

Développement d'un nouveau modèle pour la simulation en continu des écoulements dans les surfaces perméables

Hamouda Boutaghane.^{1,2}, Bernard Chocat¹, Lahbassi Ouerdachi², Nacer Kherici³

¹Laboratoire de Génie Civil et d'Ingénierie Environnementale, INSA de Lyon,
34 Avenue des Arts 69621 Villeurbanne Cedex, France

²Laboratoire d'Hydraulique et de Constructions Hydrauliques
Université Badji Mokhtar Annaba, BP 12, -Algérie

³Laboratoire de Recherche de Géologie, Université Badji Mokhtar Annaba, BP 12, -Algérie

Révisé le 22/03/2012

Accepté le 23/04/2012

ملخص

إن المناطق شبه الحضرية تتميز بتوسع عمراني متقطع حيث تعد منطقة تواصل بين المناطق الريفية والمناطق الحضرية في العالم. إن المناطق الحضرية عبارة عن فسيفساء شبه حضرية وشبه ريفية، ففي حال التمكن من وضع نماذج هيدرولوجية للأحواض الحضرية والريفية، إلى وقت قريب كان من المستحيل تطبيق المبادئ بصفة واقعية على الأحواض شبه الحضرية للنموذج. هذا المقال يعرض التطورات الحديثة للنموذج الهيدرولوجي الحضري كنوي، فهذه التحسينات تتعلق بالوظائف الإنتاجية للمناطق النفاذية. هذه المهام صيغت بطريقة متواصلة زمانياً.

الكلمات المفتاحية: نمذجة هيدرولوجية - المحاكاة المتواصلة - الإمتصاص - المناطق النفاذية - الفيضان - حوض ايزرون - نموذج كنوي

Résumé

Les surfaces périurbaines se caractérisent par une extension urbaine discontinue. Zone de contact entre le monde rural et l'univers urbain, les surfaces urbaines sont une mosaïque mi-urbaine, mi-rurale. Si on a pu mettre au point des modèles hydrologiques pour les bassins urbains et les bassins ruraux, il a été jusqu'à une date récente impossible d'appliquer ces principes de façon concrète aux bassins périurbains. Cet article présente les nouveaux développements du modèle d'hydrologie urbaine Canoe. Ces développements concernent les fonctions de productions des surfaces perméables. Ces processus sont modélisés d'une manière continue dans le temps.

Mots-clés : Modélisation Hydrologique - Simulation continue – Infiltrations - Surface perméable – Crue - Bassin de l'Yzeron - Modèle Canoe.

Abstract

Periurban areas are characterized by discontinuous urbanization. The peri-urban areas are half-urban and half-rural mosaic. Nowadays, hydrology models are focused specifically on urban basins or rural basins. Almost no model is suitable for studying the transformation of rainfall-runoff peri-urban basins. In this paper we present new developments of the Caone's urban hydrological model. These developments relate to the production functions of pervious area. These processes are modeled in continuous time.

Keywords: Hydrological modeling - Continuous simulation – Infiltration - Pervious area, Flood - Yzeron watershed - Canoe model.

Auteur correspondant : boutaghane.hamouda@univ-annaba.org

1. INTRODUCTION

La genèse des débits dans les cours d'eau drainant des bassins versants est le résultat de la conjugaison de deux familles de processus, superficiels et souterrains. Se produisant à des vitesses très différentes, ces processus mobilisent des eaux d'âge, d'origine et de cheminements très distincts. Ils peuvent apparaître dans différentes combinaisons, de manière concomitante ou successive, dans le temps et dans l'espace. Ils dépendent de plusieurs facteurs qui contrôlent à la fois le déclenchement, l'intensité et l'arrêt de ces processus [1]. Il existe de nombreux modèles hydrologiques. Pour représenter ces processus, qui varient en nature et en complexité, l'établissement d'une typologie est difficile et ambiguë du fait de la variété des critères de classification possible des modèles [1-6]. Jusqu'au milieu des années 1960, la modélisation hydrologique portait essentiellement sur le développement des concepts, des théories et des modèles. L'introduction de l'informatique a permis l'intégration des différentes composantes du cycle hydrologique et leurs simulations. La littérature compte plusieurs synthèses générales sur l'art de la modélisation hydrologique [2, 7, 8] et des synthèses traitant de sujets spécifiques [9-12].

Les surfaces périurbaines se caractérisent par une extension urbaine discontinue. Elles s'étendent entre les marges de la ville et les frontières de l'espace rural formant une mosaïque mi-urbaine, mi-rurale [13-15]. Elles connaissent un mouvement d'extension sans précédent depuis la fin des années 1960 : exemple du bassin versant de l'Yzeron, Lyon (voir Fig.7a). Il existe peu d'exemples où les zones périurbaines ont été traitées de manière intégrée. La représentation du fonctionnement hydrologique de ces surfaces ne peut se faire que par la considération aussi bien des processus urbains que des processus ruraux [16].

Cet article, présente de nouveaux développements dans le modèle d'hydrologie urbaine Canoé de l'INSA de Lyon relatif aux processus de production des surfaces perméables. Ce qui permet de mieux comprendre les phénomènes de crue et d'inondation par l'intégration des différents processus de genèse des écoulements. Ces processus sont modélisés d'une manière continue. En effet, lorsqu'on s'intéresse à la

simulation ou à la prévision des crues, les modèles sont souvent utilisés de manière événementielle. Par rapport à la simulation en continue, l'utilisation événementielle des modèles pose quelques problèmes [10, 17]: la méthode de séparation des événements pluviométriques est subjective et dépend de l'utilisateur; l'optimisation des paramètres d'un modèle sur quelques événements peut poser des problèmes de validation sur la totalité des autres événements; les conditions initiales et l'initialisation des réservoirs d'un modèle ont une large influence sur la qualité de la simulation d'une crue. Le mode de simulation en continu présente l'avantage d'étudier l'ensemble des situations hydrologiques possible dans un bassin versant, ce qui est nécessaire lorsqu'on a pour objectif de développer un modèle robuste et général [17].

2. DESCRIPTION DU MODELE

2.1 Version antérieure du modèle

Dans la version antérieure, la fonction de production des surfaces perméables est représentée par une seule couche de sol (Fig.1a). Seul l'écoulement de surface, type hortonien, est considéré. L'infiltration est considérée comme perte, l'évapotranspiration n'est pas comptabilisée dans le bilan [18].

