



#### **Résumé:**

La plupart des villes sont confrontées à une extension urbaine rapide de leur périphérie. Les zones nouvelles sont souvent situées en amont topographique de l'urbanisation antérieure. Une des conséquences fréquente qui accompagne ce développement est l'accroissement du régime des crues et du risque d'inondation des secteurs urbains denses à l'aval. Ceci en l'absence de toute mesure d'adaptation ou de compensation, difficile à mettre en place et souvent en déphasage avec le développement périurbain. Une méthodologie d'étude est donc proposée afin de cerner les conséquences sur le régime des crues d'un développement urbain non maîtrisé.

## ■ Cadre Général

La concentration de population dans les zones urbaines est une tendance mondiale qui devrait s'accroître jusqu'à la fin du siècle (rapport des Nations Unies, UN 2003). En France, le dernier recensement fait état d'une forte extension des villes avec 76 % de la population classée urbaine et occupant 18 % du territoire. On constate l'absorption des zones rurales limitrophes des grandes villes par ce développement périurbain qui se traduit par une modification rapide de l'occupation des sols en périphérie des zones urbaines. Ce développement se propage dans la majeure partie des cas depuis un aval souvent plat, où les centres urbains historiques ont été créés, vers un amont topographique aux pentes plus prononcées. La modification des conditions de ruissellement par temps de pluie due à l'imperméabilisation et les modes de gestion par évacuation rapide des eaux pluviales ont des conséquences directes sur les écoulements superficiels (thalwegs, ru et cours d'eau périphériques) et dans les réseaux d'assainissement unitaires des centres urbains. Ces situations peuvent être la cause d'une augmentation des risques d'inondation car le développement urbain génère à la fois sa vulnérabilité par l'occupation de zones d'écoulement ou de stockage des crues et augmente la fréquence et l'intensité des événements.

Le risque d'inondation existe dès lors que la fréquence des inondations d'un lieu est supérieure à ce qui est compatible avec l'activité de ce lieu (Méthode Inondabilité, 1998). Le milieu urbain présente une grande vulnérabilité du fait de la densité de son habitat et de la concentration de ses activités. Ainsi, les zones urbaines situées en bordure des cours d'eau sont exposées à l'aléa des inondations. Cet aléa peut avoir une origine naturelle mais le développement périurbain peut contribuer à l'augmenter. Il n'est cependant pas aisé d'en évaluer la contribution car pour les crues importantes, par effet de saturation, les sols ruraux ont un comportement identique à celui des sols imperméables urbains. C'est sur les crues « petites à moyennes » que l'influence du développement périurbain sera sensible.

L'adaptation des infrastructures urbaines nécessitant du temps et de lourds investissements, il paraît légitime d'apprécier les limites acceptables du développement périurbain en l'absence de toute disposition pour en compenser les effets sur le risque d'inondation. Chaque bassin versant est un cas particulier qui va réagir différemment à la pluie selon plusieurs facteurs d'influence dont sa topographie, sa géologie, les types d'occupation du sol et le positionnement des zones imperméabilisées. Les facteurs anthropiques peuvent influencer la modification du régime des crues. Il faut y ajouter aussi l'évolution possible du régime des pluies.

Une méthodologie d'étude est proposée pour évaluer les modifications du régime hydrologique générées par l'urbanisation à venir et d'autres facteurs d'influence de l'évolution du régime des crues.

La démarche consiste en premier lieu à décrire les étapes de l'analyse des données disponibles afin de dégager au mieux l'influence des différents facteurs. On peut ensuite tester des scénarii de développement urbain qui intègrent les caractéristiques du bassin versant étudié.

