

# Propriétés statistiques de la réponse hydrologique d'un petit bassin versant urbanisé

## Application au site expérimental de Rezé

**Marie-Laure MOSINI**  
Technicien supérieur principal

**Fabrice RODRIGUEZ**  
Ingénieur des Travaux publics de l'État

**Hervé ANDRIEU**  
Ingénieur divisionnaire des Travaux publics de l'État  
Chef de section  
Section Hydrologie en milieu urbain  
Division Eau  
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées  
Centre de Nantes

## Introduction

L'estimation du volume d'eaux pluviales ou du débit produit par un bassin versant se fait à partir d'une étude des pluies et du comportement du bassin versant. Classiquement, la méthode rationnelle (Caquot, 1941) est utilisée pour calculer un débit de pointe correspondant à une période de retour donnée. Cette méthode s'appuie sur le coefficient d'écoulement, rapport entre le volume d'eau écoulé à l'exutoire et le volume précipité, et l'intensité de la pluie pendant une durée égale au temps de concentration du bassin. Le coefficient d'écoulement est généralement considéré constant et associé au taux d'imperméabilisation du bassin (Ministères, 1977 ; Chocat, 1997). Cette hypothèse est valable pour représenter la réponse du bassin versant à des pluies importantes mais elle peut être remise en question lorsqu'il s'agit d'étudier la réaction du bassin versant à des pluies plus courantes. Des observations ont en effet montré que le coefficient d'écoulement varie de façon significative en milieu urbain (Melanen et Laukkanen, 1981 ; Berthier, 1999). Becciu et Paoletti (2000) définissent d'ailleurs le coefficient d'écoulement comme une variable aléatoire liée au coefficient d'imperméabilisation et à la hauteur de pluie.

Nous proposons une nouvelle approche du calcul du débit de pointe pour une période de retour et une durée quelconques, en s'appuyant uniquement sur la connaissance des caractéristiques de la pluie (courbe intensité-durée-fréquence) et le coefficient d'imperméabi-

lisation du bassin versant. Dans cette perspective, il est introduit une variable dénommée coefficient statistique d'écoulement défini par :

$$C_s(p,d) = \frac{Q(p,d)}{I(p,d) \times S} \quad (1)$$

où

- > Q et I sont respectivement le débit et l'intensité de la pluie que l'on observe pendant la durée d avec une période de retour p,
- > S est la superficie du bassin versant.

$C_s(p, d)$  est alors le coefficient statistique d'écoulement, rapport des deux quantiles  $Q(p, d)$  et  $I(p, d)$ .

Cette variable n'a pas de sens physique puisqu'un débit et une intensité d'une certaine période de retour ne sont pas forcément observés lors du même événement pluvieux. Mais une telle définition présente un intérêt pratique, liée au fait que la très grande majorité des bassins versants ne sont pas jaugés : elle permettrait d'estimer directement le débit à partir des caractéristiques de la pluie.

Pour cette étude, le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) a mis en place un suivi hydrologique de longue durée d'un site expérimental en milieu urbain (Berthier et al., 1998). La série de données, disponible sur huit ans, permet la réalisation d'une étude statistique des quantiles de pluies et de débits.

Le paragraphe « Cadre de l'étude » présente brièvement ce site expérimental. Il est suivi d'une description de la méthode d'analyse statistique des

pluies et des débits mesurés sur le site. L'étude du coefficient statistique d'écoulement et de ses variations fait l'objet du dernier paragraphe.

Note

technique

## Cadre de l'étude

Le LCPC assure le suivi du site expérimental de Rezé (fig. 1), en mesurant notamment les précipitations et les débits d'eaux pluviales à l'exutoire du bassin depuis 1991 (Berthier et al., 1998). Ces mesures d'intensités pluvieuses sont disponibles de façon continue, quasiment sans interruption au pas de temps de la minute. Les données sont validées en utilisant la redondance des différents capteurs de mesure installés. Une base de données importante et robuste est donc à la disposition des utilisateurs. Cette étude s'intéresse aux valeurs de débits du bassin P13, d'une surface de 13 ha et d'une pente moyenne de 1,2 %. Le coefficient d'imperméabilisation de ce bassin versant a été estimé à 42,6 % grâce à une enquête de terrain détaillée.