Le modèle fonctionne uniquement en mode événementiel qui ne donne pas une bonne représentation de phase de décrue (Fig. 1b) d'où la nécessité d'intégrer de nouveaux développements, objets de notre proposition dans la nouvelle version pour l'améliorer.

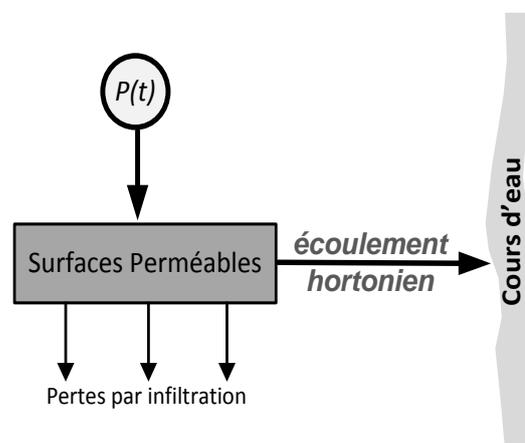


Figure 1a. Version antérieure du modèle Canoé

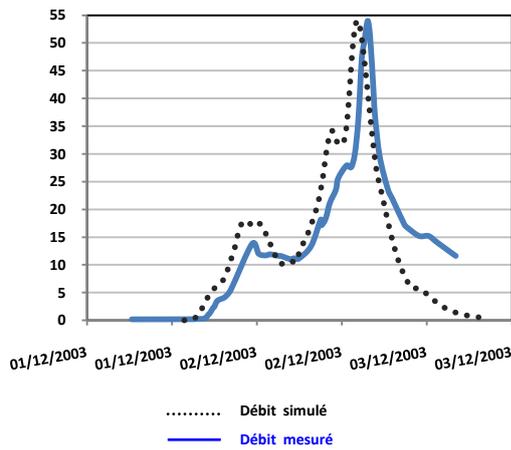


Figure 1b. Simulation de la crue du 02/12/2003. (Nash = 0.73 et RMSE = 5.08). décrue mal simulée

2.2 Amélioration du modèle

Dans le nouveau développement que nous

proposons, les variables et les flux du modèle sont définis de manière à représenter les macro-processus liés à l'infiltration et à la redistribution verticale de l'eau dans les couches du sol correspondant à un sous-bassin. Le profil longitudinal du sol est divisé en trois couches (Fig. 2). La surface du sol est représentée par le réservoir de surface (R1).

La deuxième couche représente la partie non-saturée du sol, dénotée réservoir de sub-surface (R2).

La dernière couche, schématisée par le réservoir sous-sol (R3), représentant l'aquifère, contrôle le débit de base. Les pertes initiales, l'infiltration, l'écoulement de surface (rapide et retardé), l'évapotranspiration, la percolation, les écoulements de sub-surface (rapide et retardé) et l'écoulement de base sont simulés pour chaque pas de temps.

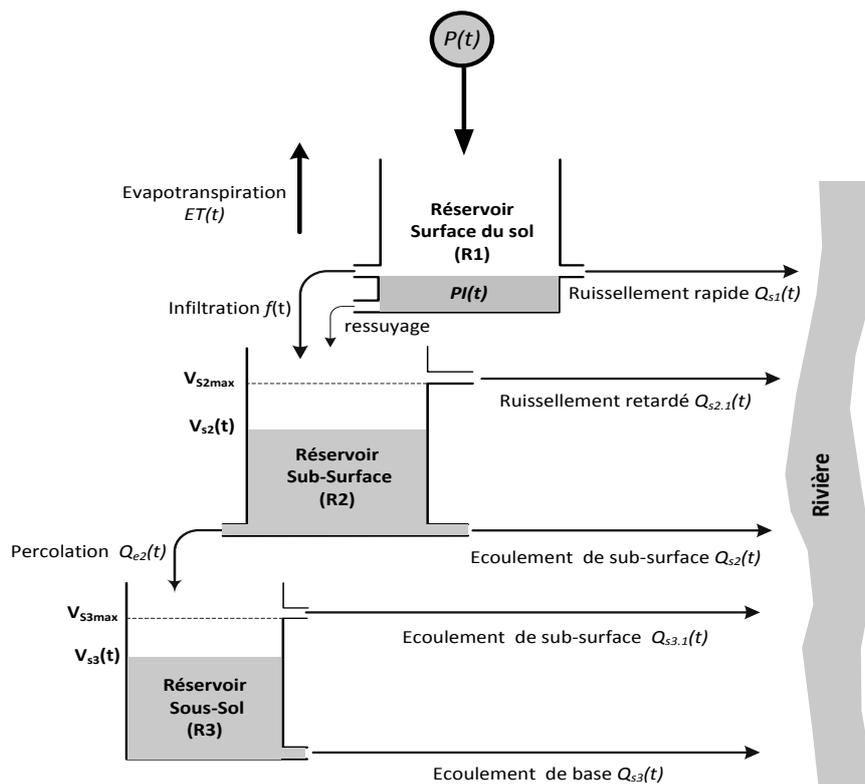


Figure 2. Modèle à trois réservoirs pour les surfaces rurales

Le réservoir de surface du sol (R1), reçoit la précipitation $P(t)$ dont une partie est stockée sous forme de pertes initiales $PI(t)$ et évacuée par ressuyage. Ce réservoir contrôle les flux d'infiltration $f(t)$ et la composante rapide de l'écoulement de surface $Q_{s1}(t)$. Le réservoir de sub-surface reçoit l'infiltration $f(t)$ du réservoir

(R1). Il contrôle (i) le drainage $Q_{e2}(t)$ représentant la percolation vers le sol profond, (ii) la composante rapide de l'interflow $Q_{s2}(t)$, et (iii) l'écoulement par refus d'infiltration $Q_{s2,1}(t)$: deuxième composante de l'écoulement de surface, apparaissant quand le sol est saturé (ruissellement retardé).

Ce réservoir contrôle aussi les pertes par évapotranspiration $ET(t)$. Le réservoir sous-sol (R3) reçoit le débit de drainage $Q_{e2}(t)$, et contrôle le débit de base $Q_{s3}(t)$ et la composante retardée de l'interflow $Q_{s3,1}(t)$ qui intervient lorsque le réservoir sous-sol est saturé (écoulement de sub-surface retardé). Les réservoirs de sub-surface et de sous-sol se caractérisent par une capacité de stockage limite, représentée par V_{2max} et V_{3max} volume de stockage maximum de chaque couche. Les termes $V_{s2}(t)$ et $V_{s3}(t)$ représentent, respectivement, les volumes du stock d'eau dans les réservoirs (R2) et (R3) à l'instant (t) .

