

Urbanisation et inondation

phénomènes de ruissellement, causes naturelles et facteurs d'aggravation

par Bernard CHOCAT

En France, le risque naturel majeur est celui d'inondation. Cette vérité est souvent méconnue, et pourtant plus de deux millions de citoyens sont directement exposés sur le seul territoire métropolitain ! L'inondation, définie comme la submersion de surfaces normalement hors d'eau, peut avoir des origines diverses. Nous ne nous intéresserons ici qu'aux inondations dites par ruissellement. Ce type d'événements est caractérisé par des précipitations intenses, localisées sur des surfaces faibles et provoquant, là où elles se produisent, des écoulements importants dans le réseau hydrographique naturel (permanent ou non permanent) et dans le réseau hydrographique artificiel (réseau d'assainissement pluvial). C'est, de façon typique, le cas des inondations de Nîmes le 3 octobre 1988.

PARTICULARITÉS DES INONDATIONS PAR RUISSÈLEMENT

La première particularité de ce type d'événement est la rapidité de son évolution. Il s'écoule rarement plus de quelques heures entre le début de la pluie et la fin de l'inondation. Cette brusquerie rend très difficile la mise en oeuvre de systèmes d'alerte permettant d'avertir, de protéger, et a fortiori d'évacuer, des populations.

La deuxième particularité est la difficulté, pour les personnes concernées, de percevoir clairement les zones exposées. Lorsqu'une crue vient perturber le fonctionnement "normal" d'une rivière permanente, celle-ci sort de son lit, ou, plus exactement, vient occuper son lit majeur, zone naturelle d'expansion de la crue. Les terrains menacés sont généralement faciles à repérer, d'autant que l'histoire a souvent gardé le souvenir de crues antérieures. Lorsqu'une pluie intense provoque localement un ruissellement important, les lignes préférentielles d'écoulement de la crue sont multiples et utilisent souvent des parcours difficiles à prévoir. Ce problème est encore accentué en zone urbaine où l'eau s'écoule normalement dans un réseau d'assainissement souterrain, donc invisible, et où le tracé des voiries modifie les lignes d'écoulement de l'eau et canalise les débits.

La troisième particularité des inondations par ruissellement est leur caractère essentiellement urbain. Même si certaines zones rurales peuvent être exposées à ce type de risques, c'est surtout dans les villes que les dommages peuvent devenir considérables. L'aménagement urbain (et les activités qui s'y rattachent) aggrave en effet fortement les risques d'inondation et surtout les dommages induits lorsque l'événement se produit. C'est ce que nous allons expliciter dans le paragraphe suivant.

PRINCIPALES CAUSES D'AGGRAVATION EN MILIEU URBAIN

En nous inspirant très largement d'un texte de Michel Desbordes (Desbordes, 1989), nous distinguerons trois causes principales

qui contribuent à accroître les risques d'inondation par ruissellement en zone urbaine : l'augmentation des volumes ruisselés et la diminution des temps d'écoulement dus à l'urbanisation proprement dite et à l'aménagement des espaces péri-urbains ; la construction d'obstacles à l'écoulement canalisant les débits ou s'opposant à leur passage et enfin, les facteurs aggravants liés aux modes de vie urbains.

L'urbanisation et l'aménagement de l'espace péri-urbain

L'urbanisation est un phénomène assez récent en France, qui a débuté à la fin du 19ème siècle, et s'est accéléré fortement à partir des années cinquante.

