

Analyse des facteurs influant sur les écoulements de temps sec et de crue d'un bassin urbain

Florence GOMIS

Doctorante
Centre de Développement des géosciences appliquées
Université de Bordeaux I

Jean-Michel GRÉSILLON

Directeur
École nationale supérieure d'hydraulique
et de mécanique de Grenoble

Jean-Daniel BALADÈS

Ingénieur
Réseaux et techniques urbaines
Centre d'études techniques de l'Équipement
du Sud-Ouest

RÉSUMÉ

L'article analyse les facteurs qui jouent un rôle dans la réponse d'un bassin versant urbain à une pluie. L'analyse porte sur quarante-trois épisodes enregistrés sur le bassin versant de Marly à Bordeaux, de superficie 2,23 ha. Le réseau est unitaire.

L'étude des chroniques de débit en l'absence de précipitation montre l'existence d'un débit parasite minimal en période de temps sec, dont l'importance dépend de l'état d'humidité du sol.

La fonction de transfert du bassin est calculée à l'aide d'une méthode numérique utilisée en hydrologie rurale (méthode DPFT). Elle met en évidence l'existence d'un hydrogramme régulier mais qui dépend des caractéristiques de la pluie. L'intensité de la pluie et la vitesse du transfert sont liées ; le drainage rapide d'origine souterraine semble au contraire négligeable.

Pour les pluies moyennes et fortes, le coefficient d'écoulement est indépendant des caractéristiques de la pluie : il est voisin du coefficient d'imperméabilisation. C'est alors le même mécanisme de transfert par ruissellement qui semble être mis en jeu. Pour des pluies plus faibles, l'écoulement dépend surtout de l'état initial de la surface du bassin.

MOTS CLÉS : Bassin versant - Zone urbaine - Pluie - Débit - Mesure - Hydrologie - Écoulement (fluide) - Vitesse - Ruissellement - Inondation - Évacuation des eaux.

Introduction

Il est souvent admis en hydrologie urbaine qu'un bassin versant donné a une réponse unique en termes de production (part du volume précipité qui participe au débit à l'exutoire) et de fonction de transfert (qui traduit la cinétique de l'écoulement) : on attribue généralement au coefficient d'écoulement la valeur du coefficient d'imperméabilisation, et le modèle du réservoir linéaire fournit une fonction de transfert constituée d'une décroissance exponentielle éventuellement affectée d'une translation à l'origine (Desbordes, 1984).

Dans l'étude rapportée dans cet article, nous avons testé la pertinence de cette approche en dégagant l'influence de certains facteurs sur le transfert et la production, et en déterminant le rôle que peuvent jouer les apports souterrains mis en évidence par Breil (1990).

Les données et leur traitement

Description du site

Le site d'étude est le bassin versant de Marly à Caudéran (Bordeaux). Sa superficie est de 2,23 ha ; il est occupé par un habitat de type petit collectif. Les bâtiments qui composent l'ensemble sont tous équipés de toitures-terrasses, dont la surface totale représente environ 6 000 m². Les autres surfaces imperméables (voiries) représentent 7 200 mètres carrés.

Le coefficient d'imperméabilisation est de 60 à 3 % près. Le réseau est unitaire : les eaux usées et les eaux pluviales s'écoulent dans les mêmes canalisations ; la longueur totale du réseau est de 380 m. La topographie du bassin versant est peu marquée, avec une pente moyenne de 5,6 millimètres par mètre.

La nappe se situe à une profondeur de 1,60 m environ (mesure effectuée en avril 1997 après plusieurs mois de précipitations très faibles), et le fond du collecteur à 1,50 m à l'exutoire : le collecteur est donc légèrement au-dessus de la nappe au début de ce printemps.

Acquisition des données

Ce bassin a été équipé et suivi de 1991 à 1994 par le Centre d'études techniques de l'Équipement du Sud-Ouest. Les données relatives aux précipitations sont relevées par un pluviomètre à augets basculeurs situé sur le toit d'un immeuble voisin du bassin versant (fig. 1).

Les données relatives au débit à l'exutoire sont fournies par un déversoir triangulaire équipé d'une sonde à ultrasons immergée (fig. 1). Les hauteurs d'eau dans le collecteur sont enregistrées et converties en débit par une formule appropriée avec une précision de 5 %. L'acquisition se fait automatiquement, par l'intermédiaire d'un boîtier CR2M.

Sélection des épisodes

Sélection d'épisodes significatifs

Dans un premier temps, sont retenues les portions de la chronique pluie-débit qui ont simultanément donné lieu à une hauteur précipitée supérieure à 2,4 mm, et à une intensité maximale sur 8 minutes supérieure à 3,3 mm/h. Ces critères permettent d'écarter les écoulements faibles. Les caractéristiques de la pluie guident la première sélection des épisodes.

Contraintes liées à la durée des épisodes

Le logiciel utilisé pour l'étude de la fonction de transfert impose plusieurs conditions.

Pour une convergence correcte, le pas de temps des données doit être tel que le temps de montée de l'hydrogramme soit supérieur à trois pas de temps de calcul (Nalbantis, 1987). Or, des études préalablement menées sur le bassin versant de Marly nous permettent de situer ce temps de montée dans une fourchette allant de 5 à 15 minutes selon les épisodes (Bareyre, 1995). Nous sommes donc conduits à travailler avec un pas de temps d'une minute. Ceci induit un travail d'une grande précision, probablement illusoire compte tenu des diverses erreurs inhérentes à l'acquisition et au traitement des données brutes.

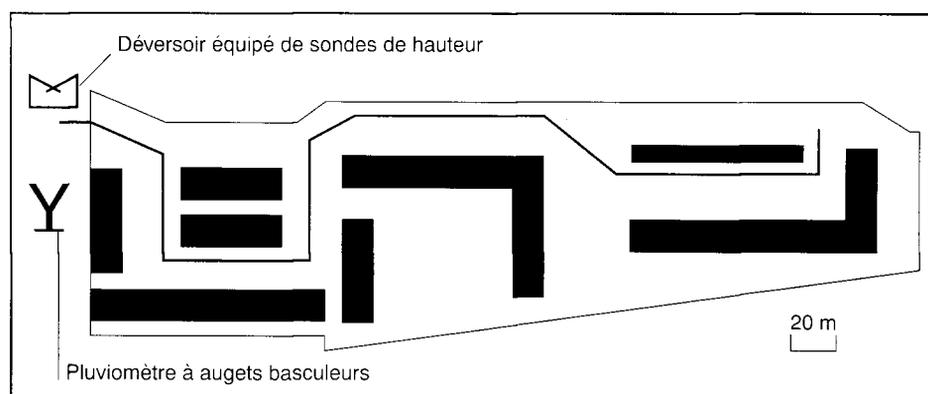
Par ailleurs, le logiciel ne peut traiter que des épisodes dont la durée, prise entre le début de la pluie et la fin de l'hydrogramme, ne dépasse pas 240 pas de temps. Compte tenu du pas de temps choisi, on ne retient parmi les épisodes issus de la première sélection que ceux dont la durée - dans le sens défini ci-dessus - est inférieure à 4 heures.

