

Calibration et analyse de sensibilité du modèle de simulation continue de l'écoulement « STORM » *

Calibration and sensitivity analysis of the « STORM » continuous flow simulation model

J.-L. Sautier

Ingenieur du Génie rural,
1^{er} assistant,
École Polytechnique Fédérale
de Lausanne, Suisse

J.-W. Delleur

Professeur de Génie hydraulique
Purdue University,
West Lafayette, Indiana, U.S.A.

Le modèle STORM

L'écoulement total et l'hydrogramme horaire sont calculés par le modèle en chaque point du bassin versant et pour chaque crue. Différentes procédures sont utilisées pour les zones rurales, urbaines et semi-urbaines.

Zones rurales

Le modèle utilise la procédure du "Soil Conservation Service" qui emploie la relation suivante :

$$Q = (P - IA)^2 / P - IA + S \quad (1)$$

où :

Q = écoulement (inches)

P = précipitations (inches)

IA = abstraction initiale (inches)

S = capacité totale d'humidité du sol pour le stockage de l'eau (inches).

Comme le STORM est un modèle continu, il calcule la capacité d'humidité du sol (déficit) au début de chaque incrément de temps par l'équation suivante :

$$S_t = S_{t-1} - IN \cdot \Delta t + A \cdot EV \cdot \Delta t + B \cdot MP \cdot \Delta t \quad (2)$$

$$\text{avec : } A = 0.7((SM - S_{t-1})/SM)^v \quad (3)$$

$$B = ((SM - S_{t-1})/SM)^p \quad (4)$$

où :

S = capacité d'humidité du sol pour le stockage de l'eau (inches).

IN = taux d'infiltration maximum de l'abstraction initiale (inches/heures)

EV = taux d'évaporation en bac (in/h)

MP = taux de percolation maximum du sol (in/h)

SM = capacité maximale d'humidité du sol pour le stockage de l'eau (in)

t = temps

Δt = 1 heure

v = exposant régularisant l'évapotranspiration

p = exposant régularisant la percolation

Zones urbaines

L'écoulement en zone urbaine est estimé par la formule

$$r = C(P - f) \quad (5)$$

où :

r = écoulement en inches

C = coefficient composite de ruissellement

P = précipitations/fonte de la neige (inches)

f = stockage disponible dans les dépressions (inches).

Le coefficient composite de ruissellement est calculé par l'équation

$$C = C_P + (C_I - C_P) \sum_{i=1}^L X_i F_i \quad (6)$$

où :

C_P = coefficient de ruissellement pour surfaces perméables (in)

C_I = coefficient de ruissellement pour surface imperméables (in)

X_i = surface de la zone i , exprimée en % de la surface totale du bassin versant

F_i = fraction de la surface de la zone i qui est imperméable

L = nombre de zones i

Le stockage disponible dans les dépressions est calculé par l'équation

$$f = f_0 + N_D K \quad f \leq f_{\max} \quad (7)$$

(*) Modèle développé par The Hydrologic Engineering Center, U.S. Army Corps of Engineers, Davis, California, U.S.A.

où :

- f_0 = stockage disponible dans les dépressions (inches) à la fin de l'évènement pluie précédent
 N_D = nombre de jours sans pluie depuis la fin de l'évènement pluie précédent
 K = taux d'évaporation en bac (in/jour) représentant la reconstitution du stockage dans les dépressions
 f_{\max} = stockage maximum dans les dépressions (inches)

Zones semi-urbaines

Le mélange de zones perméables et imperméables, par exemple dans une zone de villas familiales, demande l'utilisation de :

- a) équations (1), (2), (3) et (4) pour les surfaces perméables
 b) équations (5), (6) et (7) pour les surfaces imperméables.

Bassin versant et données entrée-sortie

Le modèle STORM a été utilisé sur le bassin "Ross-Ade Upper", West Lafayette, Indiana. Les principales caractéristiques de ce bassin versant sont les suivantes :

- surface totale 29 acres (11.7 ha)
- surface imperméable 11 acres (4.4 ha) 38 %
- surface perméable 18 acres (7.3 ha) 62 %
- topographie plate à légèrement inclinée (collines).