## Analyse statistique des intensités pluvieuses et des débits

### Préparation des données

Le calcul des intensités pluvieuses et des débits pendant une durée considérée se fait selon une méthode de dépouillement à origine variable (Chocat, 1997), détaillée sur la figure 2. Pour une durée d donnée, cette méthode permet de déterminer l'intensité de pluie et la valeur de débit les plus élevés de chaque événement pluvieux en scrutant la chronique à un pas de temps inférieur à cette durée d.

La recherche des intensités moyennes maximales sur la durée d s'effectue à un pas de temps  $\Delta t$  représentant entre  $1/10^e$  et  $1/5^e$  de d. Les différentes durées d étudiées dans cette étude sont de 6 min, 15 min, 30 min, 1 h, 2 h, 3 h, 6 h, 12 h et 24 heures.

Cette méthode permet ainsi d'extraire, pour l'analyse statistique, deux échantillons de données sur une période de huit ans :

- > le premier est constitué des valeurs moyennes maximales bimensuelles (valeur maximale sur quinze jours) ce qui représente 192 valeurs,
- > le second échantillon contient les valeurs moyennes maximales bimestrielles (valeur maximale sur deux mois), c'est à dire 48 valeurs.

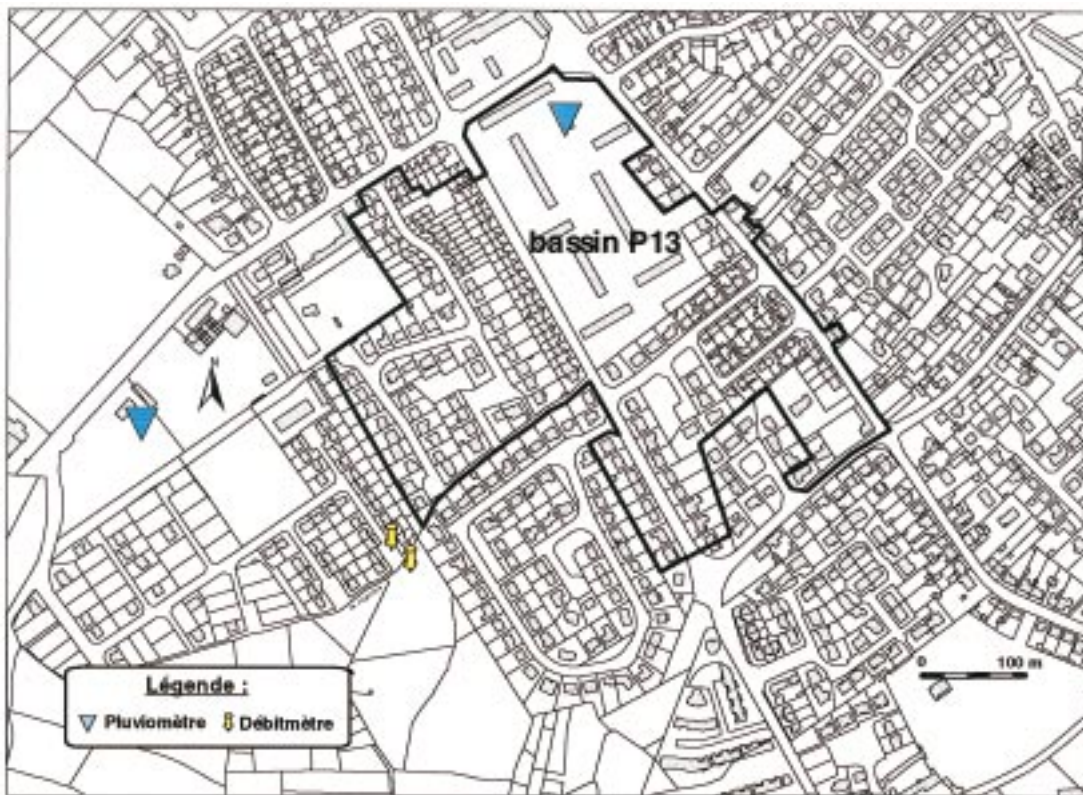


Fig. 1 - Site expérimental de Rezé.