Au terme de ces préliminaires, quarante-trois épisodes ont été retenus. Les caractéristiques de ces épisodes sont données dans le tableau II.

Part relative des eaux usées

Le réseau d'assainissement étant unitaire, il convient d'éliminer l'apport des eaux usées au collecteur. Jensen (1990) adopte la méthode suivante : il évalue le débit horaire moyen en période sèche pour une semaine type. Il retranche à l'hydrogramme de crue les valeurs moyennes de débit correspondantes dans la semaine sèche type, après une éventuelle correction. Une autre méthode consiste à retrancher à l'hydrogramme de crue la valeur du débit du jour sec le plus proche au même instant (Bareyre, 1995). Les méthodes employées seront développées dans la suite. Dans tous les cas, le débit des eaux usées est très inférieur au débit pluvial (fig. 2).

Fig. 1 - Plan du bassin versant avec position des instruments de mesure.



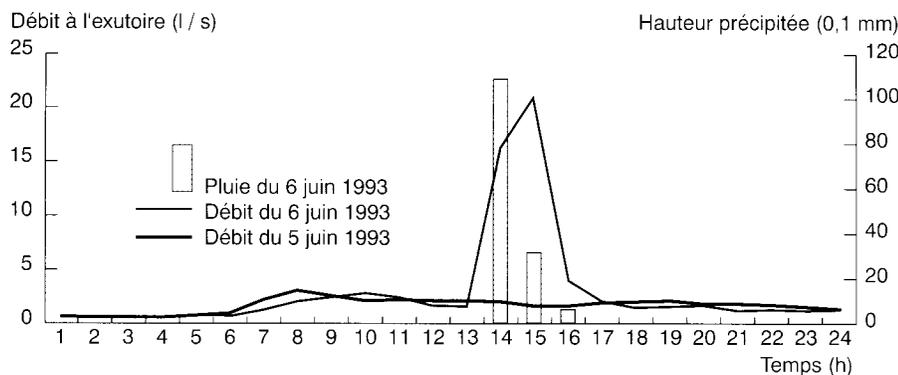


Fig. 2 -
Superposition
des débits
horaires d'un jour
de pluie
(6 juin 1993)
et du jour
sans précipitation
le plus proche
(5 juin 1993).

Étude du débit de temps sec

Définition

En l'absence de précipitations, le signal décrivant l'évolution temporelle du débit peut être décomposé en plusieurs composantes : le débit dans le collecteur un jour sec correspond à la somme du débit d'eaux usées, du débit de fuites domestiques, du débit d'eaux parasites et du débit d'eaux résiduares :

- les eaux usées présentent des variations horaires fortes ;
- le débit des fuites domestiques présente des variations journalières très faibles ;
- les eaux parasites s'infiltrent à la faveur des défauts d'étanchéité du réseau (Breil et *al.*, 1993 ; Raimbault, 1996) ;
- les eaux résiduares, qui proviennent par exemple d'activités industrielles, sont absentes dans le collecteur de Marly.

Principe de l'étude

On souhaite analyser les évolutions éventuelles du débit parasite indépendamment des événements pluvieux. Seuls, les jours dits « jours secs » au cours desquels la hauteur de précipitation est nulle ou égale à 0,2 mm (un basculement d'auge) sont retenus avec un pas de temps d'observation horaire.

Pour suivre l'évolution du débit parasite, Joannis (1994) propose l'introduction de paramètres de forme qui caractérisent la chronique de débit journalière par temps sec. Ces paramètres de forme sont plus fiables que les valeurs de débit brutes pour décrire l'évolution du débit minimal au pas de temps journalier. Comme nous avons étudié l'évolution mensuelle du débit à l'échelle de l'année, nous avons adapté une méthode différente, décrite ci-après.

Nous retenons la valeur minimale de débit horaire pour l'ensemble des jours secs de la der-

nière semaine du mois (la dernière semaine commençant au 23 inclus, pour tous les mois). Elle se situe toujours dans la période nocturne.

Le choix d'une valeur horaire pendant cette période du mois provient d'un compromis. D'une part, il répond à l'exigence d'une valeur représentative du mois considéré : si l'on choisit cette valeur minimale du débit sur le mois entier, elle se situera systématiquement au début du mois pour l'automne et à la fin pour le printemps. D'autre part, cette façon de procéder (valeur minimale et non pas valeur moyenne) permet d'éliminer la plupart des données aberrantes, dues à un dysfonctionnement du seuil dans le collecteur (encrassement par des dépôts solides momentanés). Si le dysfonctionnement persiste, toutes les données du mois sont affectées, et la valeur est écartée (c'est le cas pour les mois de janvier et février 1994). La borne du critère d'élimination est fixée à 0,5 litres par seconde.

La valeur ainsi obtenue est dite « débit de fond mensuel utile ».

Le débit de fond mensuel utile présente clairement des variations saisonnières (fig. 3).

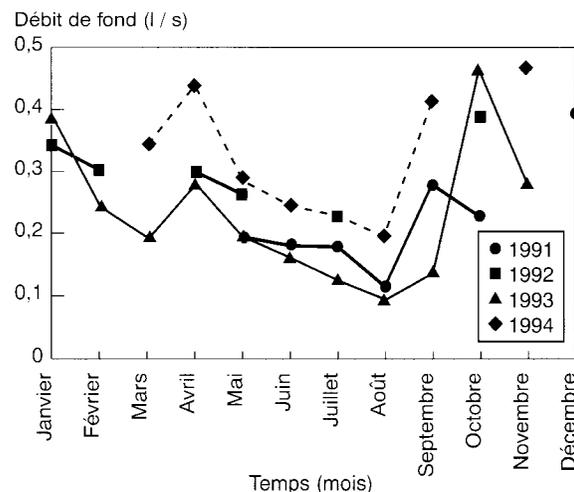


Fig. 3 - Graphiques superposés du débit de fond mensuel utile des années 1991, 1992, 1993 et 1994.

Deux approches seront successivement utilisées pour les expliquer :

- la recherche d'une relation entre le débit de fond mensuel utile et une réserve d'eau dans le sol (régression simple),
- et, dans un second temps, on explique le débit de fond mensuel utile par l'apport hydrique au sol au cours des mois précédents (régression multiple).