Les données d'entrée utilisées dans l'analyse de sensibilité sont :

- pluie horaire en 1/100 d'in (.25 mm), du 20 avril 1970 au 29 novembre 1970 (225 enregistrements journaliers, 58 jours de pluie)
- évaporation moyenne en bac (inches/day) de janvier à décembre
- capacité maximale de stockage dans le sol = 3,5 in (89 mm)
- taux d'infiltration : .15 in/heure (4 mm/h)

Les valeurs de sortie (calculées et mesurées) utilisées pour la calibration sont les écoulements horaires en 1/100 d'inch. (.25 mm).

Puisque le bassin considéré comprend un pourcentage élevé (38 %) de surfaces imperméables, seules les options zone urbaine et zone semi-urbaine ont été testées.

Procédure d'analyse

Si A est la valeur exacte d'une certaine quantité et a une valeur approchée alors

- a) l'erreur exacte de la valeur approchée a est

$$\Delta a = A - a$$

- b) l'erreur relative de la valeur approchée a est

$$\delta a = \Delta a/a \quad (\text{généralement en } \%) \quad (8)$$

alors $A = a(1 + \delta a)$ (8a)

Dans le prochain paragraphe l'équation (8) est utilisée dans les équations (5) et (6) pour évaluer les erreurs dans l'estimation de l'écoulement sur les surfaces imperméables.

Zone urbaine

La notation suivante est utilisée dans le calcul des erreurs pour le coefficient composite de ruissellement.

- Y_F, Y_P, Y_I = erreur relative sur, respectivement, F, C_P et C_I
 Z_F, Z_P, Z_I = erreur relative sur C due à une erreur sur, respectivement, F, C_P, C_I
 Z_{PI} = erreur relative sur C due à des erreurs sur C_P et C_I
 Z_{FPI} = erreur relative sur C due à des erreurs sur F, C_P et C_I

4 affectations du sol sont considérées séparément.

Les caractéristiques de ces zones sont les suivantes :

- A : commerciale : $i = 1, F_1 = .90$ $C_P = .30$
 B : industrielle : $i = 2, F_2 = .70$ $C_I = .90$
 C : villas groupées : $i = 3, F_3 = .50$ avec $X_i = 1.00$
 D : villas isolées : $i = 4, F_4 = .30$ $L = 4$

Le comportement de l'erreur sur C est examiné comme une fonction de Y_F, Y_P et Y_I pour chaque utilisation du sol.

Pour une seule utilisation du sol, l'équation (6) devient

$$C = C_P + (C_I - C_P) F$$

Erreur sur le coefficient composite de ruissellement

Les erreurs relatives Z_F, Z_P et Z_I sur C , dues à une erreur relative Y_F, Y_P ou Y_I sur, respectivement, F, C_P ou C_I , sont obtenues de l'équation (6a) en utilisant la définition de l'équation (8) :

$$Z_F = \pm Y_F (1 - C_P/C) \quad (9)$$

$$Z_P = \pm Y_P (C_P/C) (1 - F) \quad (10)$$

$$Z_I = \pm Y_I (C_I/C) F \quad (11)$$

L'erreur relative Z_{PI} sur C , due à des erreurs relatives simultanées Y_P et Y_I sur, respectivement, C_P et C_I , est obtenue de l'équation (6a) en utilisant la définition de l'équation (8) :

$$Z_{PI} = Y_I (C_I/C) F + Y_P (C_P/C) (1 - F) \quad (12)$$

La principale source d'erreur provient de l'estimation des paramètres C_P et C_I . La figure 1 représente la moyenne des valeurs absolues de Z_{PI} pour une surface comprenant 4 types différents d'occupation du sol, représentant chacun le 25 % de la surface totale.

L'erreur relative Z_{FPI} sur C , due simultanément à des erreurs relatives Y_F, Y_P et Y_I sur, respectivement, F, C_P et C_I , est obtenue de l'équation (6a) et en utilisant la définition de l'équation (8) :

$$Z_{FPI} = Y_P (C_P/C) + (F/C) C_I [(Y_F + Y_F Y_I + Y_I) - C_P (Y_F + Y_F Y_P + Y_P)] \quad (13)$$

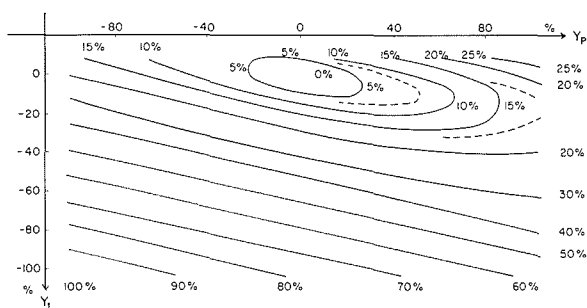


Figure 1 — Moyenne des valeurs absolues des erreurs relatives Z_{Pf} sur le coefficient composite de ruissellement, dues à des erreurs Y_P et Y_I sur le coefficient de ruissellement pour des surfaces respectivement perméables et imperméables, et sur une surface où 4 zones d'affectation sont également distribuées.