Le bilan hydrologique vertical pour chaque couche, ainsi que les flux sont déterminés à partir du système d'équations suivantes :

- Equation de continuité :

$$\frac{dVs_i}{dt} = \sum Q_{e_i}(t) - \sum Q_{s_i}(t) \quad (1)$$

- Equation de stockage :

$$Vs_i(t) = k_i \cdot Q_{e_i}(t) \quad (2)$$

Avec :

$Vs_i(t)$: Volume stocké au réservoir i à l'instant t [m^3];

k_i : lag time du réservoir i [h].

$\sum Q_{e_i}(t)$: Somme des flux entrants dans le réservoir i [m^3/s];

$\sum Q_{s_i}(t)$: Somme des flux sortants du réservoir i [m^3/s].

2.3 Modélisation des processus

2.3.1 Le processus d'infiltration

L'estimation du flux d'infiltration sur un bassin versant est complexe. Cette complexité est induite par la forte variabilité spatiale des caractéristiques hydrodynamiques des sols. La principale conséquence de cette variabilité est la non-linéarité de la réponse hydrologique du bassin versant aux précipitations. En hydrologie appliquée, la tendance est d'utiliser des modèles relativement simplifiés. Ce sont des modèles conceptuels à réservoir ou des modèles se basant sur des fonctions décroissantes de la capacité d'infiltration [7, 19]. La modélisation en continue des écoulements exige de disposer d'un modèle d'infiltration en continue. Ce type de modèle doit être tel que la capacité d'infiltration du sol soit fonction du stock d'eau disponible en surface et du stock d'eau

emmagasiné dans la zone de sub-surface. Le modèle doit aussi permettre la récupération de la capacité de l'infiltration du sol lorsque le régime de l'alimentation est inférieur à la capacité d'infiltration. Le processus de récupération de la capacité d'infiltration résulte principalement du drainage de l'eau de la zone de sub-surface vers la nappe (percolation) et des pertes par évapotranspiration. La récupération de la capacité d'infiltration peut être complète ou partielle (Fig. 3).

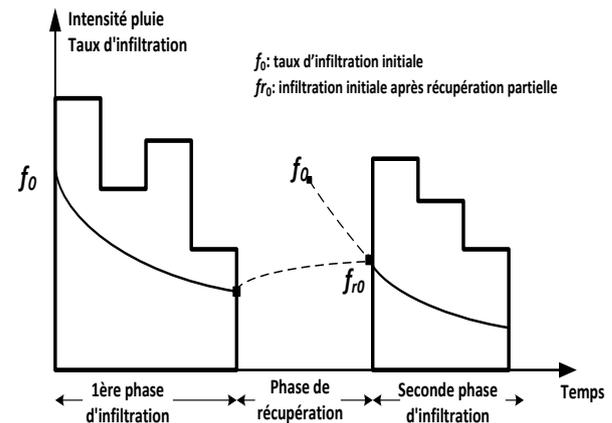


Figure 3. Processus d'infiltration et de récupération durant un évènement pluviométrique composé.

L'équation de base de notre développement est celle de Horton (1933), largement utilisée pour l'estimation de la capacité d'infiltration d'un sol. Elle s'exprime par l'équation suivante :

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (3)$$

Avec :

$f(t)$: capacité d'infiltration au temps t [mm/h];

f_0 : capacité d'infiltration initiale dépendant surtout du type de sol [mm/h];

f_c : capacité d'infiltration finale [mm/h];

t : temps écoulé depuis le début de l'averse [h];

k : constante empirique, fonction de la nature du sol [min^{-1}].

Plusieurs travaux proposent des modifications de l'équation de Horton pour estimer l'infiltration dans des conditions d'intermittence des précipitations [20-24]. Une adaptation de la formule de Horton est proposée de manière à ce que la capacité d'infiltration soit en fonction de l'état de saturation du sol et de sa capacité maximum de stockage dans la couche de sub-surface (Fig. 4). Cette formulation doit vérifier les deux conditions suivantes :

1. Lorsque le sol est totalement sec :

$$Vs_2(t) = 0 \quad \text{et} \quad f(t) = f_0$$

2. Lorsque le sol est totalement saturé :

$$V_{s2}(t) = V_{s2max} \quad \text{et} \quad f(t) = f_c$$

L'équation (3) devient alors :

$$f(t) = f_c + C \cdot e^{-\alpha V_s(t)} - C \cdot e^{-\alpha V_{max}} \quad (4)$$

$$V_s(t) = V_{max} \Rightarrow f(t) = f_c$$

On cherche C pour que $f(0) = f_0$

$$C = \frac{f_0 - f_c}{1 - e^{-\alpha V_{max}}} \quad (5)$$

C : est une constante durant un évènement.

L'équation de la capacité d'infiltration est exprimée en fonction du niveau du stock dans le réservoir de sub-surface de la forme suivante :

$$f(t) = f_c + \frac{f_0 - f_c}{1 - e^{-\alpha V_{s2max}}} e^{-\alpha V_{s2}(t)} - \frac{f_0 - f_c}{1 - e^{-\alpha V_{s2max}}} e^{-\alpha V_{s2max}} \quad (6)$$

- Avec : f_0 : taux d'infiltration initial [mm/h] ;
- f_c : taux d'infiltration final [mm/h] ;
- α : paramètre de décroissance exponentiel exprimé en [mm⁻¹].
- V_{2max} : stockage maximum dans le réservoir de sub-surface en [mm] ;
- $V_{s2}(t)$: stockage dans le réservoir de sub-surface à l'instant t en [mm].

La formulation (6) donne une estimation de la capacité d'infiltration $f(t)$ en fonction de l'état de stock $V_{s2}(t)$ à l'instant t et du niveau de saturation du sol. Le stock d'eau $V_{s2}(t)$ est vidangé en même temps par les flux de percolation et d'évapotranspiration.

2.3.2 Ecoulement de surface rapide (ruissellement)

Le débit de ruissellement de surface rapide $Q_{S1}(t)$ est dû à un dépassement de la capacité d'infiltration du sol. Pour chaque pas de temps dt , le débit de ruissellement rapide est donné par l'équation suivante :

$$Q_{S1}(t) = I(t) - f(t) - PI(t) \quad (7)$$

Avec :

- $Q_{S1}(t)$: débit de ruissellement de surface ;
- $I(t)$: intensité de précipitation ;
- $f(t)$: débit d'infiltration ;
- $PI(t)$: perte initiale.