Pour caractériser les flux hydriques d'entrée et de sortie dans le sol, nous avons retenu la différence entre la hauteur totale précipitée et l'évapotranspiration potentielle (Penman) moyenne du mois considéré :

$$\delta_{\text{petp}}(i) = h_{\text{pp}}(i) - h_{\text{ctp}}(i)$$

avec

- $h_{\text{pp}}(i)$: hauteur de précipitation du mois i ,
- $h_{\text{ctp}}(i)$: évapotranspiration potentielle du mois i .

Ces données sont fournies par la station INRA de Villenave d'Ornon, qui est située à 5 km du bassin versant de Marly.

Les surfaces imperméabilisées ne sont pas soumises à l'évapotranspiration, mais les eaux peuvent s'y évaporer. Raimbault et Silvestre (1990) ont montré que l'évaporation potentielle est une variable fortement explicative de la valeur du stock d'eau mesuré expérimentalement dans un corps de chaussée. On considère dans la suite de l'étude que les données d'évapotranspiration potentielle s'appliquent à l'ensemble du bassin. L'erreur commise de la sorte sur l'estimation de l'évapotranspiration à Marly fait de $\delta_{\text{petp}}(i)$ une variable approchée pour l'évaluation des flux hydriques verticaux.

Les valeurs correspondant aux mois de septembre et octobre ont été écartées de l'étude qui suit. À cette période de l'année, le débit parasite minimal sur la journée varie brusquement et le pas de temps du mois est trop grand pour décrire ce phénomène relativement rapide. Les données correspondantes n'ont pas de signification et nuisent à la mise en évidence de l'information contenue dans les autres.

Corrélation à une réserve d'eau dans le sol

Les statistiques sur le débit de fond mensuel utile Q_f et sur les variables δ_{petp} sont données dans le tableau I.

TABLEAU I
Données statistiques sur le débit de fond mensuel utile et la variable δ_{petp}

Données	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type
Q_f (l/s)	0,09	0,47	0,26	0,10
δ_{petp} (mm)	-135	158	10	70

La réserve d'eau dans le sol se constitue progressivement au cours de l'année hydrologique. Cette réserve d'eau est notée $S_{\text{petp}}(j)$ et on l'estime en effectuant la somme des valeurs mensuelles de $\delta_{\text{petp}}(i)$ des mois successifs entre un mois initial i_0 et le mois j considéré :

$$S_{\text{petp}}(j) = \sum_{i=i_0}^{i=j} \delta_{\text{petp}}(i)$$

Afin d'éliminer les dérives, la valeur de la réserve a été réinitialisée tous les douze mois pendant les quatre ans pour lesquels on dispose de données. La réinitialisation consiste à attribuer chaque année une valeur arbitraire nulle à la réserve d'eau dans le sol d'un certain mois (i_0).

Le choix du mois de réinitialisation a des conséquences sur la qualité de la relation de la réserve d'eau du sol avec le débit de fond mensuel utile. Les réserves réinitialisées en hiver sont beaucoup mieux corrélées avec le débit de fond mensuel utile que celles réinitialisées en été : en hiver, les valeurs de δ_{petp} sont plus faibles et plus stables qu'en été, de sorte que les erreurs commises sur leur estimation perturbent moins les valeurs de $S_{\text{petp}}(j)$ si l'initialisation est faite en hiver. Le mois de réinitialisation choisi est janvier.

La corrélation entre le débit de fond mensuel utile et la réserve d'eau dans le sol est réelle : R^2 vaut 0,58 (fig. 4). Les deux coefficients de la régression (la constante et le coefficient de S_{petp}) sont significatifs au seuil de 1 %.

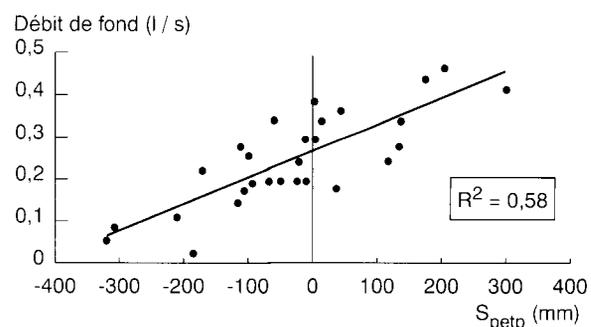


Fig. 4 - graphique de corrélation entre le débit de fond (l/s) et la réserve d'eau S_{petp} (mm).

Régression sur l'apport à la réserve des mois précédents

Le débit de fond mensuel utile Q_f est mis en corrélation avec le flux d'entrée du mois en cours $\delta_{\text{petp}}(0)$ et des mois qui précèdent : $\delta_{\text{petp}}(1)$ pour le mois précédent et $\delta_{\text{petp}}(2)$ pour celui d'avant.

La régression linéaire entre le débit de fond mensuel utile et la variable δ_{petp} est réalisée par une procédure de régression montante.

■ Au premier pas :

- $Q_f = 0,324 + 0,192 \delta_{\text{petp}}(0)$,
- $R^2 = 0,793$,
- erreur-type d'estimation : 0,0609,
- rapport t (variable de Student associée) pour le coefficient de régression de $\delta_{\text{petp}}(0)$: 9,99.

La probabilité que le coefficient de $\delta_{\text{petp}}(0)$ soit en réalité nul ou négatif est inférieure à 1 %.

■ Au second pas, l'expression obtenue est la suivante :

- $Q_f = 0,317 + 0,159 \delta_{\text{petp}}(0) + 0,0609 \delta_{\text{petp}}(1)$,
- avec un coefficient de corrélation multiple $R^2 = 0,83$ (non biaisé).

Le paramètre $\delta_{\text{petp}}(0)$ (du mois en cours) constitue la principale variable explicative ($R^2 = 0,7$), le flux d'entrée du mois précédent $\delta_{\text{petp}}(1)$ jouant un rôle secondaire dans l'explication du débit de fond mensuel utile. Ceux qui correspondent aux mois antérieurs n'ont pas d'influence.

Conclusion

Dans un premier temps, une relation entre le débit de fond mensuel utile et l'état d'humidité du sol a été mise en évidence. La régression montre que, plus précisément, sa valeur est conditionnée principalement par les apports hydriques nets au sol dans le mois en cours. En période de temps sec, les écoulements dans le réseau sont donc nettement dépendants de l'état d'humidité du sol. Nous allons voir ce qu'il en est lors d'épisodes pluvieux.