De l'analyse de l'erreur sur C , considérée comme une fonction de l'erreur commise sur ses composants, on déduit que :

- l'erreur relative sur le coefficient de ruissellement des surfaces imperméables est déterminante
- l'influence de l'erreur relative sur le coefficient de ruissellement des surfaces imperméables est pratiquement la même dans chaque zone d'affectation du sol, ou combinaison de zones
- l'erreur relative sur le coefficient composite de ruissellement est du même ordre de grandeur que l'erreur relative sur le coefficient de ruissellement des surfaces imperméables.
- l'influence de l'erreur relative sur le coefficient de ruissellement des surfaces perméables dépend des zones considérées
- une sous-estimation du coefficient de ruissellement des surfaces perméables est moins importante qu'une surestimation.

Erreur sur le stockage dans les dépressions

Généralement l'ordre de grandeur du stockage dans les dépressions est (2 mm) $1/16$ in $< f < 1/4$ in (6 mm). Les valeurs extrêmes correspondent, respectivement, aux zones totalement imperméables et totalement perméables.

Pour des degrés intermédiaires d'imperméabilisation f_{max} peut être estimé par la formule :

$$f_{max} = .25 (1.0 - IMP) + .06 IMP \quad (14)$$

où IMP = pourcent d'imperméabilisation.

Erreur dans l'évaluation de l'écoulement

La relation déterminant l'erreur sur l'écoulement est obtenue de l'équation (5), en supposant que le stockage disponible dans les dépressions est négligeable comparé aux précipitations, et en utilisant la définition de l'équation (8) :

$$Z_{RC} = Y_R + Y_C + Y_R C_C \quad (15)$$

où :

Z_{RC} = erreur relative sur l'écoulement due à des erreurs sur C et sur P

Y_R = erreur relative sur la pluie

Y_C = erreur relative sur le coefficient composite de ruissellement.

La relation (15) est représentée sur la figure 2.

Calibration

La calibration du modèle demande la détermination de 3 paramètres : les coefficients de ruissellement C_P et C_I et le stockage maximum dans les dépressions f_{max} .

Sur la figure 2 on peut remarquer qu'il existe une infinité de couples de valeurs "pluie-coefficient composite de ruissellement" qui produisent une erreur nulle. Mais peu d'entre eux ont une *signification physique acceptable*. Une façon de trouver des valeurs convenables pour les paramètres C_P , C_I et f_{max} est indiquée ci-dessous : (bassin versant Ross-Ade Upper)

- a) donnée d'entrée
 - précipitation horaires totales 1970 24.9 in (632 mm)
 - % de surface imperméable 38 %
 - écoulement mesuré pendant la même période 3.05 in (78 mm)

b) $f_{max} = .25 (1 - IMP) + .06 IMP = .18$ in (5 mm)

c) il y a environ 40 évènements pour lesquels la pluie dépasse le stockage maximum dans les dépressions

d) de l'équation (5) le coefficient composite de ruissellement est

$$c = r / (P - f) = 3.05 / (24.9 - 40 \times .18) = .18$$

e) de l'équation (6)

$$C = C_P + (C_I - C_P) F = 0.18$$

On remarque que C_I et C_P peuvent prendre les valeurs extrêmes suivantes :

$$\begin{aligned} C_I \text{ max} &= .47 & C_I \text{ min} &= .18 \\ C_P \text{ min} &= 0 & C_P \text{ max} &= .18 \end{aligned}$$

Les valeurs intermédiaires varient linéairement entre ces extrêmes.

f) La majorité des toits n'est pas raccordée directement à un collecteur, l'eau s'écoule donc sur les pelouses. Ceci explique la valeur faible de C_I .

g) un domaine correct de variation pour ces paramètres est :

$$(5 \text{ mm}) .18 \text{ in} \leq f \leq .25 \text{ in (6 mm)} ; \\ .30 \leq C_I \leq .40 ; .05 \leq C_P \leq .10$$

h) le modèle tourne avec ces premières estimations de f_{max} , C_I et C_P . La calibration finale est faite sur la base d'un ajustement entre les valeurs calculées et mesurées de l'écoulement total annuel.