2.3.3 Débit de percolation

Le débit de percolation (drainage par gravité) est souvent considéré comme une valeur croissante du stock d'eau dans la couche de sub-surface. Le débit de drainage $Q_{e2}(t)$ est paramétré, pour chaque pas de temps dt , en fonction de l'état de saturation de la couche de sub-surface. Il est donné par la relation suivante :

$$Q_{e2} = \frac{V_{S2}(t)}{V_{S2max}} \cdot f_c \quad (8)$$

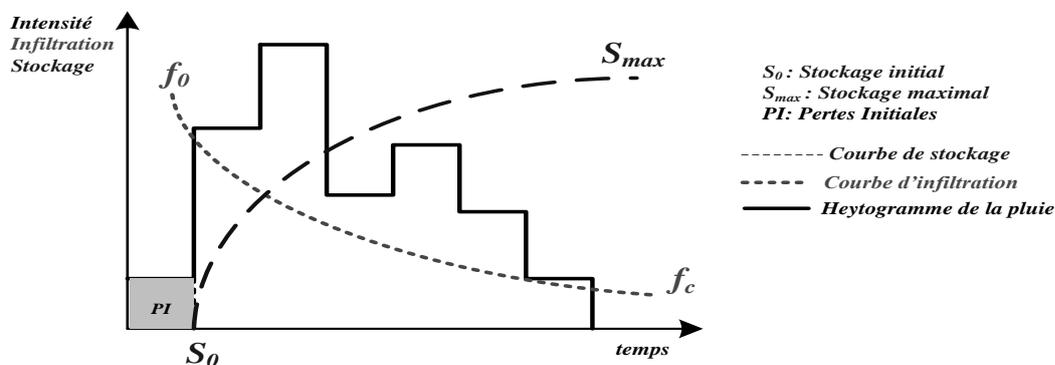


Figure 4. Relation entre stock et capacité d'infiltration

2.3.4 Ecoulement de sub-surface rapide

L'écoulement de sub-surface rapide est déterminé, pour chaque pas de temps dt , selon la capacité de drainage du sous-sol

- Si le réservoir de sub-surface n'est pas saturé, le drainage n'atteint pas sa valeur maximale f_c :

$$Q_{s_2}(t) = \frac{dV_{s_2}}{dt} + f(t) - Q_{e_2}(t) \quad (9)$$

- Si le réservoir de sub-surface est saturé, le drainage est maximum :

$$Q_{s_2}(t) = \frac{Vs_2(t)}{k_2} \quad (10)$$

k_2 : coefficient de récession du réservoir de sub-surface.

2.3.5 Ecoulement de surface retardé (ruissellement retardé)

C'est une composante du ruissellement de surface qui est dû au refus d'infiltration causé par la saturation du réservoir de sub-surface (R3) (saturation du bas).

Le débit de surface retardé $Q_{s_{2,1}}(t)$ est estimé comme suit :

$$\text{Si } V_{s_2}(t) \leq V_{s_{2max}} \text{ lors } Q_{s_{2,1}}(t) = 0 \quad (11)$$

Si $V_{s_2}(t) > V_{s_{2max}}$ alors

$$Q_{s_{2,1}}(t) = \frac{V_{s_{2max}} - V_{s_2}(t-1)}{dt} + f(t) - Q_{s_2}(t) - Q_{e_2}(t) \quad (12)$$

2.3.6 Les pertes par évapotranspiration

L'évapotranspiration, composante importante du bilan hydrique à toutes les échelles spatiales, est l'un des processus hydrologiques le plus difficile à analyser.

Une des conséquences de l'utilisation croissante des modèles continus, est l'attention particulière qui doit être donnée à la modélisation appropriée du processus d'évapotranspiration [25-27].

La représentation conceptuelle la plus simple des pertes par évapotranspiration est faite à

partir des valeurs évapotranspirations potentielles [28, 29].

Les pertes par évapotranspirations $ET(t)$ sont estimées à partir des valeurs d'évapotranspiration potentielle journalière $ETP(j)$ de l'état de saturation du sol et de l'état du couvert végétal.

Les pertes $ET(t)$ sont estimées par la formule suivante :

$$ET(t) = k_c \cdot k_s \cdot ETP(j) \quad (13)$$

Avec :

$ET(t)$: perte par évapotranspiration au pas de temps t [mm] ;

$ETP(j)$: évapotranspiration journalière [mm/j] ;

K_c : coefficient cultural, fonction du type de culture et de son état végétatif, $0 < K_c \leq 1$;

K_s : coefficient de saturation du sol, $k_s = \frac{V_{s_2}(t)}{V_{s_{2max}}}$

Les pertes par évapotranspiration sont représentées par un stock. A chaque pas de temps, les stocks et les flux transitant sont calculés selon le principe de résolution du système d'équation (paragraphe 3). La figure 5 représente le macro-modèle.

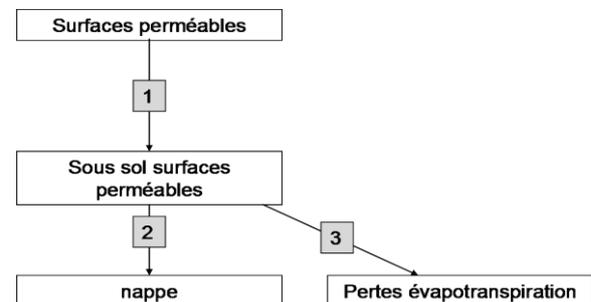


Figure 5. Schéma du macro-modèle infiltration-évapotranspiration-percolation

1 : flux infiltration

2 : flux drainage vers nappe

3 : flux d'épuisement par évapotranspiration

Nous considérons que l'infiltration se fait entièrement du sol vers le sous-sol et que le sous-sol transfère en même temps l'eau vers la nappe. Le modèle d'infiltration (sol vers sous-sol) et le modèle de drainage pendant la pluie (sous-sol vers nappe) sont construits conjointement de façon à pouvoir relier le stock dans le sous-sol au temps. Le transfert vers la nappe se poursuit de la même manière après la fin de la pluie et une perte par évapotranspiration peut également contribuer à l'épuisement du stock du sous-sol

2.3.7 Ecoulement de base

Le débit de base $Q_{s3}(t)$ est déterminé en fonction du niveau d'eau dans le réservoir sous-sol en utilisant la formule suivante :

$$Q_{s3}(t) = \frac{V_{s3}(t)}{k_3} \quad (14)$$

Avec :

- $Q_{s3}(t)$: débit de base [m^3/s];
- $V_{s3}(t)$: volume stocké dans le réservoir sous-sol à l'instant t en [mm];
- K_3 : constante de récession du réservoir sous-sol en [mn].