## ■ Contacts

Pascal BREIL,  
Cemagref, URHH, 3 bis quai Chauveau, 69380 Lyon cedex 09 - E-mail: Pascal.breil@cemagref.fr

Bernard CHOCAT,  
LGCIE / Bat Coulomb, INSA LYON, 69621 villeurbanne cedex – E-mail: bernard.chocat@insa-lyon.fr

## ■ Les avancées de l'OTHU - Principaux résultats :

La méthode d'analyse est appliquée sur le bassin versant de l'Yzeron qui intègre dans son aval le sud de la ville de Lyon en rive droite du Rhône. La surface du bassin est de 150 km<sup>2</sup>. Les altitudes varient de 162 à 917 m en cote IGN sur une distance de 20 kilomètres environ, avec des pentes à plus de 10% en amont. La rivière principale, l'Yzeron présente des étiages sévères témoignant d'une faible capacité inter-annuelle de stockage pour ce bassin. La partie urbanisée est passée de 6% à 19 % entre 1979 et 1996. Cette évolution s'est accompagnée d'une déprise agricole au profit de l'extension du milieu périurbain et dans une moindre mesure des forêts du haut bassin.

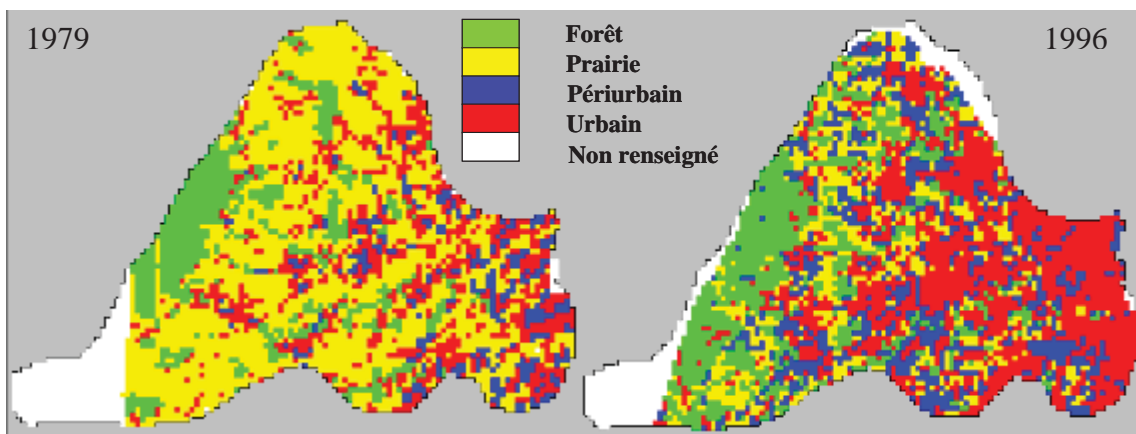


Figure 1. Evolution de l'occupation du sol. Ca sud du bassin de l'Yzeron. Données tirées des campagnes aériennes IGN. Codage en maille carré de 167 m. (B. Radojevic, 2002).

La méthode d'analyse proposée repose sur le calage et la validation d'un modèle pluie-débit distribué. La seconde étape porte sur la simulation du régime des crues dans un contexte d'urbanisation différente. L'influence de l'urbanisation est testée non pas sur quelques crues mais sur le régime des crues lui-même par comparaison des échantillons de crues simulées avec des contextes d'urbanisation différents.

**Etape 1 :** Une chronique de débit et une chronique de pluie associées, représentatives du bassin et d'une dizaine d'années sont nécessaires. Il est préférable de disposer d'un pas de temps des données qui soit inférieur à la journée ceci afin de rendre compte au mieux de l'effet de l'urbanisation sur les pointes de crue. La cohérence des chroniques de données de débit et de pluie devra être vérifiée par toute méthode de critique adaptée.

**Etape 2 :** L'occupation du sol doit pouvoir être décrite au cours du temps (figure 1 ci dessus). Cette information est obtenue à partir des fonds cartographiques disponibles et des campagnes de photos aériennes. Ces données chronologiques peuvent être rares ou mal réparties dans le temps. Le recours à des sources d'images par satellite, plus récentes mais offrant maintenant suffisamment de recul, est à envisager mais nécessite des pré-traitements coûteux.