Étude des crues

Étude du transfert

Principe de l'étude

On se propose d'étudier la variabilité de la fonction de transfert du bassin versant de Marly en fonction de diverses variables inspirées par des études analogues menées sur des bassins versants ruraux (Neyret-Gigot, 1992 ; Grésillon et al., 1994 ; Schober, 1996).

Il est rappelé que la fonction de transfert est une notion dérivée de l'hydrogramme unitaire (Sherman, 1932). Un hydrogramme unitaire correspond à la séquence des débits à l'exutoire du bassin, qui résulte d'une pluie nette de volume unitaire et concentrée sur une durée faible par rapport au temps de montée de l'hydrogramme. L'utilisation de l'hydrogramme unitaire implique l'hypothèse que le transfert est linéaire et que la distribution spatiale de la pluie est constante d'un événement à l'autre.

L'hypothèse de linéarité du transfert sur les petits bassins versants urbains et les petits épisodes est sujette à controverses (Chapman, 1993). L'étude qui suit constitue une contribution à l'analyse de cette linéarité.

L'outil de l'étude est la DPFT (Différentielle Première de la Fonction de Transfert) qui est une méthode numérique permettant d'identifier simultanément la fonction de transfert d'un bassin et les pluies nettes sur un jeu d'épisodes pluies-débits (Duband, 1978 ; Nalbantis, 1987).

L'écriture de la relation linéaire entre débits rapides et pluies nettes résulte de la convolution de deux fonctions : l'intensité de la pluie en fonction du temps et l'hydrogramme de crue lui-même qu'on discrétise. Pour identifier les coefficients de cette relation, la DPFT cherche d'abord les différences premières de ces coefficients à partir des différences premières des débits, ce qui a pour objectif d'éliminer les débits lents et de rendre les calculs numériques plus stables.

La fonction de transfert sur Marly, identifiée à partir des quarante-trois épisodes, est représentée sur la figure 5.

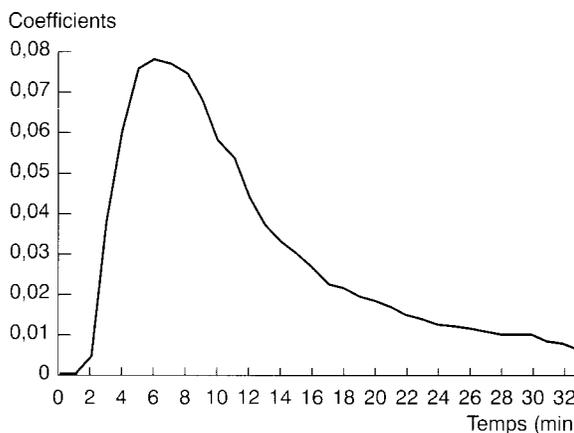


Fig. 5 - Fonction de transfert moyenne sur Marly (quarante-trois épisodes).

Le temps de montée est de 6 minutes, ce qui signifie qu'il faut attendre en moyenne 6 minutes après une pluie instantanée avant d'obtenir un débit maximal à l'exutoire. Lorsque le temps de base, ici de 33 minutes, est écoulé, les effets d'une pluie concentrée sur la première minute ne se font quasiment plus sentir à l'exutoire. Une part importante du volume précipité s'écoule pendant le temps de montée, ce qui n'est pas pris en compte par le modèle classique du réservoir linéaire. La DPFT permet également d'étudier d'éventuelles variations de la fonction de transfert du même bassin versant.

Les événements pluvieux sont analysés en utilisant les variables suivantes :

- hauteur totale précipitée ;
- durée totale de la pluie ;

- intensité maximale précipitée en 8 minutes (durée déterminée par une étude préliminaire qui établit cette valeur comme limite supérieure pour le temps de réponse du bassin) ;
- état initial du bassin, qui représente l'état d'humidité superficiel du bassin. Il est caractérisé par le nombre de jours secs qui précèdent l'épisode considéré : de 0 pour les pluies qui font suite à une pluie de la même journée (c'est-à-dire qui précède de moins de 24 heures), à 8 jours, pour les épisodes dont on dispose. On appelle jour sec un jour où la hauteur des précipitations est inférieure à 0,2 mm ;
- saison : été ou hiver, qui caractérise l'état d'humidité profonde du sol.

Étude de l'influence du débit de fond et du débit des eaux usées sur la fonction de transfert moyenne

Puisque le réseau est unitaire sur le bassin versant, l'hydrogramme consécutif à une crue englobe les eaux usées et le débit de fond. Toutefois, la variation du débit de fond se fait à une échelle de temps beaucoup plus grande que celle d'une crue ; puisque le logiciel procède par différences, la participation du débit de fond à la fonction de transfert moyenne est négligeable.

En revanche, le débit des eaux usées peut présenter à certains moments de la journée des variations significatives relativement à celles du débit total, à l'échelle de temps de la crue. Une étude a été menée pour déterminer son influence sur la fonction de transfert moyenne, en identifiant sur un jeu d'épisodes une autre fonction de transfert moyenne qui prend en compte les débits dans le collecteur auxquels on retranche la valeur estimée des eaux usées à chaque pas de temps. Elle montre que l'influence des eaux usées est négligeable pour identifier la fonction de transfert. Ceci peut

TABLEAU II
Caractéristiques des épisodes utilisés dans l'étude

Caractéristiques	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type
Durée de la pluie (min)	6	192	82,6	51,1
Hauteur précipitée (mm)	2,4	22	7,7	4,3
Intensité maximale de la pluie sur huit minutes (mm/h)	3,4	61,3	23,8	15,4
État initial de la surface du bassin (j)	0	8	0,8	1,7
Débit maximal à l'exutoire (m ³ /s)	0,006	0,136	0,036	0,054

TABLEAU III
Matrice des corrélations
entre les variables utilisées dans l'étude des crues
sur le bassin versant de Marly

	Durée	Hauteur	Intensité
Hauteur	0,42		
Intensité	-0,1	0,55	
État initial	-0,27	-0,20	-0,38

s'expliquer par la démarche statistique de la DPFT jointe à la position aléatoire des pluies dans la journée.

Dans la suite de l'étude de la fonction de transfert, on travaille sur les valeurs brutes du débit, qui intègrent le débit des eaux pluviales, le débit des eaux usées et le débit de fond.

Résultats

Quelques caractéristiques de l'échantillon sur lequel on travaille dans la suite sont consignées dans le tableau II.

La matrice des corrélations entre les variables quantitatives est donnée dans le tableau III. Elle montre notamment que l'intensité de la pluie telle que nous l'avons définie est liée aux autres variables (tableau IV) ; l'interprétation devra en tenir compte.