Soit la durée  $d$  considérée et le pas de temps  $\Delta t$ , tel que  $d = n\Delta t$  ( $n$  est un entier). L'intensité pluvieuse est discrétisée au pas de temps  $\Delta t$ , soit  $I_{\Delta t}(i)$  la valeur courante. On souhaite calculer l'intensité moyenne maximum au  $j^{\text{ème}}$  pas de temps de durée  $d$ . Pour cela, on calcule les  $n$  intensités moyennes pendant la durée  $d$  :

$$I_d(i) = \frac{1}{n} \sum_{k=i}^{i+n} I_{\Delta t}(k) ; i \in [n(j-i), nj]$$

L'intensité moyenne maximum pendant la durée  $d$  au  $j^{\text{ème}}$  pas de temps est :

$$I_M(j) = \max \{I_d(i)\} ; i \in [n(j-i), nj]$$

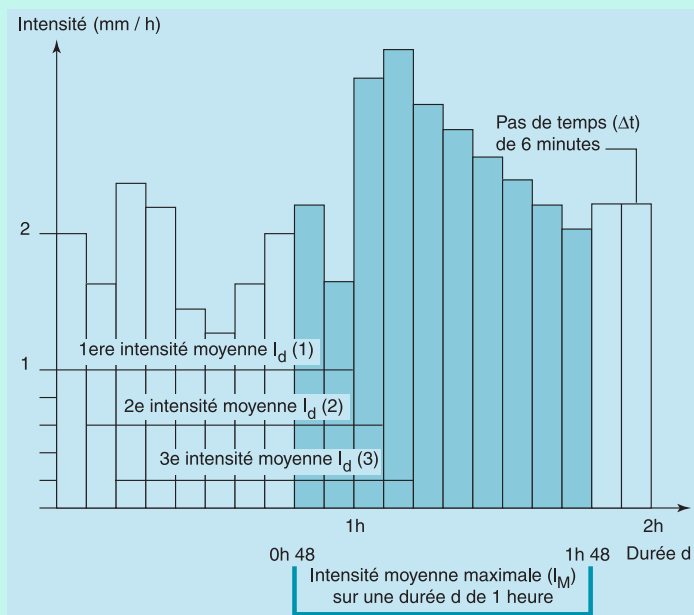


Fig. 2 - Exemple de recherche d'intensité moyenne maximale horaire sur un pas de temps de six minutes.

## Analyse statistique

L'analyse statistique a pour objectif de déterminer les quantiles d'intensité pluvieuse et de débit associés à des périodes de retour comprises entre un mois et dix ans. Cette analyse statistique se déroule selon deux procédures différentes dépendant de la période de retour considérée.

### Périodes de retour inférieures ou égales à six mois

Les valeurs bimensuelles de pluies et de débits sont utilisées. Étant donné la taille importante de l'échantillon (192 valeurs), les statistiques des pluies et des débits sont directement déduites des fréquences empiriques observées. Les valeurs bimensuelles sont classées par ordre croissant et, pour chacune d'elles, la fréquence empirique de non-dépassement est associée.

La fréquence empirique de non-dépassement, notée  $F_{ND}$ , est définie par Chow et al. (1988) :

$$F_{ND} = \frac{i - 0,5}{N} \quad (2)$$

où

- >  $i$  est le rang de classement des valeurs empiriques dans l'ordre croissant,
- >  $N$  représente l'effectif de l'échantillon.

La période de retour est ensuite déduite de la fréquence :

$$P = \frac{1}{F_D} * \frac{N_a}{N} \quad (3)$$

avec  $F_D = 1 - F_{ND}$

où

- >  $p$  est la période de retour en années,
- >  $F_D$  est la fréquence empirique de dépassement,
- >  $N_a$  représente le nombre d'années d'observations.

À titre d'illustration, deux valeurs par mois pendant huit ans forment un échantillon de 192 valeurs moyennes maximales. Pour une période de retour de deux mois, la fréquence empirique de non-dépassement est égale à 0,75 qui est associée, selon l'équation (2), à la valeur classée par ordre croissant au rang numéro 145.

### Périodes de retour supérieures à six mois

L'échantillon des 48 valeurs maximales bimestrielles est d'abord traité de la

même façon que précédemment afin de calculer les fréquences empiriques associées aux valeurs. Puis ces fréquences empiriques sont ajustées à une loi de distribution théorique donnant lieu à des quantiles d'intensités pluvieuses ou de débit. L'ajustement est réalisé à l'aide du logiciel Hydrolab (Laborde et Mouhous, 1998). Sept lois fréquemment utilisées en hydrologie sont disponibles : les lois de Gauss (loi normale), Fuller, Galton (loi log-normale), Weibull, Racine-normale, Poisson et Gumbel.