**Etape 3 :** Le modèle hydrologique de transformation pluie-débit est de nature distribuée, c'est à dire qu'il permet de représenter le fonctionnement hydrologique de sous bassins (ou de mailles) à l'intérieur du bassin versant. Il est ainsi possible de tester l'influence hydrologique de scénarii d'évolution de l'occupation du sol. Le bassin versant est donc découpé en sous bassins homogènes et les caractéristiques d'occupation du sol renseignées. Le modèle peut alors être construit (fig.2). Le modèle CANOE (INSA-SOGREAH) a été utilisé dans notre cas.

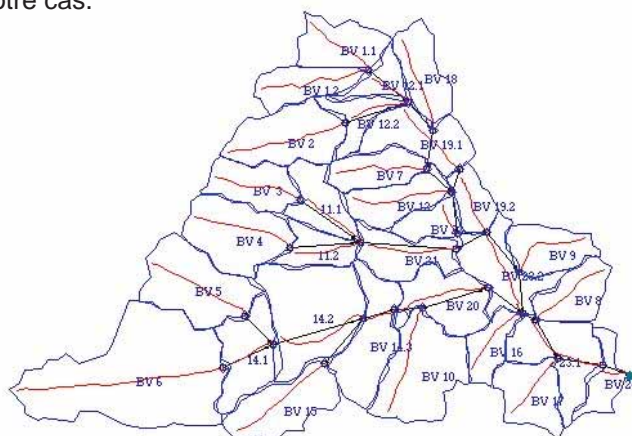


Figure 2. Construction du modèle hydrologique distribué de l'Yzeron. Base modèle CANOE (INSA-SOGREAH) (B. Radojevic, 2002).

**Etape 4 : Le calage** du modèle est réalisé sur 3 crues par saison tirées d'un échantillon de crues suffisamment variables pour représenter les crues fortes mais aussi moyennes et petites. L'effet de la saison intervient sur le calage des paramètres du modèle qui sont spécifiques au milieu rural. On obtient donc un calage saisonnier. L'échantillonnage des crues doit respecter des critères d'indépendance entre événements de crue, condition nécessaire à l'application des tests de l'étape 5. On retiendra 3n crues, « n » étant le nombre d'années de la chronique de débits.

**Etape 5 : La validation** du modèle repose alors sur la comparaison des régimes de crues observé et simulé. Les crues non utilisées de l'échantillon pour le calage sont simulées par le modèle. En complément des critères classiques de validation comme celui de Nash-Sutcliffe ou des volumes, une attention particulière porte sur la validation du comportement statistique des crues. Les régimes de crues sont ici décrits par la distribution des débits de pointe mais aussi des débits dépassés de manière continue sur différentes durées « d ». Cet échantillonnage permet de constituer des échantillons « débit-durée-fréquence » (Galea G. & Prudhomme C., 1997) à l'instar des échantillons « intensité-durée-fréquence » utilisées pour décrire les régimes de pluie. La durée (d) de dépassement d'un débit de crue est une donnée importante de l'inondation car elle détermine plusieurs éléments comme le volume qu'il serait nécessaire de stocker, la durée d'isolement de certains axes ou secteurs (le phénomène étant transitoire et le cheminement de l'eau complexe, il s'agit d'indicateurs), le temps de mouillage des terres agricoles pouvant être utilisées pour l'expansion des crues. Enfin, les termes durée-fréquence-intensité sont liés par des lois de probabilité dont l'ingénierie doit apprendre à tirer profit. Comme l'indique l'hydrogramme de la figure 3, cette procédure d'échantillonnage découpe les crues en tranches de durées « d ». Cela permet de décrire la forme et la dynamique des crues et donc d'apprécier au mieux l'efficacité du calage du modèle. Aux petites valeurs de « d » correspondent les débits de la partie haute des crues et vice versa. Les deux échantillons réalisés pour une durée « d » à partir des chroniques observée et simulée sont comparées à l'aide d'un test d'hypothèse. Nous avons retenu un test non paramétrique (ici le test de Wilcoxon-Mann-Whitney), portant sur le rang et donc très sensible à toute différence sur l'amplitude des crues de nos échantillons. Il faut de plus noter que les tests paramétriques imposent des conditions de normalité et (ou) de nombre minimum de valeurs pour être efficaces. Ces conditions sont rarement rencontrées dans le contexte d'étude. Selon un principe classique, le test est accepté ou rejeté en fonction d'un seuil défini par l'utilisateur. L'acceptation de l'hypothèse (H0) indique que les régimes de crues sont identiques et son rejet, qu'ils sont différents. Les seuils de rejets de 10%, 5% et 1% ont été retenus après avoir testé leur sensibilité sur différents pourcentages de modification de l'intensité des crues par translation de la distribution de l'échantillon ou encore de l'accroissement de cette distribution. L'acceptation de H0 au seuil de 10% indique un bon recouvrement des distributions des échantillons de crue. Le rejet au seuil de 1%, représente une différence très significative. Le tableau 1 montre que le modèle reproduit le comportement statistique du régime des crues observées car accepté au seuil de 10%, et cela des durées de 1 heure à 12 heures. Il est rejeté pour les durées supérieures qui ne sont pas notre cible car correspondant pour l'essentiel à des débits peu importants.