Une partition de l'échantillon est effectuée selon la valeur moyenne des variables durée, hauteur et intensité, calculée sur la totalité de l'échantillon. On obtient ainsi, dans les trois cas, deux sous-populations dont le nombre d'individus est voisin (tableau V).

En ce qui concerne l'état initial, on sépare l'échantillon en deux selon qu'il s'agit d'une pluie consécutive à une pluie du même jour ou bien qu'il y a eu un jour sec ou davantage avant l'épisode considéré.

La saison est entendue au sens du débit de fond mensuel utile : on distingue l'été, période de débit de fond faible, et l'hiver, période de débit de fond plus fort. Les épisodes qui se situent dans les saisons intermédiaires ne sont pas pris en compte dans cette partie de l'analyse. L'été est constitué par les périodes suivantes : juin, juillet, août, début septembre 1993 ; juillet, août, début septembre 1994. L'hiver est constitué par les périodes suivantes : octobre, novembre, décembre 1993 ; janvier, février, mars, avril, novembre, décembre 1994.

La comparaison des fonctions de transfert moyennes correspondant aux différentes sous-populations issues de l'échantillon initial aboutit aux constats suivants.

■ **Influence de la saison :**

Le temps de réponse est légèrement inférieur en hiver, 6 minutes, contre 7 minutes en été ; cette différence n'est pas significative. Les deux courbes sont pratiquement superposables après le pic (fig. 6). Cela signifierait que l'état d'humidité du sol (dont le témoin est le débit de fond mensuel utile) ne joue pas de rôle dans la partie relative au transfert de la réponse du bassin à une crue.

TABLEAU IV
Intensité moyenne dans chacune des classes des différentes partitions réalisées

	Hauteur précipitée		État initial de la surface du bassin		Saison (au sens du débit de fond mensuel utile)		Durée de la pluie	
	$h < 7 \text{ mm}$	$h > 7 \text{ mm}$	$j = 0$	$J > 0$	Été	Hiver	$d < 80 \text{ min}$	$d > 80 \text{ min}$
Intensité moyenne en huit minutes (mm/h)	18	30	15	26	27	25	23	22

TABLEAU V
Effectif des échantillons retenus pour l'analyse de la fonction de transfert

	Intensité moyenne en huit minutes		Hauteur précipitée		État initial de la surface du bassin		Saison (au sens du débit de fond mensuel utile)		Durée de la pluie	
	$i < 24 \text{ mm/h}$	$i > 24 \text{ mm/h}$	$h < 7 \text{ mm}$	$h > 7 \text{ mm}$	$j = 0$	$J > 0$	Été	Hiver	$d < 80 \text{ min}$	$d > 80 \text{ min}$
Effectif	23	20	22	21	30	13	15	9	22	21

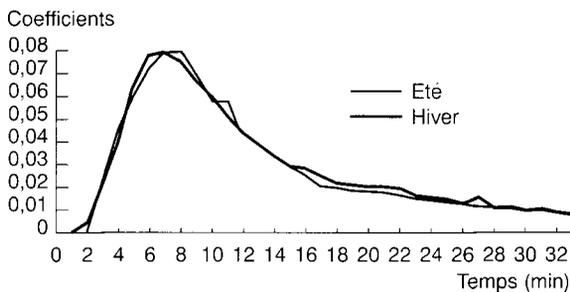


Fig. 6 - Superposition des fonctions de transfert du bassin versant pour l'été et l'hiver (sol humide ou moins humide).

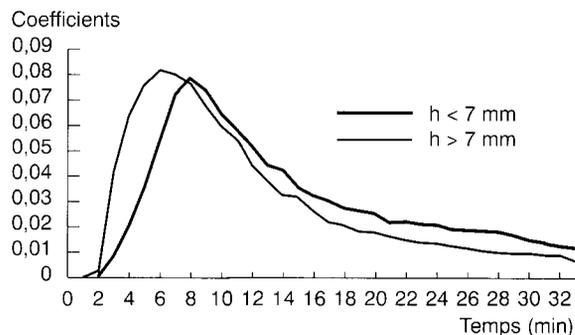


Fig. 7 - Superposition des fonctions de transfert relatives à la partition des épisodes pluvieux selon la hauteur précipitée.

■ Influence de la durée des événements pluvieux :

Les deux fonctions de transfert moyennes sont semblables.

■ Influence de la hauteur précipitée durant les événements pluvieux :

Le temps de réponse est légèrement plus long dans le cas d'une hauteur précipitée faible (8 minutes contre 6 minutes), et la fonction de transfert est plus pointue dans ce cas (fig. 7).

■ Influence de l'intensité de la pluie :

Le temps de montée est plus court dans le cas des fortes intensités (6 minutes contre 8 minutes). La fonction de transfert est plus longue dans le cas des faibles intensités : la réponse du bassin semble mobiliser dans ce cas des apports légèrement plus lents. On note, en particulier, un ralentissement assez net autour du 25e pas de temps. Ceci peut être dû à la présence de toitures-terrasses sur le bassin qui diffèrent une partie des apports (fig. 8).

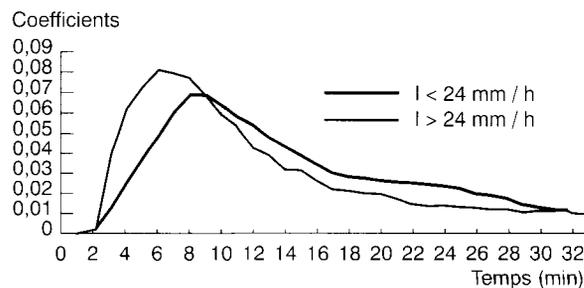


Fig. 8 - superposition des fonctions de transfert relatives à la partition des épisodes pluvieux selon l'intensité de la pluie.

L'intensité joue un rôle significatif dans le transfert. On remarque en effet une forte corrélation entre la hauteur précipitée et l'intensité moyenne dans la classe à laquelle elle se rapporte (tableau IV).

Afin de vérifier l'influence de l'état d'humidité profonde du sol, on a effectué, dans les deux populations partitionnées selon le critère de l'in-

tensité, une autre partition en fonction de la saison. On a ainsi obtenu quatre familles d'évènements pour chacune desquelles on a calculé la fonction de transfert moyenne : quelle que soit la saison, pour chacune des deux classes d'intensité, la fonction de transfert est semblable. L'humidité dans le sol ne joue donc pas de rôle dans le transfert. Seule l'humidité superficielle déterminée par la proximité dans le temps de la pluie précédente (état initial) semble rendre le transfert légèrement plus rapide.

