de développement d'un pays.

### **Facteur climatique: Le changement climatique**

Le IPCC (2001) a étudié quelques phénomènes climatiques extrêmes et de changement climatiques dans le monde et, particulièrement, dans les régions tropicales, subtropicales et tempérées, où se trouve la plus grande partie des pays d'Amérique Latine

Pour mieux analyser la relation entre le changement climatique et la modification de la vulnérabilité des villes, il faut considérer les deux types d'inondations urbaines déjà citées. Ils sont associés à des échelles différentes des processus hydrologiques. Normalement les inondations provoquées par le processus d'urbanisation traditionnel sont associées à de petits bassins versants urbains. Par contre, les inondations des secteurs riverains sont plus volontiers liées à des grands bassins versants ruraux.

Dans le premier cas la variable climatique la plus sensible pour les processus hydrologiques urbains est l'intensité de la pluie sur de courtes durées. Dans le second cas, les modifications potentielles du volume précipité pendant une durée plus longue (jours, semaines, années) ainsi que les modifications d'autres variables climatiques (température, évapotranspiration, etc.) deviennent plus importantes.

Les éventuelles modifications de l'intensité de la pluie pourraient avoir une conséquence sur la prévision du temps (jusqu'à deux semaines au maximum, selon les considérations de Collier & Krzyzstofowicz (2000) et Golding (2000), tandis que l'altération des lames d'eau précipitée pourraient avoir une influence sur la prévision du climat (quelques mois).

Les gouvernements et les spécialistes des pays latino-américains devraient considérer ces situations pour mieux prévoir les changements potentiels (positifs ou négatifs) de la vulnérabilité des villes. Une augmentation de la lame annuelle précipitée pourrait signifier, par exemple, une meilleure situation pour un grand nombre des villes argentines puisqu'avec 66% de son territoire aride ou semi-aride l'Argentine est le pays d'Amérique Latine le plus affecté par l'hétérogénéité de ses disponibilités en



eau superficielle. Par contre, cette augmentation pourrait conduire à une situation plus délicate en ce qui concerne les inondations dans la région mésopotamienne de l'Argentine, qui concentre le 85% des disponibilités hydriques annuelles du pays.

Même si ce type de considérations a une base rationnelle, du point de vue scientifique il est difficile, comme le souligne Arnell (1996), d'attribuer les catastrophes actuelles liées aux inondations urbaines aux changements climatiques globaux.

## **ROLES ASSIGNES A LA VULNERABILITE ET AU CHANGEMENT CLIMATIQUE: REFLEXIONS SUR LE CAS DE L'AMERIQUE LATINE**

Selon les définitions classiques, le risque de catastrophe naturelle dépend de deux facteurs: l'aléa et la vulnérabilité. L'augmentation du risque dépend, par conséquent, de l'augmentation d'un de ces facteurs, ou des deux.

Au cours des dernières années les mass media ont souvent évoqué une aggravation de l'aléa qui trouverait son origine dans le changement climatique, et c'est très fréquemment ce dernier qui est identifié comme responsable des graves problèmes d'inondations qu'affrontent les villes. Cette vision partielle du problème n'aide pas à trouver une solution adéquate à la gestion des risques.

Rosengaus (2005) indique que, bien que la communauté scientifique mondiale et le GIEC/IPCC produisent habituellement des déclarations "équilibrées", quand ces déclarations sont traitées et simplifiées par les mass media elles deviennent alarmistes, très peu équilibrées et ne reflètent plus le contexte d'incertitude qui leur est associé. L'auteur indique qu'il en résulte l'affirmation particulièrement alarmante selon laquelle tous les événements extrêmes seront plus extrêmes et plus fréquente. Naturellement, le public et les autorités chargées de la gestion du risque au niveau urbain et national, ont une perception qui vient des media et l'évocation de l'augmentation des vulnérabilités urbaines comme résultat de l'interaction des facteurs sociaux, techniques et de gestion indiqués dans la première partie de ce travail n'est pas courante.