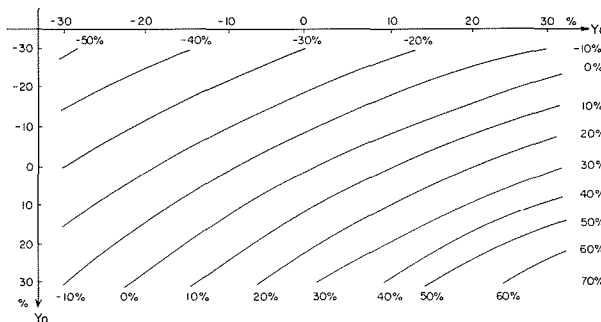


Figure 2 — Erreur relative Y_{RC} sur l'écoulement due à des erreurs relatives Y_R sur la pluie et Y_C sur le coefficient composite de ruissellement.

Tableau 1. — Liste des paramètres d'entrée calibrés	
Evaporation en bac : valeurs mensuelles en in/jour de janvier à décembre 0, 0, 0, 0.15, 0.14, 0.22, 0.29, 0.18, 0.14, 0.11, 0.02, 0.	
OPTION I	OPTION II
$C_p = 0.08$ $f_{max} = 0.23$ $C_l = 0.34$ $ERC = v = 3,0$ $\rho = 1.0$	zone de villas familiales isolées $F = 0.38$ $S_{max} = 3.50$ in $IA_{max} = 0.70$ in $S_{initial} = 1.50$ in $IA_{initial} = 0.25$ in $IN = 0.03$ in/h $MP = 0.05$ in/h

Les valeurs des données d'entrées calibrées sont groupées dans le tableau 1.

Evaluation des résultats (calibration finale)

Avec l'ensemble des valeurs d'entrée calibrées (Tableau 1), le modèle calcule l'écoulement et détermine le nombre d'événements pour lesquels les précipitations excèdent le stockage maximum dans les dépressions. Dans ce cas le modèle a sélectionné 42 événements.

La quantité totale de l'écoulement observé (3.05 in, 77.5 mm) est distribuée entre les 42 événements sélectionnés par le modèle. Un ajustement a été tenté, à l'aide d'une distribution simple, pour représenter l'ensemble des valeurs calculées et l'ensemble des carrés des écarts (observés-calculés).

Une distribution Gamma, (k, λ) a été choisie pour l'ajustement (cf. Fig. 3). Une procédure d'ajustement identique est utilisée pour le débit de pointe par événement.

Analyse de sensibilité, modification du stockage f_{max} dans les dépressions

En modifiant la valeur du coefficient composite de ruissellement ou de la pluie, on peut voir sur la figure 2, que l'erreur relative Y_R sur la pluie, avec $Y_C = 0$, ou, au contraire, que l'erreur relative Y_C sur le coefficient composite de ruissellement, avec $Y_R = 0$, produit des erreurs sur l'écoulement Z_{RC} de même ordre de grandeur. Ce n'est plus le cas lorsque la valeur de f_{max} est modifiée autour de sa valeur de calibration. Les résultats obtenus montrent la variation du nombre d'événements et de la quantité totale d'écoulement pour différentes valeurs de f_{max} (cf. Tableau ci-dessous).

Valeurs de f_{max}		Nombre d'événements	Vol. tot. d'écoulement	
(in)	(mm)		(in)	(mm)
.18	4.6	45	3.25	80.6
.21	5.3	44	3.13	79.5
.23	5.8	42	3.06	77.7
.25	6.4	42	2.99	76.0