Conclusion

Parmi toutes les variables étudiées, l'intensité de la pluie - combinée à une hauteur de précipitation suffisante - semble avoir une influence importante sur le transfert dans la réponse du bassin versant à une crue. Ce rôle, assez net, mérite probablement d'être pris en considération pour l'étude des crues en zone urbaine. Dans le cas de pluies de forte intensité, les vitesses de ruissellement sont grandes, en conformité avec les lois des écoulements superficiels (Manning-Strickler). Certaines formules qui permettent de calculer le temps de concentration des bassins intègrent d'ailleurs l'intensité de la pluie dans ce sens.

L'état initial de la surface du bassin semble aussi jouer un rôle : une surface rendue plus humide par une pluie tombée moins d'un jour avant l'épisode considéré semble accélérer le transfert. Mais il ne semble pas que les écoulements lents, souterrains par exemple, interviennent de façon significative sur la fonction de transfert.

Contrairement au débit parasite d'infiltration, le transfert sur ce petit bassin urbain paraît insensible à l'état d'humidité profonde du sol. Ce résultat permet d'avancer que la composante de drainage rapide, dont le mécanisme est favorisé par une forte humidité du sol, est négligeable sur Marly pour la gamme de pluies dont on dispose.

Étude de la production du bassin versant

Introduction

Le coefficient d'écoulement, défini comme le rapport entre le volume d'écoulement provoqué par la pluie et mesuré à l'exutoire du collecteur, et le volume total précipité sur le bassin versant, est utilisé dans l'étude qui va suivre :

$$C_c = \frac{\text{volume pluvial écoulé}}{\text{volume précipité}}$$

On se propose d'analyser les variations du coefficient d'écoulement en fonction des variables utilisées pour l'étude du transfert.

Le volume précipité est le produit de la hauteur totale précipitée mesurée par le pluviomètre, et de la superficie du bassin versant (2,23 ha). Le calcul du volume écoulé est plus complexe, car il convient

de distinguer, dans le volume total, la part du volume des eaux usées et du débit de fond, d'une part, et celle du volume des eaux pluviales, d'autre part.

Comme pour l'étude du transfert, une étude comparative a été faite sur cinq épisodes pour lesquels l'influence des eaux usées a été jugée relativement importante. Ce sont des crues pour lesquelles le débit des eaux usées est relativement grand devant le volume précipité (dans un rapport de 8 % environ) et présente une variation importante entre le début et la fin de l'hydrogramme de crue. Deux méthodes sont utilisées :

■ **La première méthode**, relativement grossière, consiste à retrancher au débit total à l'exutoire pendant la crue une constante qui est la valeur du débit relevée dans les pas de temps qui précèdent immédiatement la crue. Cette méthode se justifie dans la mesure où les variations du débit des eaux usées sont faibles pendant la crue.

■ **La seconde méthode**, plus précise, consiste à retrancher au débit total à l'exutoire un débit dont on suppose qu'il varie de façon linéaire dans le temps, entre la valeur du débit qui précède immédiatement la montée de l'hydrogramme, et celle qui correspond à la fin de la crue. Celle-ci est repérée dans l'hydrogramme lorsque la valeur du débit atteint celle qu'elle avait immédiatement avant la crue et, dans les cas où elle reste supérieure, si elle reste constante pendant plus de cinq pas de temps lorsque le temps de base est écoulé après la fin de la pluie.

Les deux méthodes de calcul du volume pluvial écoulé donnent des différences de 8 % en moyenne sur les cinq épisodes.

Il a donc été décidé d'utiliser la seconde méthode de calcul pour la totalité des quarante-trois épisodes retenus.

Les données statistiques du tableau VI décrivent l'éventail des coefficients d'écoulement obtenus.

Pour cette étude, la partition des épisodes est réalisée en plusieurs étapes.

TABLEAU VI
Données statistiques
sur le coefficient d'écoulement

	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type
C_c	0,18	0,72	0,52	0,13

Analyse globale du coefficient d'écoulement

Pour chaque variable, l'échantillon est séparé en plusieurs classes : deux pour la saison, trois pour l'état initial, quatre pour la durée, l'intensité et la hauteur. L'étude de l'évolution du coefficient d'écoulement moyen par classe permet de dégager des tendances, même si les écarts ne sont pas tous statistiquement significatifs (fig. 9).

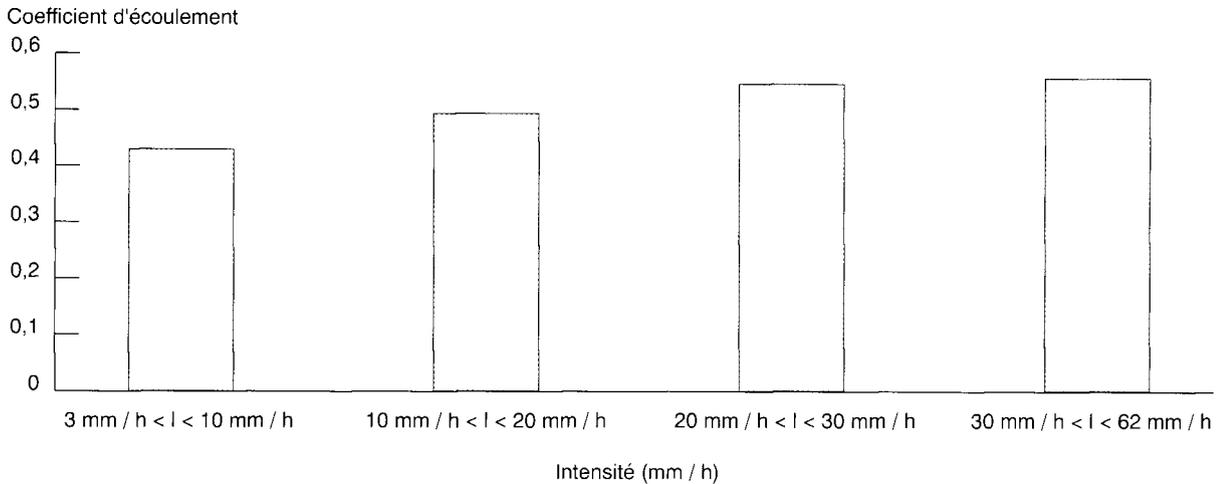


Fig. 9 - Coefficient d'écoulement en fonction des classes d'intensité maximale de la pluie en 8 minutes.