2.3.8 Ecoulement de sub-surface retardé

Le débit $Q_{s3.1}(t)$ représente la composante de l'écoulement de sub-surface retardé qui est dû au refus de la percolation profonde vers la nappe, causé par la saturation du réservoir de sous-sol (R3). Le débit $Q_{s3.1}(t)$ est estimé comme suit :

Si $V_{s3}(t) \leq V_{3,max}$ alors $Q_{s3.1}(t) = 0$ (15)

Si $V_{s3}(t) > V_{3,max}$ alors (16)

$$Q_{s3.1}(t) = \frac{V_{s3,max} - V_{s3}(t-1)}{dt} + Q_{e3}(t) - Q_{s3}(t)$$

- F_{ei} : flux entrant dans le réservoir pas de temps i
- F_{si} flux sortant du réservoir au pas de temps i

3. PRINCIPE DE RESOLUTION DU SYSTEME

La résolution du système d'équations générées par le modèle se fait en utilisant un schéma explicite de différences finies. Ceci nous permet alors d'écrire facilement le stock au pas de temps $(t+dt)$ en fonction du stock au pas de temps t et des débits échangés pendant la durée dt sous la forme :

$$S(t + dt) = S(t) + dt(\sum F_{ei}(t) - \sum F_{si}(t)) \quad (17)$$

Avec :

$S(t)$, $S(t+dt)$: stock d'eau dans le réservoir respectivement au pas de temps t et $(t+d)$

Le processus général de détermination du stock $S(t)$ dans les réservoirs et des flux $F_{ei}(t)$ et $F_{si}(t)$ transitant entre ces réservoirs est réalisé conformément à l'organigramme général de la figure 6.

Enfin, pour des besoins de convergence du schéma explicite de résolution et d'adéquation avec les modèles d'hydrologie urbaine (assainissement pluvial), le pas de temps pris, est le plus fin possible. En hydrologie urbaine, le pas de temps des simulations est de l'ordre de la minute, alors qu'en hydrologie rurale il est souvent au pas de temps journalier.

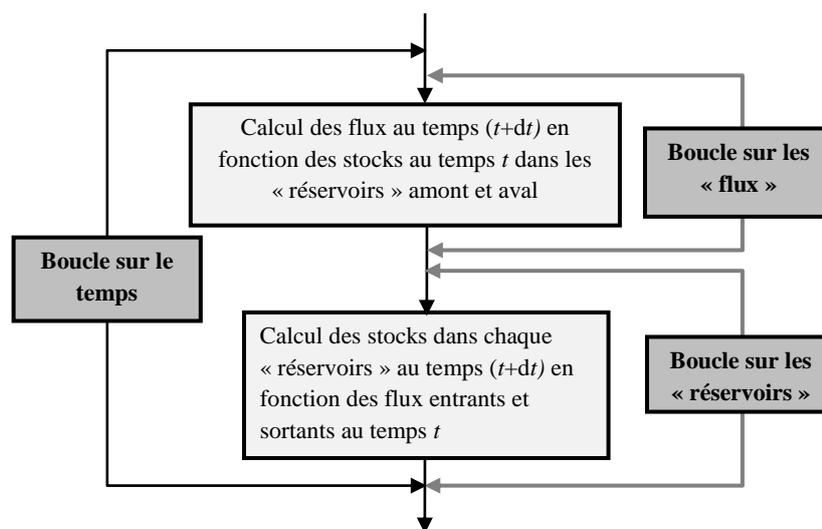


Figure 6. Organigramme général de résolution du système

4. ESTIMATION DES PARAMETRES DU MODELE

Pour calibrer les modèles pluie-débit, il existe deux approches [30]: (i) la calibration automatique et (ii) la calibration experte (Knowledge-based expert system). Ces deux approches ont été comparées dans différentes études et aucune différence significative d'efficacité n'a été signalée [30].

Dans notre modèle, les paramètres de stockage (V_{S2max} et V_{S3max}) ainsi que les constantes de récession associées aux réservoirs ont été estimés par la technique de l'analyse des courbes de récession des chroniques des débits [31].

Pour le reste des paramètres, l'approche experte a été adoptée.

Les critères de Nash [32] et celui du RMSE (Root Mean Square Error) [33], ont servis de critères de performance du calage et de la validation. Il s'agit de deux des critères numériques les plus recommandés [34].

5. PRESENTATION DU SITE DE L'ETUDE

L'étude s'appuie sur l'exemple du bassin versant de l'Yzeron. Ce bassin, d'une superficie de 150 km² et situé à l'ouest lyonnais, a été retenu car il est en cours d'urbanisation et subit des inondations fréquentes. Sa configuration est complexe : un amont encore rural, un aval strictement urbain et une partie intermédiaire périurbaine en pleine mutation ; en fait, un support bien adapté à notre recherche (Fig. 7a). De plus, ce bassin versant est très bien équipé sur le plan métrologique (Fig. 7b). Il dispose en particulier d'un système de stations de mesures hydrométriques qui couvre les parties urbaines et rurales sur une période suffisante, ce qui permet de bien appréhender les apports de chaque type d'occupation de sol dans le bassin et leurs rôles respectifs dans les crues enregistrées. Les données disponibles à la station de Craponne (bassin versant 42 km²) s'étalent de 2003 à 2006.