L'importance donnée aux conséquences du changement climatique planétaire ne contribue peut-être pas à obtenir une vision complète des problèmes associés à la vulnérabilité des villes aux inondations urbaines. La perception de la population sur le changement climatique est utilisée en Amérique Latine pour atténuer les responsabilités des gouvernements ou des organismes spécifiquement responsables de la gestion du risque. En effet, comme la vulnérabilité est un élément très sensible au contexte local alors que le changement climatique se manifeste au niveau global, l'analyse de la vulnérabilité est complexe tandis que l'explication par le changement climatique est plus attrayante d'autant qu'elle ne désigne pas de responsabilités immédiates et directes.

Comme le souligne Rosengaus (2005), il n'existe pas d'augmentation sensible de la vulnérabilité dans le monde développé. Pour cette raison—à laquelle s'en ajoutent d'autres propres au monde non développé, comme le manque d'esprit critique de ses media, les erreurs d'analyse de sa communauté scientifique et la nécessité bien connue pour cette dernière de publier des "*papers*" dans les journaux scientifiques internationaux—on observe une surexposition du problème du changement climatique global au détriment de l'analyse de vulnérabilité.

## CONCLUSIONS

A l'heure actuelle la perception populaire est que les activités de l'homme ont affecté la majorité des écosystèmes de la terre. Les conséquences des ouragans Mitch, Katrina et Stan, et de différentes précipitations intenses dans les pays d'Amérique Latine en sont des exemples. En général ces phénomènes naturels inattendus ont de sérieuses conséquences sur des centaines, ou même des milliers de personnes. Dans beaucoup de cas ces conséquences sont associées aux inondations urbaines.

L'Amérique Latine est une des régions du monde avec la plus grande concentration de population dans les villes et il s'agit là d'un processus en augmentation constante, se déroulant dans un contexte socio-économique complexe que aboutit, parmi d'autres aspects, à l'urbanisation de la pauvreté.

En Amérique Latine le processus d'urbanisation a conduit à l'utilisation excessive des ressources naturelles, à la pollution incontrôlée et à l'occupation de secteurs vulnérables. Dans la majorité des analyses techniques réalisées sur les centres urbains, le concept de bassin versant comme unité logique pour la gestion des ressources naturelles est encore négligé. Par conséquent, l'occupation de zones naturellement inondables, l'augmentation non contrôlée des surfaces imperméables et le manque d'espace pour la gestion efficace des eaux d'origine pluviale créent des situations difficiles pour la résolution du drainage urbain. Dans ce contexte les gouvernements et les organismes de la majorité des pays de l'Amérique Latine ne possèdent pas les ressources humaines et économiques, ni le cadre légal, requis pour réduire le risque de catastrophe à travers une prévention et une protection efficace. La communauté technique présente également des déficiences quant à sa formation, et reste marquée par une forte tendance à l'application systématique et permanente du vieux concept *hygiéniste*.

Au cours des dernières années on a pu noter une tendance visant à attribuer de façon prépondérante l'augmentation du risque d'inondation au changement climatique global. Il est connu que les inondations urbaines associées aux événements climatiques extrêmes provoquent de véritables catastrophes. Néanmoins et selon la littérature, il est difficile, d'un point de vue scientifique, d'attribuer ces catastrophes au seul réchauffement de la planète. En effet, l'utilisation inadéquate de l'espace urbain, le manque de plans directeurs de gestion de l'eau particulièrement dédiés au système de drainage urbain, et le manque de plan d'intervention, comptent parmi les causes les plus importantes de l'augmentation de la vulnérabilité des villes d'Amérique Latine. Dans ce contexte le changement climatique mondial agit, peut-être, mais seulement comme un adjuvant. Il apparaît surtout nécessaire de susciter un changement de mentalité à tous les niveaux et dans tous les milieux (politiques, gestionnaires, techniciens et public en général) concernant les causes des inondations urbaines et les solutions possibles à travers la planification et l'adoption de mesures de contrôle de l'assainissement urbain. Il est également nécessaire de souligner la nécessité pour la communauté scientifique d'Amérique Latine de traiter avec objectivité et circonspection tant le changement climatique que l'accroissement de la vulnérabilité des espaces urbains.