La loi log-normale et la loi normale ont été choisies pour réaliser l'ajustement et estimer des valeurs pour des périodes de retour 1, 2, 3, 5 et 10 ans. La fonction de répartition de ces deux lois s'exprime :

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{u^2}{2}} \cdot du \quad (4)$$

avec  $u = \frac{x - \bar{x}}{\sigma}$  pour la loi normale,  $x$

étant la valeur d'intensité de la pluie,  $\bar{x}$  la moyenne des intensités, et  $\sigma$  l'écart-type ;

et avec  $u = \frac{\log x - a}{b}$  pour la loi

log-normale,  $a$  étant la moyenne des  $\log x$  et  $b$  l'écart-type des  $\log x$  (Laborde et Mouhous, 1998).

L'ajustement à une loi log-normale est illustré sur la figure 3 pour une durée de pluie d'une heure. Cet ajustement permet de déduire la valeur théorique de la pluie correspondant à une fréquence théorique (tableau I), les bornes inférieures et supérieures représentent les valeurs minimales et maximales de l'intervalle de confiance à 80 % sur les quantiles.

De façon générale, une bonne qualité d'ajustement est obtenue. On notera cependant que, pour les périodes de retour élevées, cinq et dix ans, les intensités pluvieuses horaires sont inférieures à celles issues de la station météorologique proche : 25,1 mm et 29,4 mm pour des périodes de retour respectives de cinq et dix ans pour Météo France contre 18,8 mm et 21,5 mm pour les mêmes périodes de retour dans notre analyse. Les statistiques de Météo France s'appuient néanmoins sur une période d'observation différente de

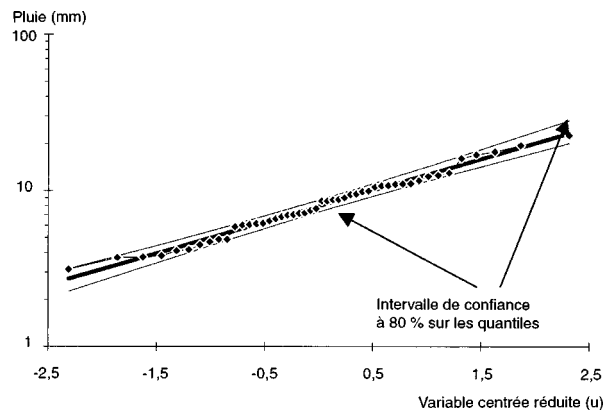


Fig. 3 - Ajustement à la loi log-normale des valeurs de pluies moyennes maximales bimensuelles suivant une durée d'une heure (résultats Hydrolab).

TABLEAU I  
Valeurs théoriques des pluies moyennes maximales (mm) d'une durée d'une heure associées aux périodes de retour

Fréquence	U de Gauss	Valeurs théoriques	Borne inférieure	Borne supérieure	Période de retour (an)
0,83	0,95	12,5	11,29	13,96	1
0,916	1,38	15,2	13,59	17,36	2
0,944	1,59	16,8	14,87	19,37	3
0,967	1,84	18,8	16,54	22,06	5
0,983	2,12	21,5	18,64	25,58	10

celle de Rezé (onze ans de mesures entre 1972 et 1983).

## Résultats

Les figures 4 et 5 représentent, sous forme de courbes de niveaux, les quantiles d'intensités pluvieuses et de débits pour l'ensemble des durées et des périodes de retour considérées sur le bassin versant P13 de Rezé.

Ces figures montrent que les valeurs des intensités de pluie et celles des débits croissent en fonction de la période de retour et décroissent en fonction de la durée. Toutefois, lorsque la durée est importante (supérieure à deux heures), les valeurs des débits et des pluies restent faibles, comme l'atteste la large représentation des valeurs inférieures à 5 mm/h pour la pluie et à 50 l/s pour le débit. On peut également

observer que, sur des durées inférieures à une heure et à des périodes de retour supérieures à un an, les valeurs des débits croissent moins vite que celles des intensités pluvieuses. Les valeurs maximales de pluie et de débit sont obtenues pour une durée de 6 min et une période de retour de dix ans, et sont respectivement de 88,7 mm/h et de 713 litres par seconde.