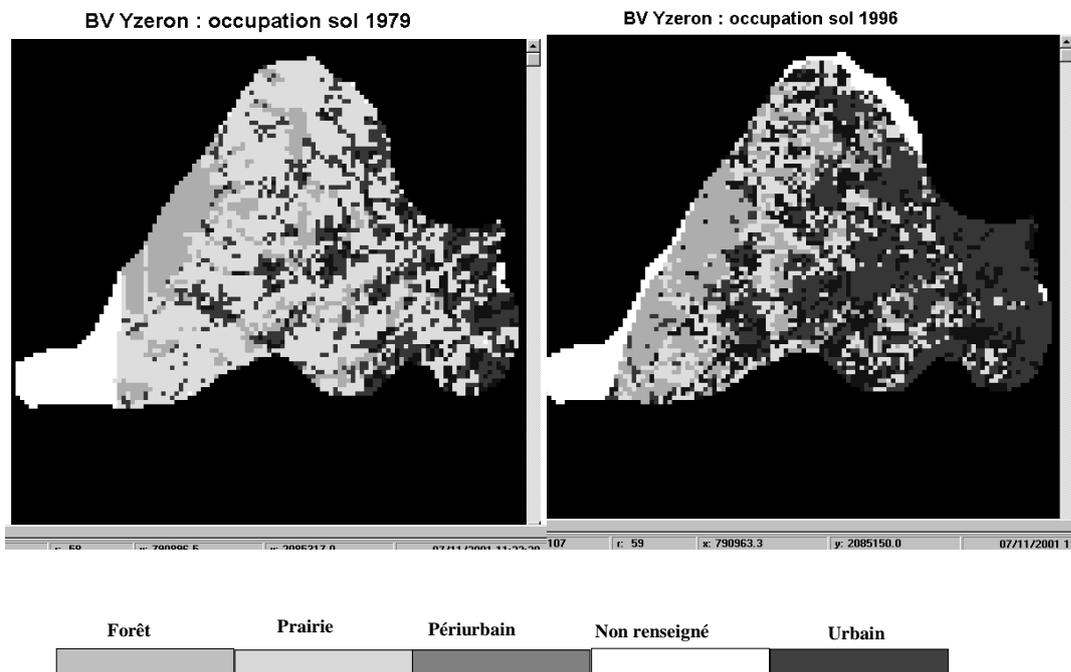


Figure 7a . Caractéristiques de l'occupation du sol du bassin de l'Yzeon 1979 (gauche) et 1996 (droite) [35]

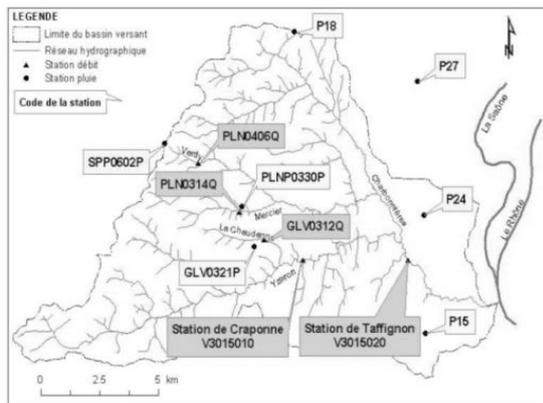


Figure 7b. Système d’observations hydro-étéorologiques, [36]

6. RESULTATS ET DISCUSSION

Le modèle à été calibré sur la partie rurale du bassin versant de l’Yzeron (perméable). Sept événements pluviométriques ont servi dans la calibration. Le critère de Nash adopté dans la calibration est pris $Nash \geq 0.8$. La validation du modèle a été effectuée sur le reste des données qui n'ont pas été utilisées lors du calage. Deux périodes ont été prises comme illustration: la période de la crue de l’inondation de 2003 et la chronique de 2005 (Fig. 8-11).

D’après les résultats, la simulation de la crue de 2003, la prise en compte des processus continus dans le modèle a permis l’amélioration des résultats de la simulation événementielle. Cette amélioration est visible principalement dans la description de la phase de décrue d’un évènement de crue (Fig. 1b et Fig.8).

La valeur du critère Nash est améliorée et celle du RMSE est nettement meilleure. Pour la simulation de la chronique de 2005, le coefficient Nash = 0.73 et un RMSE = 0.48.

Ces résultats sont très encourageants, vu que le pas de temps de calcul, utilisé est très fin pour des simulations de ce genre (6 minutes). Les nouvelles améliorations dans le modèle montrent un progrès dans la représentation de la crue en phase de montée et en phase de décrue par rapport à la version antérieure.

Pour la chronique, le modèle permet de représenter assez bien la dynamique lente et les faibles fluctuations de débits.

Ces premiers résultats valident le choix des différents modèles de production et la méthodologie de résolution du système.

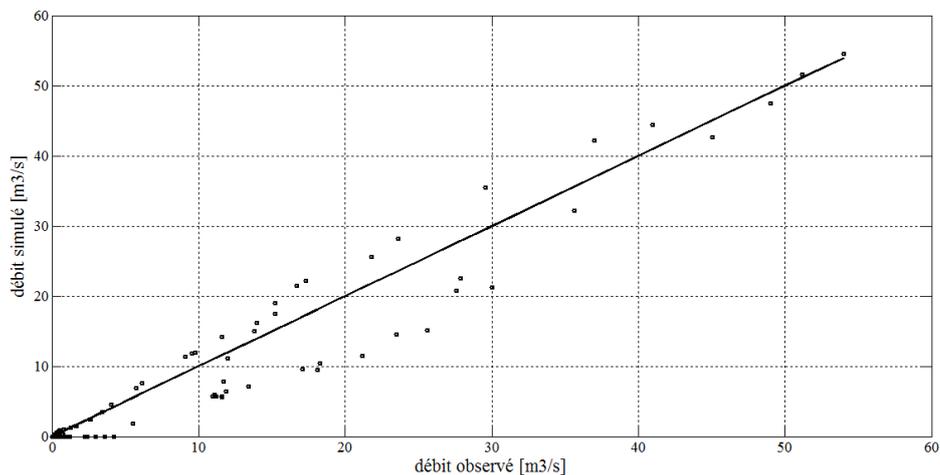


Figure 8. Comparaison entre débit mesuré et débit simulé pour la Crue de l’inondation de 2003

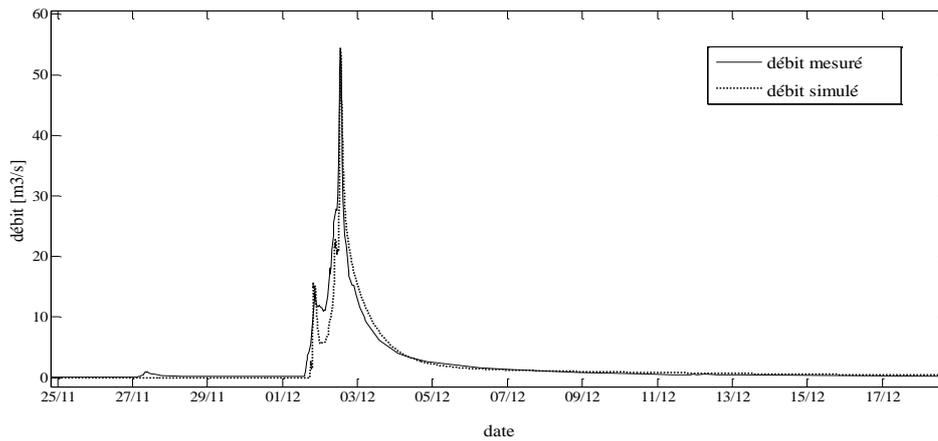


Figure 9. Crue de l'inondation de 2003 (Nash = 0.91 et RMSE = 0.76)