TABLEAU VII
Caractéristiques du coefficient d'écoulement dans chacune des classes

	Durée de la pluie		État initial de la surface du bassin		Intensité maximale de la pluie en huit minutes		Hauteur de précipitation		Saison	
	d < 70 min	d > 70 min	0 ou 1 jour sec	>1 jour sec	i < 24 mm/h	i > 24 mm/h	h < 6 mm	h > 6 mm	Été	Hiver
Population	18	24	35	7	17	25	18	24	20	11
C moyen	0,49	0,55	0,55	0,38	0,47	0,56	0,44	0,57	0,53	0,56
Écart-type	0,17	0,08	0,1	0,17	0,13	0,1	0,14	0,08	0,13	0,09

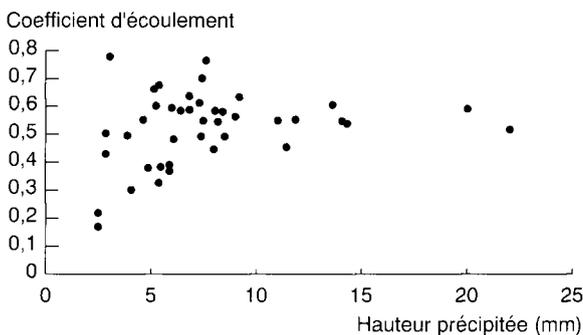


Fig. 10 - Nuage de points caractérisant la corrélation entre la hauteur précipitée et le coefficient d'écoulement.

On a alors décidé de réaliser de nouvelles partitions, en deux classes cette fois. La pertinence de cette démarche est confirmée par la corrélation entre le coefficient d'écoulement et chaque variable (la figure 10 le montre dans le cas de la hauteur d'eau précipitée). La valeur séparatrice découle de l'analyse de ces informations.

Pour chaque variable, on obtient une valeur moyenne du coefficient d'écoulement dans chacune des deux classes (tableau VII).

La signification de l'écart entre les moyennes a été étudiée par le test d'Aspin-Welsh (norme NF X 06-032), adapté à la comparaison de deux

moyennes d'échantillons aux écarts-types inconnus et inégaux. Les écarts entre les différentes classes sont significatifs pour l'état initial et l'intensité, au seuil de 5 %, et pour la hauteur de précipitation au seuil de 1 %. Ils ne le sont pas pour la durée de la pluie, ni pour la saison.

Le coefficient d'écoulement sur le bassin versant de Marly varie donc de façon significative selon la hauteur de pluie, et de manière moins affirmée mais réelle selon l'état initial et l'intensité de la pluie. La saison et la durée de la pluie n'interviennent pas de façon significative sur le coefficient d'écoulement.

Étude du coefficient d'écoulement dans chaque classe

Dans chacune des classes, on souhaite expliquer le coefficient d'écoulement par les variables durée, intensité de la pluie, hauteur précipitée, saison, et état initial du bassin. Reprenant les partitions effectuées ci-dessus, on a réalisé des régressions multiples sur chacune des séries.

Dans tous les cas, le coefficient varie peu autour d'une valeur moyenne.

Pour les faibles valeurs des variables caractéristiques de la pluie (intensité, hauteur, durée), on note l'influence de l'état initial, qui reste faible même si

elle est significative. Par exemple, pour la variable intensité moyenne de la pluie en huit minutes inférieure à 24 mm/h, on a :

$$C_c = 0,517 - 0,0370 i$$

où la constante est significative au seuil de 1 % et la variable « i » au seuil de 3 %. Le coefficient de corrélation est $R^2 = 0,48$ et l'écart-type de la régression est 0,09.

En revanche, pour les fortes valeurs des variables, le terme constant est souvent le seul significatif, et il vaut environ 0,56 (tableau VII). Cette valeur est voisine de celle du coefficient d'imperméabilisation (0,6), ce résultat confirme les conclusions de Desbordes (1984). Par exemple pour la variable intensité moyenne de la pluie en huit minutes inférieure à 24 mm/h, on a : $C_c = 0,567$, où la constante est significative au seuil de 1 % (écart-type de 0,095).

Pour ce qui est de l'influence des saisons, l'été fait apparaître une très légère variation du coefficient d'écoulement en fonction de l'état initial, alors que l'hiver le coefficient est pratiquement constant. Lorsque le bassin est humide (pluie consécutive à une pluie du même jour ou du jour précédent), aucune variable n'a d'influence réelle sur le coefficient d'écoulement. Dans le cas d'une pluie survenant après plus d'un jour sec, la hauteur précipitée a une influence significative sur le coefficient d'écoulement.

Afin de déterminer si notre évaluation par régression décrit de façon statistiquement satisfaisante l'ensemble des coefficients d'écoulement de l'échantillon, les coefficients d'écoulement estimés par la régression linéaire (en fonction de l'état initial) sont comparés aux valeurs expérimentales. Il est fait l'hypothèse que la répartition des valeurs réelles autour de la droite de régression suit une loi normale et que la variance est uniforme.

L'étude est faite sur les deux familles d'événements obtenues par la partition en fonction de la hauteur précipitée. Pour les fortes hauteurs, aucun écart n'est significatif au seuil de 5 %. Pour les faibles hauteurs, on trouve trois valeurs du coefficient d'écoulement dont les écarts sont significatifs : deux sont fortes (0,76 et 0,77), et une est faible (0,18). Pourtant, les hauteurs précipitées étant très faibles dans deux des cas, des erreurs plus importantes sont à attendre tant dans l'acquisition que dans l'exploitation des données, notamment en raison du débit des eaux usées. Une autre hypothèse est qu'une variable que nous n'avons pas répertoriée dans l'analyse joue un rôle qui peut être important dans l'explication du coefficient d'écoulement. Cette hypothèse n'est pas la plus vraisemblable.

Conclusion

Cette étude met en évidence l'existence d'un coefficient d'écoulement indépendant des caractéristiques de la pluie si celles-ci dépassent un certain seuil. Le coefficient d'écoulement prend alors en moyenne la valeur du coefficient d'imperméabilisation. Pour ces pluies, c'est le même mécanisme de transfert par ruissellement sur les surfaces imperméables qui est mis en jeu. Ce résultat permet de confirmer l'apport négligeable du drainage rapide d'origine souterraine. En-deçà de ce seuil, l'écoulement dépend de variables comme l'intensité (si l'intensité de la pluie est plus forte, une part plus importante du volume précipité s'écoulera vers l'exutoire de ce bassin au relief peu marqué), et surtout de l'état initial de la surface (une pluie faible ruissellera mieux sur un bassin humide que sur un bassin sec). L'échantillonnage ne permet pas de départager totalement les facteurs explicatifs, les pluies étant plus intenses en moyenne lorsque la surface du bassin est sèche (tableau IV). L'influence de la saison n'apparaît pas clairement.

Conclusion

Sur un petit bassin versant urbain occupé par un habitat de type petit collectif, nous avons mis en évidence l'intrusion de débits parasites dans le réseau, en liaison avec l'état d'humidité du sol. Cependant, lors d'un épisode pluvieux, cette variable n'influe ni sur la production ni sur le transfert.