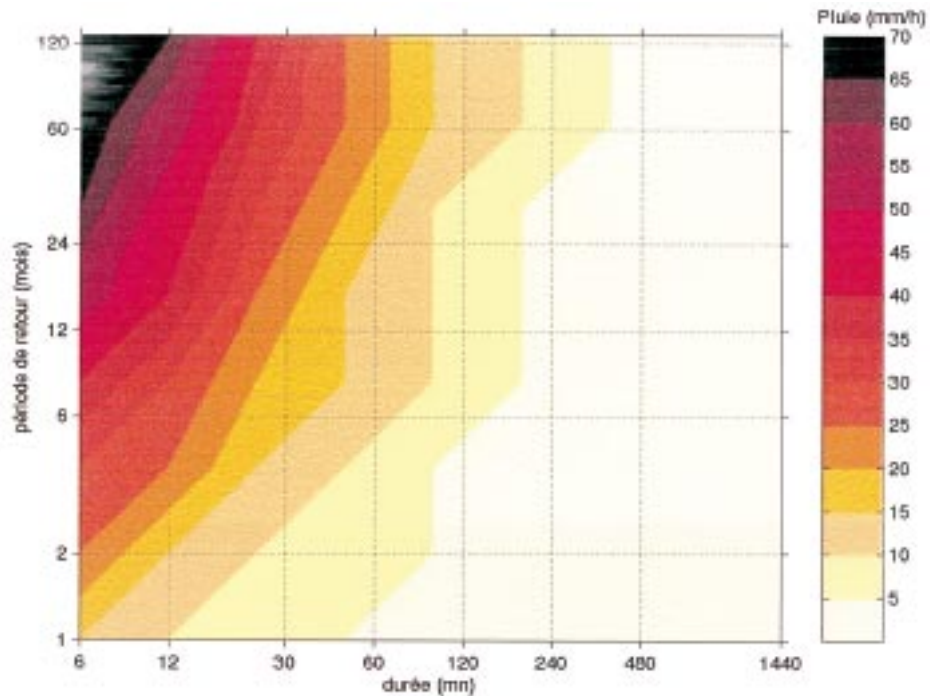


Fig. 4 - Périodes de retour des intensités de pluies de Rezé (mm/h) en fonction de leurs durées.

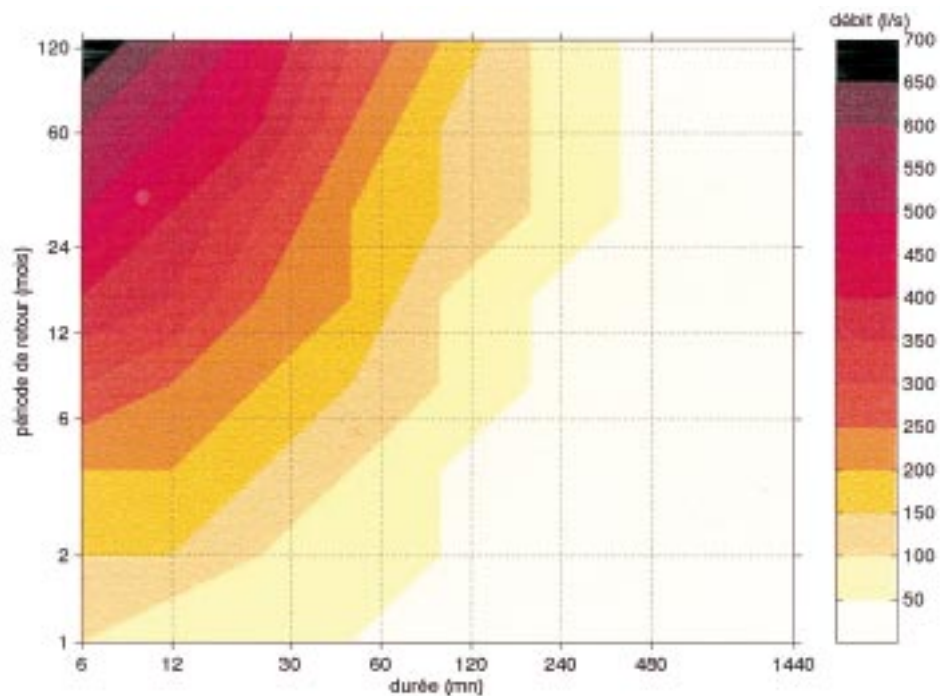


Fig. 5 - Périodes de retour des débits du bassin P13 (l/s) en fonction de leurs durées.