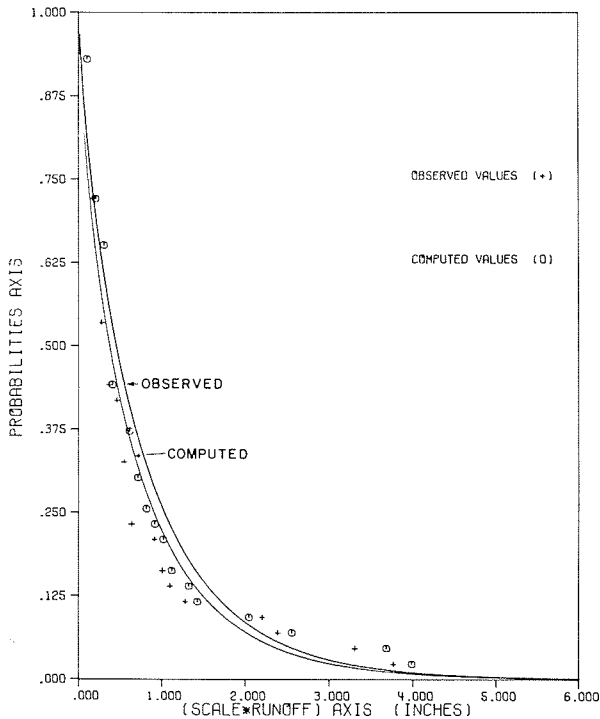


Figure 3 – Volumes totaux d'écoulement observés et calculés, par événement, en zone urbaine.

Les testes du χ^2 et de Kolmogorov-Smirnov ont été appliqués avec un niveau de signification de 5 % sur le volume total d'écoulement (observé et calculé) et sur le débit de pointe par événement. Tous les résultats conduisent à la conclusion que le modèle choisi (Gamma) ne doit pas être rejeté.

Conclusions

L'analyse de la méthode du coefficient composite de ruissellement du modèle STORM en zone urbaine montre :

- la calibration aisée des paramètres
- la très grande importance du coefficient de ruissellement pour les surfaces imperméables et la nécessité de déterminer sa valeur à $\pm 10\%$
- la stabilité du modèle autour des valeurs de calibration de ses paramètres
- une bonne simulation du volume total et du débit de pointe par événement
- un ajustement acceptable par une distribution Gamma.

Zone semi-urbaine

La procédure utilisant les équations (1), (2), (3) et (4) pour la détermination de l'écoulement en zone ru-

rale est plus sophistiquée que celle utilisée pour la détermination de l'écoulement en zone urbaine. Comme il n'existe pas de variable globale représentant un phénomène tel que la pluie, l'abstraction initiale et le stockage de l'humidité dans le sol sont couplés d'une façon non linéaire pour déterminer l'écoulement. Le comportement du volume total d'écoulement est alors analysé comme une fonction de chaque paramètre considéré séquentiellement.

Examinant l'effet produit par des variations du taux d'infiltration maximum et du taux de percolation maximum sur le volume annuel de l'écoulement, on a trouvé que lorsque les valeurs maximum des taux d'infiltration et de percolation sont supérieures à environ 0.2 in/h (5 mm/h), l'influence de ces 2 paramètres sur l'écoulement est négligeable. S'il y a, sous l'horizon supérieur du sol, une couche formée de particules argileuses, les valeurs de ces paramètres deviennent faibles et l'écoulement augmente d'une manière significative. La figure 4, montre l'influence, sur le volume annuel d'écoulement, d'erreurs relatives commises sur la valeur de départ et la valeur maximale de rétention d'humidité du sol. La *capacité maximale* de rétention d'humidité du sol caractérise le sol à chaque itération et détermine pratiquement la quantité d'eau disponible pour l'écoulement de surface. C'est pourquoi ce paramètre est primordial. La *valeur de départ* de la capacité de rétention concerne seulement la première itération du calcul et n'a pas d'influence mesurable sur la quantité annuelle de ruissellement. La figure 5 montre comment varie l'écoulement total annuel en fonction d'erreurs relatives commises sur les valeurs maximales et les valeurs de départ de la capacité d'abstraction initiale. Comme il y a une relation entre l'humidité du sol et la capacité d'abstraction initiale, des effets similaires à ceux constatés pour la rétention d'humidité du sol sont observés pour la capacité d'abstraction initiale. La valeur de départ de l'abstraction initiale n'a pas d'influence mesurable sur l'écoulement total annuel, alors que l'effet de sa valeur maximale est décisif. L'écoulement total annuel est affecté par les variations des exposants régularisant l'évaporation et la percolation. Après quelques expériences une faible variation de l'écoulement fut observée en modifiant ces deux para-