Le coefficient d'écoulement atteint une valeur constante pour les pluies significatives, voisine du coefficient d'imperméabilisation, ce qui indique la mise en jeu du même mécanisme de ruissellement. Pour les pluies plus faibles, un bassin plus sec ou une pluie moins intense diminuent la production.

L'intensité a une influence notable sur le transfert : pour une pluie de forte intensité, le temps de montée de l'hydrogramme est plus court, et la décrue plus rapide. De la même façon, il semble

qu'une surface de bassin humide accélère le transfert. Ce dernier résultat, qui est physiquement facilement explicable, est à nuancer en raison de la différence entre les intensités moyennes de chacune des deux classes d'état initial considérées.

Ainsi, lors de crues en milieu urbain, les mécanismes de ruissellement sont prépondérants et le drainage rapide négligeable. En particulier, pour l'échantillon dont on dispose, il s'agit vraisemblablement de ruissellement sur les surfaces imperméables. Il est possible que, pour des caractéristiques de pluie plus importantes, le coefficient d'écoulement augmente avec l'extension des surfaces contributives due par exemple à la saturation de surfaces perméables (Boyd, Bufill, Knee 1993), mais ce phénomène n'a pas été observé sur le bassin de Marly.

Remerciements. Nous remercions la section Électricité de France de Toulouse, qui a mis à notre disposition le logiciel DPFT, et notamment Yves Rodriguez.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BALADÈS J.-D., LIVET M., GUILLIN J.-C., PILLOY J.-C. (1991), Quelques exemples d'utilisation des modèles hydrologiques, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **172**, mars-avril, pp. 79-92.
- BAREYRE S. (1995), *Étude de la variabilité du coefficient d'apport en milieu urbain*, Rapport de stage CETE/ENSEEIH, 34 pages.
- BOYD M.J., BUFILL M.C., KNEE R.M. (1993), Pervious and impervious runoff in urban catchments, *Hydrological Sciences Journal*, vol. 38, **6**, pp. 463-478.
- BREIL P., JOANNIS C., RAIMBAULT G., BRISAUD F., DESBORDES M. (1993), Drainage des eaux claires parasites par les réseaux sanitaires. De l'observation à l'élaboration d'un modèle prototype, *La Houille Blanche*, **1**, pp. 45-57.
- CHAPMAN T.G. (1993), New methods of unit-graphs and loss rate estimation applied to urban catchments, *Journal of Hydrology*, vol. 31, **2**, pp. 111-123.
- DESBORDES M. (1984), *Modélisation en hydrologie urbaine. Recherche et applications*, Thèse de l'université de Montpellier, 241 pages.
- DUBAND D. (1978), *Fonctions de transfert pluie-débit sur des bassins versants de l'ordre de 1 000 km²*, Note interne, EDF-DTG, Grenoble.
- GRÉSILLON J.-M. (1994), *Contribution à l'étude de la formation des écoulements de crue sur les petits bassins versants. Approches numériques et expérimentales à différentes échelles*, Diplôme d'habilitation, LTHE Grenoble, 158 pages.
- GRÉSILLON J.-M., OBLED C., NEYRET-GIGOT J.-M., LE MEILLIOUR F. (1994), *Variabilité de la fonction de transfert d'un bassin versant. Analyse des causes et essais d'interprétation. Crues et inondations*, **T1**, pp. 237-244, 23e journées de l'hydraulique, Congrès SHF, Nîmes, septembre.
- JENSEN M. (1990), Rain-runoff parameters for six small gauged urban catchments, *Nordic Hydrology*, **21**, pp. 165-184.
- JOANNIS C. (1994), Précision des estimations des débits d'eaux parasites d'infiltration dans les réseaux de collecte des eaux usées. Influence des erreurs de mesure et de la méthode de calcul, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **189**, janvier-février, pp. 71-87.
- MARC V. (1994), *Étude de la relation pluie-débit sur bassin versant en climat méditerranéen par le traçage chimique et isotopique naturel de l'eau*, Thèse de doctorat de l'université Montpellier II, 293 pages.
- NALBANTIS I. (1987), *Identification de modèles pluie-débit du type hydrogramme unitaire : développements de la méthode DPFT et validation sur données générées avec et sans erreurs*, Thèse de doctorat de l'Institut national polytechnique de Grenoble, 492 pages.
- NEYRET-GIGOT J.-M. (1992), *Analyse de la variabilité de la fonction de transfert d'un bassin versant et développement d'un modèle conceptuel faiblement paramétré : le modèle STORHY ; application au Real Collobrier*, Thèse de doctorat de l'université Joseph Fourier, Grenoble I, 240 pages.
- RAIMBAULT G., SILVESTRE P. (1990), Analyse des variations d'état hydrique dans les chaussées, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **167**, mai-juin, pp. 77-84.
- RAIMBAULT G. (1996), Effet des sols et sous-sols urbains sur le devenir des eaux pluviales, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **202**, mars-avril, pp. 71-78.
- SCHOBERT A. (1996), *Analyse de la variabilité des paramètres caractéristiques de l'hydrologie d'un bassin versant, et modélisation des crues en présence de données hydrologiques succinctes*, Thèse de doctorat de l'université Joseph Fourier, Grenoble I, 299 pages.
- SHERMAN L.K. (1932), Stream flow from rainfall by the unit-graph method, *Engin. News. Rec.*, **108**, pp. 801-805.

ABSTRACT

Analysis of the factors that influence dry weather and flood flows in an urbanized drainage basin

F.GOMIS, J.-M. GRÉSILLON, J.-D. BALADÈS

This paper presents an analysis of the factors involved in the response of an urbanized drainage basin to a rainfall event. It covers 43 episodes occurring on the Merly basin in Bordeaux, which has a surface area of 2,23 ha. The network is a combined system.

An examination of flow records in the absence of precipitation reveals the existence of a permanent low level of flow during dry weather whose rate depends on the level of ground moisture. The transfer function of the drainage basin has been computed using a numerical technique used in rural hydrology the (DPFT technique). This has given a hydrograph which although uninterrupted nevertheless depends on the characteristics of rainfall. The intensity of rainfall and the rate of transfer are related: on the other hand the amount of rapid underground drainage would seem to be negligible.

In the case of moderate and heavy rainfall, the coefficient of flow is independent of the characteristics of the rain, being close to the imperviousness coefficient. The same mechanism of run off transfer would therefore seem to be involved. For lighter rainfall, flow is above all determined by the initial surface state of the drainage basin.

Analyse des facteurs influant sur les écoulements de temps sec et de crue d'un bassin urbain