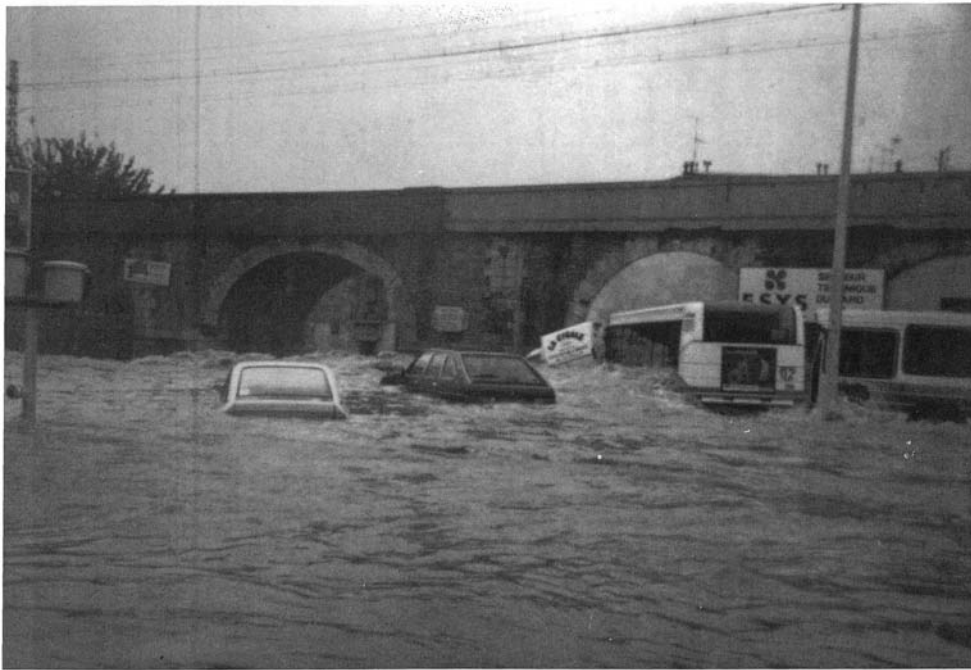
La première conséquence majeure de l'urbanisation, en ce qui concerne le cycle de l'eau, est l'imperméabilisation des sols. La couverture par de l'asphalte, du béton, ou d'autres matériaux, d'étendues considérables (surtout depuis les années soixante-dix) entraîne une augmentation des volumes ruisselés, l'eau ne pouvant plus s'infiltrer dans le sol. Cet élément a souvent été mis en avant pour expliquer les inondations urbaines. Cependant, si l'accroissement du ruissellement est très sensible pour les événements pluvieux fréquents, voire pour les événements correspondant aux périodes de retour prises en compte dans le calcul des systèmes d'assainissement pluviaux (de l'ordre de dix ans), il n'est pas toujours déterminant pour les événements exceptionnels (période de retour supérieure à cinquante ans). En effet, le taux d'infiltration de la plupart des sols, en l'absence de couvert forestier dense, est très inférieur aux intensités pluvieuses que l'on peut rencontrer lors d'événements exceptionnels. Ainsi, dans ce type de situation, les terrains non revêtus donnent souvent lieu à des volumes ruisselés spécifiques (volume produit par unité de surface) qui tendent vers ceux des sols imperméables. A titre d'exemple, lors de la crue de l'Yzeron, dans la région lyonnaise, au printemps 1989, le coefficient volumique de ruissellement de la partie rurale du bassin versant a été estimé à 50 %, celui de la partie urbaine à 60 %.

La deuxième conséquence directe de l'urbanisation ou de l'aménagement des espaces péri-urbains, bien que moins évidente, est sans doute beaucoup plus déterminante. Elle consiste en un accroissement très fort des vitesses d'écoulement superficiel, entraînant, même à coefficient de ruissellement constant, une augmentation considérable des débits de pointe. Cet accroissement des vitesses d'écoulement est dû, dans les zones urbaines, au remplacement d'un réseau hydrographique naturel, parfois non permanent, utilisant des cheminements sinueux, très encombrés et peu pentus par un réseau d'assainissement souvent surdimensionné dans ses parties amont, au tracé direct pour en limiter la longueur, et doté d'une pente confortable pour éviter son ensablement. Il est également dû, en particulier dans les zones péri-urbaines, au drainage des sols et au "recalibrage" des ruisseaux et des fossés. Le recalibrage, présenté comme un moyen de lutter contre les inondations, a souvent eu comme origine l'urbanisation du lit majeur du ruisseau, zone naturelle d'expansion de la crue et donc régulateur du débit pour l'aval.

Sous l'effet conjugué de toutes ces actions, certains bassins versants ont vu leur temps de réponse divisé par un facteur de l'ordre de cinq à quinze (Desbordes, 1989). La diminution du temps de réponse a deux conséquences. En premier lieu, pour une même pluie et un même volume ruisselé, elle augmente considérablement le débit de pointe. En second lieu, elle rend le bassin versant sensible à des événements pluvieux de durées plus courtes, donc plus intenses et produisant des débits spécifiques plus importants. Au total, la réduction du temps de réponse peut conduire à une multiplication du débit de pointe spécifique par un facteur allant de cinq à cinquante (Desbordes, 1989).

Construction d'obstacles à l'écoulement

L'urbanisation, y compris dans les zones péri-urbaines, s'accompagne toujours de la mise en place d'un réseau de routes et de rues, parfois, pour les plus importantes



La voie et les arches SNCF (un premier verrou avant le périphérique et l'autoroute).
Photo : Ph. Saurel. Doc. Ville de Nîmes.