## Étude du rapport des statistiques des pluies et des débits

Le coefficient statistique d'écoulement est déduit de l'équation (1), c'est-à-dire déduit des quantiles des deux variables statistiques Q et I.

Le tableau II indique que les valeurs de ce coefficient statistique d'écoulement augmentent globalement lorsque la période de retour et la durée croissent. Toutefois, si ce phénomène est clairement marqué pour les périodes de retour supérieures à un an et pour des durées supérieures à une heure, cela est moins visible lorsqu'elles sont faibles. On observe, que pour des périodes de retour de un à six mois, les valeurs du coefficient statistique d'écoulement atteignent un palier lorsque la durée de la pluie est de plus de 2 heures. Cette variabilité de  $C_s$ , plus importante pour les petites durées, peut être associée à celle du coefficient d'écoulement observé expérimentalement sur le bassin pour les événements courants.

Les faibles valeurs de  $C_s$  sur les faibles durées peuvent, en outre, être liées au fait que la durée de l'écoulement est supérieure à celle de la pluie. Il pourrait être intéressant de relier ce phénomène à la valeur du temps de concentration du bassin versant. Toutefois, l'estimation théorique ou empirique de ce paramètre est difficile.

Enfin, il peut paraître étonnant que ce coefficient statistique d'écoulement soit majoré par la valeur du coefficient d'imperméabilisation du bassin étudié (0,426), sa valeur maximale étant de 0,41 pour une pluie décennale d'une durée de 24 heures. En effet, l'analyse des coefficients d'écoulements réels sur le bassin versant de Rezé avait montré que 5 % d'entre eux pouvaient dépasser le coefficient d'imperméabilisation (Berthier, 1999). Ce constat est tout de même intéressant puisqu'il soulève des questions quant à la façon dont est modélisé le phénomène de transformation de la pluie en débit, généralement basé sur la valeur du coefficient d'imperméabilisation.

Compte tenu de l'influence visible de la durée et de la période de retour de la pluie sur le coefficient statistique d'écoulement, il semble possible d'expliquer, par une relation statistique, les variations de ce coefficient à l'aide de la période de retour (p) et de la durée (d). Plus précisément, le coefficient d'imperméabilisation étant un majorant du coefficient statistique d'écoulement, on s'est intéressé à la variable  $1 - C_s/C_{imp}$ . Cette variable présente l'intérêt de prendre en compte explicitement le coefficient d'imperméabilisation, caractéristique connue du bassin versant. Différents essais ont conduit à la relation linéaire simple, où la variable explicative retenue est formée du produit « durée » × « période de retour » (d.p) :

$$\left[ 1 - \frac{C_s(p, d)}{C_{imp}} \right] \quad (5)$$

$$= 1.278 - 0.0548 \ln(d.p)$$

L'ajustement, obtenu par régression linéaire, est illustré par la figure 6.

TABLEAU II  
Valeurs du coefficient statistique d'écoulement  $C_s$

Durée de pluie (min)/ période de retour	6	15	30	60	120	180	360	720	1440
1 mois	0,14	0,19	0,22	0,25	0,26	0,24	0,23	0,22	0,22
2 mois	0,18	0,23	0,26	0,26	0,26	0,28	0,27	0,27	0,28
3 mois	0,20	0,25	0,26	0,27	0,29	0,28	0,28	0,28	0,31
6 mois	0,20	0,26	0,30	0,29	0,30	0,31	0,33	0,31	0,31
1 an	0,19	0,25	0,28	0,30	0,31	0,32	0,35	0,36	0,37
2 ans	0,20	0,26	0,29	0,31	0,33	0,34	0,36	0,37	0,38
3 ans	0,21	0,26	0,29	0,31	0,33	0,35	0,36	0,38	0,39
5 ans	0,21	0,26	0,29	0,32	0,33	0,36	0,37	0,38	0,40
10 ans	0,22	0,27	0,30	0,32	0,35	0,37	0,37	0,39	0,41