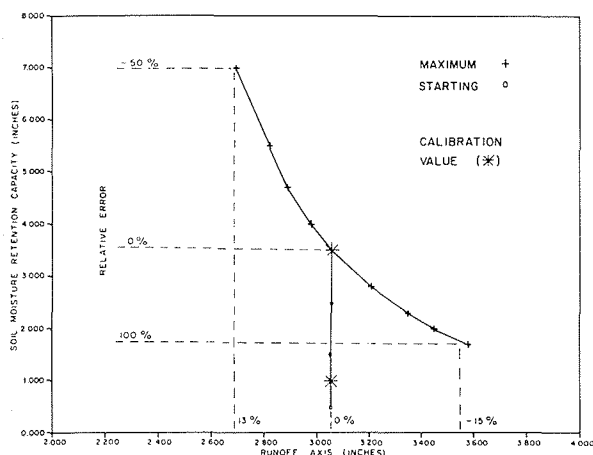


Figure 4 - Variation de l'écoulement total, due à des variations des valeurs maximales et de départ de la capacité de rétention de l'humidité du sol.

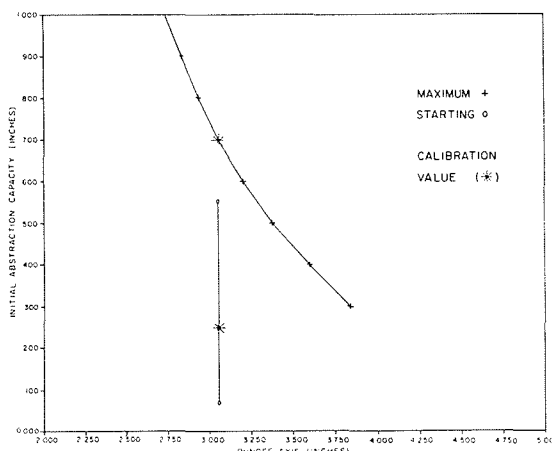


Figure 5 - Variation de l'écoulement total, due à des variations des valeurs maximales et de départ de la capacité d'abstraction initiale.

mètres entre 1 et 5, les autres paramètres conservant leur valeur de calibration. Une erreur relative commise sur l'évaporation en bac exerce peu d'effet sur l'écoulement. D'ailleurs cette erreur relative n'est jamais très importante.

Calibration

A partir d'une carte des sols, d'échantillons de sols et d'essais en laboratoire et in situ, on obtient les données suivantes :

- capacité maximale de rétention des sol = 3.5 in (89 mm)
- taux d'infiltration max. = .3 - .6 in/h (8 - 15 mm/h)
- taux de percolation max. = .5 - .6 in/h (13 - 15 mm/h)
- taux d'infiltration = .15 in/h (4 mm/h)

En utilisant la relation $IA = .2 * S$, la valeur de la capacité d'abstraction initiale maximum est de .7 in (18 mm).

Comme le taux d'infiltration a une valeur faible (.15 in/h (4 mm/h)), on admet en première approximation les valeurs inférieures suivantes :

- taux d'infiltration max
- taux de percolation max

Les valeurs de l'évaporation en bas sont considérées comme satisfaisantes. Les 2 exposants régularisant l'évapotranspiration et la percolation doivent être calibrés pour obtenir une valeur correcte de l'écoulement total.

Résultats

Comme en zone urbaine, une distribution Gamma (k, λ) est employée pour ajuster les distributions de probabilité des écoulements calculés par événements (Fig. 6). Des tests de signification et des intervalles de confiance ont été essayés. Les résultats ne sont cependant pas aussi satisfaisants que ceux obtenus pour la zone urbaine.