(autoroutes, rocadés, périphériques...), en surélévation par rapport aux terrains naturels qui les bordent, ou au contraire en tranchée. Ces voies de circulation superposent au relief naturel un "relief" artificiel qui, en particulier dans les zones peu pentues, peut modifier considérablement l'écoulement des eaux superficielles. Lorsqu'elles sont perpendiculaires à la ligne de pente, et donc aux lignes d'écoulement naturelles de l'eau, elles constituent de véritables digues "forçant l'écoulement des eaux accumulées vers des passages obligés, généralement placés sur des cheminements naturels significativement apparents (lits de ruisseaux, talwegs importants, ...)" (Desbordes, 1989). Elles peuvent même, dans certains cas et sur des secteurs à relief peu marqué, modifier de façon importante la délimitation des bassins versants. Elles jouent alors un rôle de collecteur, amplifiant, par la concentration des débits qu'elles provoquent, la gravité de l'inondation. Lorsqu'elles sont dans le sens de la pente, elles peuvent devenir de véritables canaux, souvent linéaires, parfois pentus, et toujours de faible rugosité en regard d'un bief naturel. Les écoulements peuvent alors atteindre des vitesses très grandes provoquant des effets dévastateurs, comme ce fut le cas à Nîmes.

Pour permettre à l'eau de traverser les obstacles constitués par les voies de circulation (ou plutôt pour permettre aux voies de circulation de traverser les rivières ou les talwegs !), les techniciens ont imaginé des ouvrages hydrauliques dits de franchissement (pour les rivières permanentes) ou de rétablissement (pour les talwegs à écoulements non permanents). Dans la pratique, ces ouvrages s'avèrent très souvent mal conçus, mal gérés et mal entretenus. Les défauts de conception ont des causes multiples : manque de fiabilité des données

hydrologiques (en particulier faible durée des séries d'observation en regard des périodes de retour des événements contre lesquels on veut se protéger) ; manque de fiabilité des formules et modèles hydrologiques ; difficulté de prévoir l'évolution de l'urbanisation sur le bassin versant. Cependant, trop souvent, la cause fondamentale a été (et reste encore !) le manque d'attention porté par les techniciens et par les décideurs d'ouvrages routiers aux problèmes d'hydrologie et d'hydraulique, considérés comme mineurs.

Le résultat en a été la mise en place d'ouvrages mal dimensionnés, mal implantés, s'obstruant facilement (par exemple passages à buses multiples de petit diamètre). Les conséquences de ce type d'erreurs, souvent associées à des aberrations de gestion (mise en place de grilles, dites de sécurité !) et à une absence d'entretien, peuvent être catastrophiques : création d'embâcles, rupture et effondrement de chaussées.

Facteurs aggravants

Pour l'hydrologue, l'un des aspects les plus étonnants de l'urbanisation est le fait que l'homme urbain (qu'il soit simple citoyen ou élu décideur) a pratiquement complètement oublié que l'eau pouvait être une menace. "L'enterrement des écoulements autrefois superficiels (enterrement imposé par le concept hygiéniste de l'assainissement) a entraîné la disparition d'une mémoire collective aux dangers de l'eau (Desbordes, 1989). Ainsi, l'urbanisation se développe partout, y compris dans des zones présentant des risques significatifs d'inondations, sans que la population ne se sente menacée. Les formes urbaines, les modes d'occupation de l'espace, les modes de vie sont ainsi choisis (ou imposés) sans

évaluer leurs conséquences ou leurs interactions avec l'évacuation des eaux de ruissellement.

Pour ne prendre qu'un exemple, le développement de zones d'activités en sous-sol dans des zones inondables peut être désastreux, tant sur le plan économique que sur le plan humain. Il est bon de rappeler à ce propos que lors de l'inondation de Nîmes, un grand parking souterrain a été noyé en quelques minutes. Sans la présence d'esprit et l'efficacité des personnes présentes, ce parking aurait pu devenir un piège mortel pour de nombreux automobilistes.

En conclusion de ce paragraphe, il apparaît que l'urbanisation augmente sensiblement le risque d'inondation et surtout accroît considérablement les dommages lorsque l'événement survient. Cependant, la cause première reste la pluie. Il est donc utile de consacrer un paragraphe à l'analyse de ce phénomène.