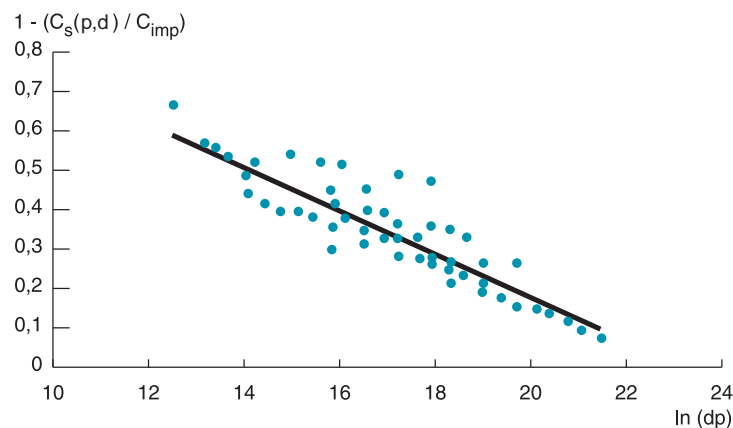


Fig. 6 - Lien entre le coefficient statistique d'écoulement ; le coefficient d'imperméabilisation, la période de retour et la durée.

Cette régression, réalisée avec la méthode des moindres carrés, possède un degré de confiance satisfaisant attesté par la valeur du coefficient de corrélation R, qui est de 0,9.

Le coefficient statistique d'écoulement s'exprime finalement sous la forme :

$$C_s(p,d) = C_{imp} [1 - (1.278 - 0.0548 \ln(d,p))] \quad (6)$$

## Conclusion

Cette étude a permis d'analyser les variations du coefficient statistique d'écoulement d'un bassin versant, défini pour une durée et une période de retour données comme le rapport des quantiles d'intensité pluvieuse et de débit correspondants. Pour le bassin versant considéré, il apparaît que ce coefficient statistique d'écoulement est relativement bien représenté par une relation dépendant uniquement de la période de retour, de la durée et du coefficient d'imperméabilisation. Une telle relation présente un intérêt pratique cer-

tain, puisqu'elle permettrait de déduire le comportement hydrologique d'un bassin versant de la connaissance des caractéristiques statistiques des pluies et du coefficient d'imperméabilisation. Il convient cependant d'étendre ce travail à d'autres bassins versants jaugés, afin de confirmer ce résultat et d'évaluer la représentativité de la relation proposée. Dans ce cadre, le temps de concentration des bassins versants pourra être étudié afin de vérifier si ce paramètre contribue à expliquer les variations du coefficient statistique d'écoulement.

**Remerciements.** À Nassima Mouhous, Jean-Pierre Laborde et l'équipe « Gestion et valorisation de l'environnement » de l'UMR 5651 du CNRS pour la mise à disposition du logiciel Hydrolab.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BECCIU G., PAOLETTI A. (2000), Moments of runoff coefficient and Peak Discharge, Estimation in Urban Catchments, *Journal of Hydrologic engineering*, Vol. 5, 2, April, 2000, pp. 197-205.

BERTHIER E., AUZIZEAU J., FASQUEL M., FLAHAUT B., ROUAUD J.-M., ANDRIEU H. (1998), Le suivi hydrologique de bassins versants expérimentaux en milieu urbanisé, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 218, pp. 59-75.

BERTHIER E. (1999), *Contribution à une modélisation hydrologique à base physique en milieu urbain*, Thèse de

doctorat, université Joseph Fourier, Grenoble, 196 pages.

CAQUOT A. (1941), *Écoulement des eaux pluviales*, Compte rendu de l'Académie des Sciences de Paris du 20 octobre 1941.

CHOCAT B. (1997), *Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement*, Lavoisier, Techniques et Documentations, Paris, 1 124 pages.

CHOW V.T., MAIDMENT D.R., MAYS L.W. (1988), *Applied Hydrology*, Mc Graw-Hill, 572 pages.

LABORDE J.-P., MOUHOUS M. (1998), *Logiciel Hydrolab*, version 98.2, équipe Gestion et valorisation de

l'environnement de l'UMR 5651 « Espace » du CNRS.

MELANEN M., LAUKKANEN R. (1981), *Dependence of runoff coefficient on area type and hydrological factors*. Second International Conference on Urban Storm Drainage 14-19 juin, Urbana, Illinois, pp. 404-410.

MINISTÈRES (1977), *Instruction Technique relative aux réseaux d'assainissement des agglomérations*, ministère de la Culture et de l'Environnement, ministère de l'Équipement et de l'Aménagement du Territoire, ministère de l'Agriculture, ministère de la Santé et de la Sécurité Sociale, IT 77 284 INT, Paris, 62 p. + annexes.