Conclusions

L'analyse de la procédure combinée - méthode de coefficient composite de ruissellement pour les surfaces

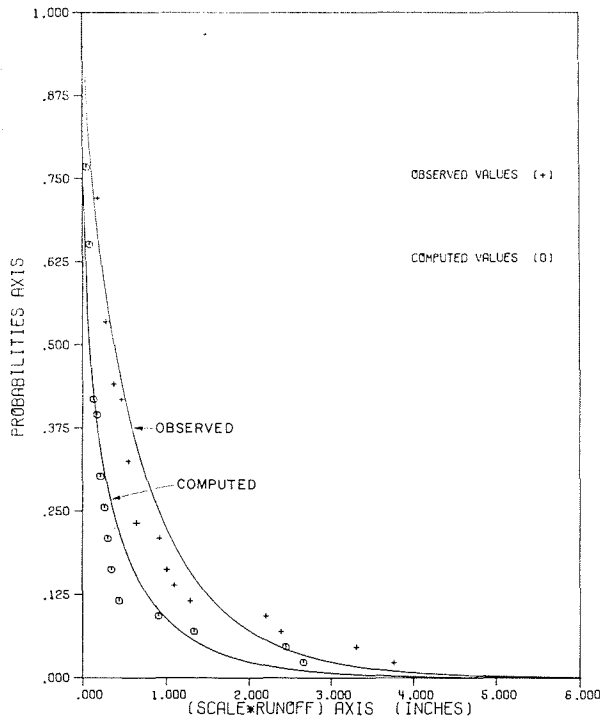


Figure 6 — Ecoulement total, observé et calculé, par événement, en zone semi-urbaine

imperméables et méthode du SCS pour les surfaces perméables appliquées ensemble à un même bassin versant semi-urbain — montre :

- une calibration aisée des paramètres
- l'importance très grande jouée par la capacité maximale de rétention de l'eau dans le sol

- l'aide apportée par une carte des sols
- un modèle stable autour des valeurs de calibration des paramètres
- une assez bonne simulation (écoulement total et maximum (pointe) par événement)
- l'utilisation satisfaisante d'une distribution Gamma à 2 paramètres.

Remarques générales

Cette étude a été menée sur le bassin versant "Ross-Ade Upper" et les résultats quantitatifs obtenus ne sauraient être transposés sur un autre bassin versant car chaque bassin est unique. Néanmoins la méthode développée pour la calibration du modèle et pour l'analyse de sensibilité reste transférable sur d'autres bassins.

Bibliographie

- [1] *Storage, Treatment, Overflow, Runoff Model STORM*. — The Hydrologic Engineering Center, U.S. Army Corps of Engineers, Davis, California, Users Manual, July 1976.
- [2] ABBOTT J.W. — *Guidelines for Calibration and Application of the STORM Model*, The Hydrologic Engineering Center, U.S. Army Corps of Engineers, Davis, California, December 1977.
- [3] Soil Conservation Service. — USDA, National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology, August 1972.
- [4] HOSSAIN A., DELLEUR J.W., and RAO A.R. — *Evaporation, Infiltration and Rainfall-Runoff Process in Urban Watersheds*, Purdue Univ. Water Res. Res. Center, Tech. Rept. No. 41, January 1974. (Available from NITIS, P.B. 229642).

Abstract

Calibration and sensitivity analysis of the "STORM" continuous flow simulation model

This study relates to the hourly continuous runoff simulation model STORM. This model provides a substantial improvement over the elementary rainfall-runoff transformations, without being so sophisticated as to become cumbersome, in the practice by consulting engineer offices of small size. Using the composite runoff coefficient method in an urban watershed and in addition, the Soil Conservation Services method for the pervious areas in a semi-urban watershed, a methodology is developed to calibrate the parameters characterizing the equations relating to each of these two methods. A sensitivity analysis of the model is done around the calibration values of the parameters.

In an urban area, the runoff coefficient for impervious surfaces is a decisive parameter. Usually the relative error in the runoff is of the same magnitude as the relative error in this parameter. The other parameters require less care in their determination.

In semi-urban areas the decisive parameter is the maximum soil moisture retention capacity. Its determination requires a

laboratory analysis. Some empirical relations and a soil map provide good estimates for the other parameters.

The two methods of analysis show that the yearly total amount of runoff, the total amounts of runoff by storm event and the peaks by event are all good and stable estimates. The choice of the method depends on the percent of imperviousness. Above 30% imperviousness the first method is recommended and around 30% of imperviousness, the use of both methods is suggested. A goodness-of-fit and a confidence interval calculation show that the amounts of runoff by event and the runoff peaks can be fitted by a Gamma distribution.

In addition the model STORM calculates hourly hydrograph ordinates. However, for the watershed under study it was not possible to obtain reliable results before the peak time, because of the short time of concentration which was approximately 30 minutes.

This study should provide the user with additional assistance and confidence in choosing the input parameters which require some degree of engineering judgment.