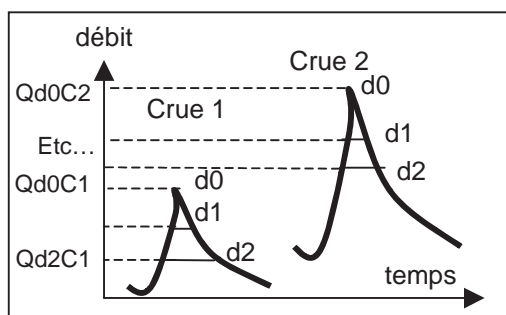


Figure 3. Principe d'échantillonnage des débits dépassés sur des durées « d ». Appliqué à « n » crues permet de décrire les régimes de crues

% d'urbanisation 1996 = 19%

test Wilcoxon-Mann-Whitney / test bilatéral			
H0	P(QCX serie1 > QCX serie2) = 0.5		
H1	P(QCX serie1 > QCX serie2) <> 0.5		
durées Qd	seuil 10%	seuil 5%	seuil 1%
1h	oui	oui	oui
3h	oui	oui	oui
6h	oui	oui	oui
12h	oui	oui	oui
24h	non	non	non

Tableau 1. Validation statistique du modèle par comparaison des échantillons observés et simulés.

**Etape 6 : La simulation** de scenarii réalistes peut être testée en modifiant les caractéristiques d'occupation du sol des sous bassins versants. Il est possible de s'aider de documents comme le schéma directeur d'urbanisme, le SCOT et le PLU. Un schéma simple consiste à augmenter la surface urbaine à partir des sous bassins situés en limite de la zone urbaine sans toutefois négliger l'expansion des satellites urbains que constituent les villages limitrophes. Il est aussi possible de s'inspirer des axes préférentiels d'urbanisation observés entre les deux périodes étudiées. Il convient d'identifier dans cette étape un seuil ou un intervalle de pourcentage d'urbanisation additionnel pour lequel la distribution statistique des crues est sensiblement modifiée. Le tableau 2 montre que entre 25% et 50% d'urbanisation, la situation en 1996 étant de 19%, l'influence du développement urbain sur le régime des crues devient sensible sur la forme et le débit des pointes de crues.

Simulation avec 25% d'urbanisation

test Wilcoxon-Mann-Whitney / test unilatéral			
H0	P(QCXserie1>QCXserie2) = 0.5		
H1	P(QCXserie1>QCXserie2) >0.5		
durées QCX	seuil 10%	seuil 5%	seuil 1%
1h	oui	oui	oui
3h	oui	oui	oui
6h	oui	oui	oui
12h	oui	oui	oui
24h	non	non	oui

Simulation avec 50% urbanisation

test Wilcoxon-Mann-Whitney / test unilatéral			
H0	P(QCXserie1>QCXserie2) = 0.5		
H1	P(QCXserie1>QCXserie2) >0.5		
durées QCX	seuil 10%	seuil 5%	seuil 1%
1h	non	non	non
3h	non	non	non
6h	non	non	non
12h	oui	oui	oui
24h	oui	oui	oui

Tableau 2. Test de scenarii d'évolution de l'urbanisation et détection statistique sur les régimes de crue.