**Remerciements** à Hocine Bendjoudi et Pierre Hubert pour la relecture du texte.

## REFERENCES

- Arnell, N. (1996) *Global Warming, Rivers Flood and Water Resources*. Wiley, Chichester, UK.
- ASCE (American Society of Civil Engineers) (1992) *Design and Construction of Urban Stormwater Management Systems*. ASCE Manuals and Report of Engineering Practice no. 77, WEF Manual of Practice FD-20. USA.
- Bertoni, J. C. (2004) *Inundaciones Urbanas en Argentina*. Ed. Universitas. GWP-SAMTAC. CPCNA. SecyT/UNC, ARG-CapNet. Argentine.
- CEPAL (2003) Evaluación del Impacto de las Inundaciones y del Desbordamiento del Río Salado en la Provincia de Santa Fe, República Argentina, 2003. Naciones Unidas, Comisión Económica Para América Latina y El Caribe, CEPAL – LC/BUE/R.246. 20 de junio de 2003.
- Collier, C. G. & Krzysztofowicz, R. (2000) Quantitative precipitation forecasting. *J. Hydrol.* **239**, 1–2.
- Cruz, C. & de Salguero, L. (2004) Criterios para el Drenaje de Aguas Lluvias. Segundo Curso Riesgos Urbanos: Drenajes de Aguas Lluvias e Inundaciones. Universidad Centro Americana (UCA), San Salvador.
- Desbordes, M. (1987) Contribution à l'analyse et à la modélisation des mécanismes hydrologiques en milieu urbain. Thèse, Académie de Montpellier. Université des Sciences et Techniques du Languedoc, France.
- Ferreira, G. (2005) Descripción de la Crecida del Río Salado e inundación de Santa Fe en 2003. XX Congreso Nacional del Agua, Mendoza, Argentina. Proceedings on CD.
- Golding, B. W. (2000) Quantitative precipitation forecasting in the UK. *J. Hydrol.* **239**, 286–305.
- Guglielmo, R. (1996) Les grandes métropoles du Monde et leur crise. A. Colin, Paris, France.
- GTZ (Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit, GTZ, GMBH) (2003) Gestión Local de Riesgo. Experiencias de América Latina. División 4200. Gobernabilidad y Democracia.
- IPCC (2001) Resumen para Responsables de Políticas. Evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (IPCC). XVIII Wembley.
- Lavell, A. & Cardona, O. D. (2000) Considerations on the Economic, Social, Political and Institutional Context and Challenges for Integrated Risk and Disaster Management in Latin America (unpublished).
- MEDD-DPFR-SDPRM (2004) Web page information: [http://www.prim.net/citoyen/definition\\_risque\\_majeur/dossier\\_risque\\_inondation/pageintroduction.htm](http://www.prim.net/citoyen/definition_risque_majeur/dossier_risque_inondation/pageintroduction.htm)
- Münchener Rück (2002) *Topics. Jahresrückblick Naturkatastrophen 2001*. München, Germany.
- OPAMSS (2005) Informaciones relativas a la tormenta tropical Stan. Unidad Ambiental. San Salvador (unpublished).
- Paoli, C. U. (2004) Inundaciones Ribereñas en el Tramo del Paraná Medio. In: *Inundaciones Urbanas en Argentina* (ed. by J. C. Bertoni). Ed. Universitas. GWP-SAMTAC. CPCNA. SecyT/UNC, ARG-CapNet. Argentine.
- Pelletier, J. & Delfante, Ch. (2000) *Villes et Urbanisme dans le Monde*, 4th edn. A. Colin, Paris, France.
- Rosengaus, M. (2005) Vulnerabilidad vs Cambio Climático Global. Cuál Enfatizar en el Manejo de Riesgos? Unidad del Servicio Meteorológico Nacional. Taller Regional Ibero Americano IMTA, CNA MMA España, RLOC y CDGIA. México DF.
- Tucci, C. E. M. (1994) Enchentes urbanas no Brasil. *Revista da Associação Brasileira de Recursos Hídricos* **12**(1), 117–136.
- Tucci, C. E. M. & Bertoni, J. C. (eds) (2003) *Inundações Urbanas na América do Sul*. ABRH-GWP-SAMTAC, Brasil.
- Tucci, C. E. M. (2005) *Inundações Urbanas*. Curso para Tomadores de Decisão (material en préparation).
- US Census Bureau (2005) Web page: <http://geography.about.com/gi/dynamic/offsite.htm?site=http://www.census.gov>