ÉVÉNEMENTS PLUVIEUX ET ÉVÉNEMENTS PLUVIEUX EXTRÊMES

Le phénomène physique

La pluie est un phénomène aléatoire et non reproductible, variable dans le temps et dans l'espace. A son origine se trouve un phénomène d'ascendance ou de soulèvement d'une masse d'air, qui a pour conséquence la condensation de la vapeur d'eau qu'elle contient, sous le double effet du refroidissement et de la détente. Sous nos latitudes, les mouvements d'ascendance sont provoqués par deux types de mécanismes :

- **la frontogenèse.** Lorsque deux masses d'air de caractéristiques différentes (humidité, pression, température) se rencontrent, la masse d'air la moins dense se trouve soulevée au-dessus de l'autre, le long d'un front qui peut se développer sur plusieurs centaines de kilomètres. Deux types principaux de fronts peuvent être distingués :

- Les fronts chauds apparaissent lorsqu'une masse d'air océanique, chaude et humide, progresse en repoussant une masse d'air froid. L'air chaud, moins dense, glisse au-dessus de l'air froid, s'élevant lentement et provoquant la condensation régulière de la vapeur d'eau qu'il contient. Les précipitations résultantes peuvent couvrir des surfaces très importantes et persister plusieurs jours. Leur intensité est généralement faible.

- Les fronts froids se produisent lorsqu'une masse d'air froid s'enfonce comme un coin sous une masse d'air plus chaude et chargée d'humidité, provoquant son élévation. Le soulèvement est alors rapide, la largeur du front est limitée à quelques kilomètres, les précipitations peuvent être soutenues et durent typiquement quelques heures.

- **La convection.** Ce phénomène a pour origine un réchauffement localisé de l'air au voisinage du sol, associé à un profil thermique instable de l'atmosphère. On observe alors des

tourbillons thermiques ascendants dont la vitesse d'élévation peut être très grande. Prennent alors naissance des cellules convectives juxtaposées et plus ou moins indépendantes les unes des autres, qui se développent sous la forme de cumulus ou de cumulo-nimbus. Les pluies associées à ce type de mouvements atmosphériques sont brèves, localisées et souvent très violentes. Elles sont généralement accompagnées d'éclairs, de coups de foudre et de vent (orages).

Isolés, ces différents types d'événements ne produisent généralement pas d'inondations importantes par ruissellement. Dans la plupart des cas, les événements pluvieux majeurs, responsables d'inondations catastrophiques, sont dus à des causes multiples. Un cas courant est par exemple celui d'un front froid très actif (ligne de grain) susceptible de générer, juste avant son arrivée, des cellules convectives qu'il pousse ensuite devant lui, en les organisant sous la forme de super-cellules orageuses.

En pratique, la complexité et l'imbrication des différents phénomènes, l'existence de conditions locales (dues en particulier au relief), la rareté des événements, la diversité de leurs évolutions rendent pratiquement impossible la construction de modèles rationnels susceptibles de représenter la naissance et l'évolution d'un événement pluvieux majeur. L'hydrologue doit donc en chercher une image très simplifiée, non explicative, mais susceptible de lui permettre de déterminer le risque d'apparition. Ce travail nécessite de disposer d'un outil d'observation qui sera ici le réseau de mesures.

LA MESURE DES PLUIES ET L'ANALYSE DES DONNÉES

Jusqu'à une date récente qui a vu l'apparition des radars météorologiques, la seule grandeur accessible à la mesure était la hauteur d'eau précipitée pendant un certain temps sur une surface déterminée. Le capteur utilisé : le pluviomètre est, dans sa version la plus simple, constitué d'un cône de réception de surface connue et d'un récipient permettant de conserver l'eau recueillie. La mesure à intervalle de temps régulier (généralement la journée) du volume d'eau contenu dans le récipient, permet par une simple division d'obtenir la hauteur d'eau précipitée, donc l'intensité moyenne sur la durée de mesure. Le premier réseau organisé de pluviomètres de ce type a été installé en France en 1856 et on en comptait environ 5 000 en service en 1985. Malheureusement, ce type d'instrument est insuffisant pour étudier les pluies susceptibles de provoquer des ruissellements importants en milieu urbain. Pour être analysés correctement, ces phénomènes nécessitent en effet des pas de temps de dépouillement beaucoup plus courts, de l'ordre de quelques minutes.

Différents mécanismes permettent de doter les pluviomètres d'un système autori-

sant la mesure en continu des intensités de pluie moyennées sur des durées courtes et certains sont connus depuis longtemps. Cependant, la plupart des appareils de ce type ont été installés à partir de 1955 et en 1985, seules deux séries complètes de trente ans et plus étaient disponibles en banque de données : Montpellier Bel-Air (1920-1971) et Paris-Montsouris (1949-1978). Même si l'on ajoute quelques autres séries de données dépouillées pour des besoins ponctuels, la quantité d'information disponible pour étudier le phénomène à une échelle de temps relativement fine reste bien maigre. C'est pourtant à partir de ces enregistrements continus que l'on peut procéder à l'analyse de la pluviométrie ponctuelle et en particulier construire les courbes intensité-durée-fréquence (I.D.F.) qui sont la base numérique de la plupart des méthodes d'estimation du risque.