La figure 4 illustre l'évolution des rapports des débits seuils de crue pour les différentes durées. Pour une durée « d », les rapports sont plus importants pour les crues fréquentes comme l'indique les faibles périodes de retour. Les débits de pointes qui correspondent à la durée de 1 heure sont en moyenne multipliés par 4 y compris pour la période de retour 10 ans. L'augmentation de l'urbanisation dans la gamme 25 à 50% a donc un effet très sensible sur l'intensité des crues. Dans cette simulation, la crue décennale devient presque annuelle.

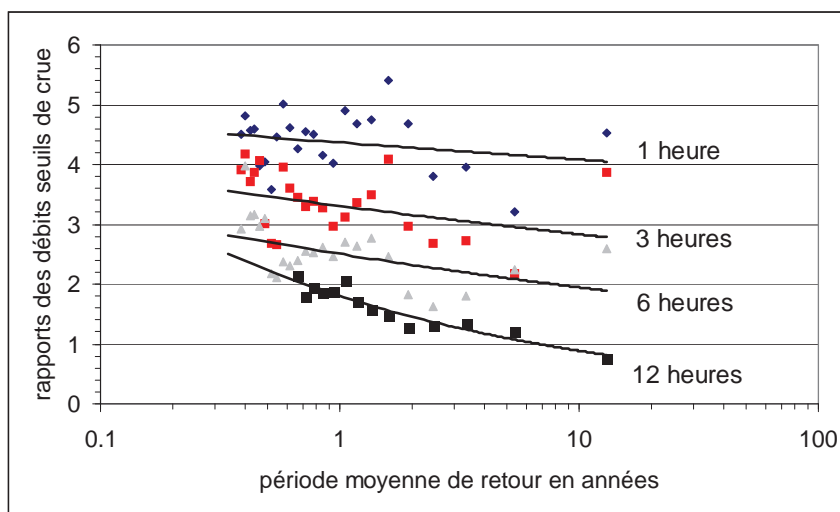


Figure 4 : Evolution des rapports de débits simulés à 50% et 19% d'urbanisation. Débits dépassés pour les durées de 1 heures à 12 heures.

## ■ Cadre d'utilisation

En l'état, cette méthode permet de définir un seuil d'urbanisation susceptible d'engendrer un accroissement significatif des fréquences et intensités des crues.

## ■ Développements futurs :

Les principales incertitudes de la modélisation sont liées à une mauvaise représentation de la distribution spatiale de la pluie dans le bassin versant ainsi qu'à une modélisation approximative de la contribution hydrologique des zones rurales. La simulation d'ouvrages hydrauliques de laminage des crues permettrait de tester des hypothèses de développements périurbain combinés à des ouvrages de compensation.

Ces points sont en cours d'amélioration au sein des travaux de l'OTHU. La fiche technique devrait développer dans l'avenir une approche méthodologique sur la répartition des ouvrages de compensation au sein d'un bassin versant devant s'urbaniser.

## ■ Documents publiés :

- Galéa, G., Prudhomme, C. (1997) Notions de base et concepts utiles pour la compréhension de la modélisation synthétique des régimes de crue des bassins versants au sens des modèles QdF. Rev. Sci. Eau 10 (1) : 83-101
- Guide pratique de la méthode Inondabilité (1998) : Coll. Des cahiers techniques Inter-Agence, N°60, 160p.
- Radojevic, B., Breil, P., Chocat, B. (2002) Quantification du rôle de l'urbanisation en particulier et de l'usage des sols en général sur les crues de l'Yzeron depuis quarante ans, Rapport final, Programme RIO, 60p.
- Radojevic, B. (2002) Méthode d'évaluation de l'influence urbaine sur le régime des crues d'un bassin versant de 130 km<sup>2</sup>. Thèse : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. <http://docinsa.insa-lyon.fr/these/pont.php?id=radojevic>
- UN, 2003. WORLD POPULATION PROSPECT. URBAN AND RURAL AREAS. <http://www.un.org/esa/population/publications/>