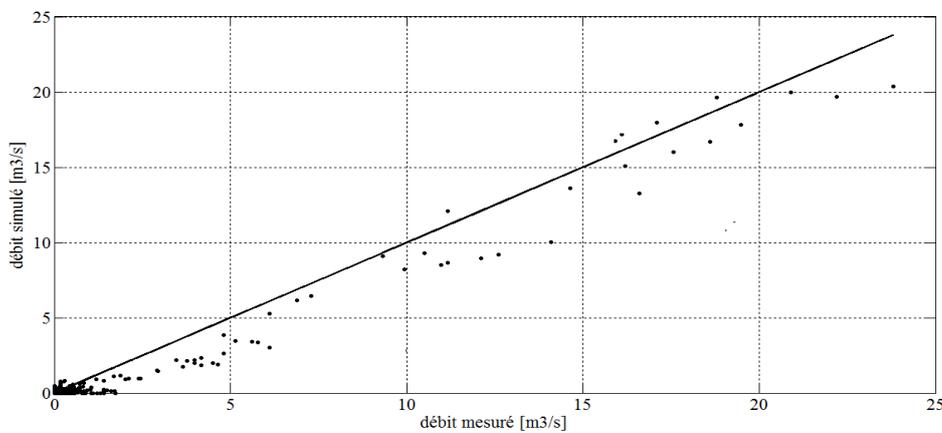


Figure 10. Comparaison entre débit mesuré et débit simulé pour la chronique de l'année 2005

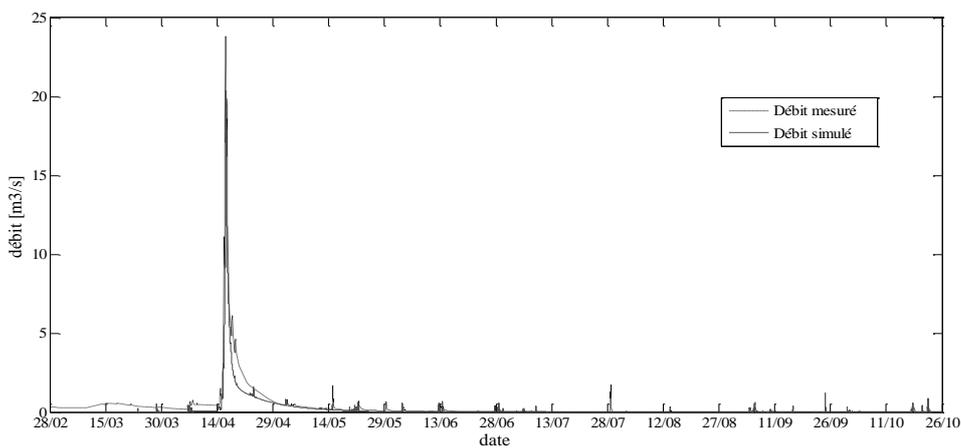


Figure 11. Chronique de l'année 2005 (Nash = 0.73 et RMSE = 0.48)

7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le modèle développé représente une intégration du fonctionnement hydrologique des surfaces perméables dans le modèle d'hydrologie urbaine Canoe.

Dans ce travail, plusieurs flux ont été ajoutés, comme l'infiltration en continu, les pertes par évapotranspiration et les différents flux d'écoulements. La discrétisation peut se faire à des pas de temps fins indispensables pour le couplage aux modèles urbains.

Le mode de simulation se fait en continu, ce qui permet de simuler l'évolution des variables d'état (humidité du sol) et de sortie (débit) sur des périodes qui dépassent l'échelle événementielle. De plus, le modèle permet de garder une mémoire sur l'origine de l'eau qu'elle soit de surface, de sub-surface ou souterraine, ce qui peut être très intéressant pour les études de transfert de polluants via les différents cheminements de l'eau qu'ils soient de surface ou souterrains.

L'étape de calibration reste laborieuse, ce qui nécessite le développement d'une stratégie propre au modèle pour palier à cette difficulté. L'application du modèle aux bassins versants algériens, nécessite plusieurs adaptations aux données disponibles sur les sites algériens.