L'incertitude sur les événements extrêmes

On imagine donc facilement que l'incertitude sur l'évaluation des intensités moyennes pour des durées courtes, correspondant à des événements majeurs, est considérable. A titre d'exemple, lorsque l'on essaye d'analyser la période de retour de l'événement de Nîmes, les seules données pluviométriques locales de bonne qualité sont constituées par la série d'observation de Nîmes-Courbessac (1964-1988) (Desbordes et al, 1989). Les intensités observées le 3 octobre sont très largement supérieures à toutes les autres intensités mesurées sur cette période. Il est donc nécessaire, pour évaluer la période de retour de l'événement, d'extrapoler les courbes I.D.F. du lieu. Selon la loi de probabilité utilisée pour effectuer cette extrapolation, la période de retour de l'intensité moyenne en 6 heures varie entre 125 et 650 ans (Desbordes et al, 1989). Le simple bon sens conduit alors à rechercher un autre mode d'appréhension du risque.

Comparaison de la pluviométrie locale avec d'autres données

Une méthode mise au point par E.D.F. pour le dimensionnement des barrages (méthode du GRADEX) consiste à allonger artificiellement la durée de la série d'observations, en multipliant le nombre de stations de mesure. De façon schématique, dix points de mesure totalement indépendants (c'est-à-dire suffisamment distants les uns des autres pour que les événements pluvieux les affectant soient totalement indépendants entre eux), mais situés dans une même zone climatique, génèrent en dix ans une série de mesures aussi riche qu'un poste unique en cent ans.

Même si la réalité climatique est plus complexe, il est cependant possible d'estimer la fréquence des événements extrêmes en recherchant tous les événements pluvieux ayant affecté une zone géographique donnée et en estimant la surface couverte par la

pluie. Une simple hypothèse sur l'uniformité de la distribution spatiale des précipitations permet d'en déduire le risque qu'une précipitation se produise en un point donné. Appliquée à la région Languedoc-Roussillon, cette méthode montre qu'une pluie majeure se produit en moyenne tous les 3,5 à 4 ans et que, vue la surface moyenne touchée, un tel événement affecte Nîmes environ tous les 100 à 180 ans (Desbordes et al, 1989).

Une dernière méthode possible consiste à se référer au passé. Les archives conservent toujours le souvenir des événements catastrophiques ayant marqué l'histoire d'une ville. La recherche historique des inondations dans la ville de Nîmes fait ainsi apparaître depuis le 15^{ème} siècle cinq événements dits majeurs (1399, 1403, 1557, 1868) et cinq événements considérés comme secondaires (1719, 1826, 1843, 1855 et 1914). Là encore, il apparaît que l'intervalle de temps moyen séparant deux événements est voisin de 120 ans (Desbordes et al, 1989).

L'inconvénient de cette méthode est bien évidemment qu'elle ne peut pas tenir compte des facteurs aggravants dus à l'urbanisation et décrits dans le deuxième paragraphe. Elle ne fournit donc qu'une borne inférieure à la fréquence probable des désordres. Elle devrait cependant être systématiquement utilisée dans toutes les villes, ne serait-ce que pour inciter les responsables de l'aménagement à la prudence.

CONCLUSIONS

En conclusion, dimensionner des ouvrages pour un débit correspondant à une période de retour de 10 ans n'a en pratique aucune signification réelle. Cette méthode normative devrait dans tous les cas être complétée par une analyse objective des risques d'apparition d'un événement pluvieux majeur et surtout de ses conséquences en terme d'inondation de zones sensibles. Ce n'est qu'à ce prix que des catastrophes du type de celle de Nîmes pourront être sinon totalement évitées, du moins contrôlées dans leurs conséquences.

Bernard CHOCAT
Maître de Conférence à l'INSA
Secrétaire de l'Association
Eurydice 92.

BIBLIOGRAPHIE

- Michel Desbordes, "Principales causes d'aggravation des dommages d'inondations par ruissellement superficiel en milieu urbanisé". *Bulletin Hydrologie Urbaine de la S.H.F.*, n° 4, pp. 2 à 10.
- M. Desbordes, P. Durepaire, J.C.L. Gilly, J.M. Masson, Y. Maurin, "3 octobre 1988, inondations sur Nîmes et sa région. Manifestation, causes et conséquences". Edition C. Lacour, Nîmes, 1989.
- S.T.U. "Mémento sur l'évacuation des eaux pluviales urbaines". Documentation française, 1989.