REFERENCES

- [1] Ambroise B., 1998. La dynamique du cycle de l'eau: Processus, Facteurs, Modèles. H.G.A. (Eds.), Bucarest. 200 p.
- [2] Singh V. P. & Woolhiser D. A., 2002. Mathematical Modeling of Watershed Hydrology. *Journal of hydrologic engineering*, Vol. 7(4), 270-292.
- [3] ASCE, 1996. Hydrology Handbook. (Eds.) Second ed., ASCE, New York: In *ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice* no. 28.
- [4] Chocat B., 1997. Encyclopédie de l'Hydrologie Urbaine et de l'Assainissement. Paris: Tec & Doc Lavoisier. 1124 p.
- [5] Refsgaard J. C. & Henriksen H. J. 2004. Modelling guidelines - terminology and guiding principles. *Advances in Water Resources*, Vol. 27, 71-82.
- [6] Beven K. J., 2005. Rainfall-runoff Modeling: Introduction. In *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, M.G. Anderson. Wiley & Sons Ltd. 1857-1868 .
- [7] Hingray B., Picouet C. & Musy A., 2009. Hydrologie - Tome 2, Une science pour l'ingénieur. Ingénierie de l'environnement. Presse Polytechniques et universitaires Romandes, 600 p.
- [8] Beven K.J., 2001. Rainfall - Runoff Modelling: The Primer. Wiley & Sons 372 p.
- [9] Abbott M.B. & Refsgaard J.-C., 1996. Distributed Hydrological Modelling. Water Science and Technology Library. Kluwer Academic Publishers. 336 p.
- [10] Boughton W. & Droop O., 2003. Continuous simulation for design flood estimation - a review. *Environmental Modelling & Software*, Vol. 18, 309-318.
- [11] Anderson M.G. & Bates P.D., 2001. Model Validation: Perspectives in Hydrological Science. Wiley & Sons, 500 p.
- [12] Zoppou C., 2001. Review of urban storm water models. *Environmental Modelling & Software*, Vol. 16(3), 195-231.
- [13] Butterworth, J., Ducrot, R., Faysse, R. & Janakarajan, S., 2007, Peri-Urban Water Conflicts: Supporting dialogue and negotiation. In n 50, T.P. Series, Editor, IRC International Water and Sanitation Centre: Delft, the Netherlands. 128 p.
- [14] Potier F., 2007. Le périurbain - Quelle connaissance? Quelle approche? espace sous influence urbaine - analyse bibliographique. Collection CERTU, Paris, 70p.
- [15] Marshall, F., Waldman, L., MacGregor, H., Mehta, L. & Randhawa, P., 2009. On the Edge of Sustainability: Perspectives on Peri-urban Dynamics. STEPS Working Paper 35, Brighton, 72p.
- [16] Andrieu H. & Chocat B., 2004. Introduction to the special issue on urban hydrology. *Journal of Hydrology*, Vol. 299(3-4), 163-165.
- [17] Mathevet T., 2005. Quels modèles pluie-débit globaux pour le pas de temps horaire ? Développement empirique et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants, In ENGREF (Paris): Cemagref (Antony), France, 463p.
- [18] Insavalor & Sogreah Ingenierie, 2010. CANOE, logiciel d'hydrologie urbaine, conception et evaluation de reseaux d'assainissement, simulation des pluies, des ecoulements et de la qualite des eaux. Manual de l'utilisateur, 643p.
- [19] Singh V. P. & Yu F.X., 1990. Derivation of infiltration equation using systems approach. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 116 (6), 837-858.
- [20] Bauer Sebastian W., 1974. A modified horton equation for infiltration during intermittent rainfall. *Hydrological Sciences*, Vol. 19 (2), 219 - 225.
- [21] Diskin M.H. & Nazimov N., 1995. Linear reservoir with feedback regulated inlet as a model for the infiltration process. *Journal of Hydrology*, Vol. 172, 313-330.
- [22] Diskin M.H. & Nazimov N., 1996. Ponding time and infiltration capacity variation during steady rainfall. *Journal of Hydrology*, Vol. 178, 369-380.
- [23] Akan O., 1992. Hortonian Infiltration Equation revisited. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 118 (5), 828-830.
- [24] Aron G., 1992. Adaptation of horton and SCS equations to complex storms. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 118 (2), 275-284.
- [25] Oudin L., 2004. Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme

entrée d'un modèle pluie-débit globale, In Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts: Paris. 495p.

[26] Rudra, R.P., Dickinson, W.T., Whiteley, H.R., Gayner, J.D. & Wall, G.J., 2000. Selection of appropriate evapotranspiration estimation technique for continuous modeling. *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 36 (3), 585-594.

[27] Ross M., Geurink, J., Said, A., Aly, A. & Tara, P., 2005. Evapotranspiration conceptualization in the HSPF-MODFLOW in integrated models. *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 41(5), 1013-1025.

[28] Xu Z. X. & Li J. Y., 2003. Estimating Basin Evapotranspiration Using Distributed Hydrologic Model. *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 8 (2), 74-80.

[29] Moussa R., Chahinian N. & Bocquillon C., 2007. Distributed hydrological modelling of a Mediterranean mountainous catchment – Model construction and multi-site validation. *Journal of Hydrology*, Vol. 337, 35–51.

[30] Madsen H., Wilson G., & Ammentrop H.C., 2002. Comparaison of different automated strategies for calibration of rainfall-runoff models. *Journal of Hydrology*, Vol. 261, 48-59.

[31] Fleming M. & Neary V., 2004. Continuous Hydrologic Modeling Study with the Hydrologic Modeling System. *Journal of hydrologic engineering*, Vol. 9 (3), 175–183.

[32] Nash J. E. & Sutcliffe J. V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, Vol. 10 (3), 282-290.

[33] Efron Bradley, 1978. Regression and ANOVA with Zero-One Data: Measures of Residual Variation. *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 73 (361), 113-121.

[34] Van Liew, M.W., Veith, T.L., Bosch, D.D. & Arnold, J.G., 2007. Suitability of SWAT for the Conservation Effects Assessment Project: Comparison on USDA Agricultural Research Service Watersheds. *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 12 (2), 173-189.

[35] Radojevic B. D., 2002b. Méthode d'évaluation de l'influence urbaine sur le régime des crues d'un bassin versant de 150 km², In URG, INSA de Lyon, Lyon, 250p.

[36] Gnouma R., 2006. Aide à la calibration d'un modèle hydrologique distribué au moyen d'une analyse des processus hydrologiques : application au bassin versant de l'Yzeron. In LGCIÉ INSA de Lyon, Lyon. 448p.

NOMENCLATURE

Symbole	Description	Unité
ET	Perte par évapotranspiration	mm
ETP	Evapotranspiration potentielle journalière	mm/j
F_{ei}	Flux entrant dans le réservoir pas de temps i	mm
F_{si}	Flux sortant du réservoir au pas de temps i	mm
F	Taux d'infiltration potentiel	mm/h
f_0	Taux d'infiltration initial	mm/h
f_c	Taux d'infiltration final	mm/h
I	Intensité de précipitation	mm/h
PI	Pertes initiales	mm
$V_{Si}(t)$	Volume stocké au réservoir i à l'instant t	m ³
V_{2max}	Stock maximum dans le réservoir de sub-surface	mm
V_{3max}	Stock maximum dans le réservoir de sous-sol	mm
α	Paramètre de décroissance exponentiel de l'infiltration	mm ⁻¹
K_s	Coefficient qui tient compte l'état de stock d'eau dans le sol	sans dimension
K_c	Coefficient cultural qui tient compte de l'état du couvert végétal	sans dimension
K_1	Constante de récession du réservoir surface du sol	min
K_2	Constante de récession du réservoir sub-surface	min
K_3	Constante de récession du réservoir sous- sol	min
K	Temps de retard du réservoir de transfert pour l'écoulement souterrain	min
$Q_{S1}(t)$	Écoulement de surface rapide	m ³ /s
$Q_{S2.1}(t)$	Écoulement de surface retardé	m ³ /s
$Q_{S2}(t)$	Écoulement de sub-surface rapide	m ³ /s
$Q_{S3.1}(t)$	Écoulement de sub-surface retardé	m ³ /s
$Q_{S3}(t)$	Écoulement souterrain	m ³ /s
$Q_{e2}(t)$	Débit de percolation	m ³ /s