

# MISE EN ŒUVRE, ANALYSE DE SENSIBILITÉ ET VALIDATION D'UN MODÈLE A BASE PHYSIQUE. APPLICATION AU BASSIN VERSANT DE LA CORBASSIERE (HAUTE-MENTUE, SUISSE)

Christophe Higy

## ABSTRACT

*Physically based modelling is confronted with problems in parameter estimation and validation. In this context, we present a new approach of processing physically based modelling and sensitivity analysis based on Harr's methodology which drastically reduced the number of calculations. This study underline the role of some parameters on the hydrological behaviour of a watershed and some difficulties in the parameterisation of a complex model. An application is performed for la Corbassère catchment (Haute-Mentue, Switzerland)*

## 1. INTRODUCTION

L'accroissement des contraintes et problématiques environnementales ont fait considérablement évoluer les attentes de la société envers les sciences de l'eau en général tant du point de vue qualitatif que quantitatif [Margat, 1998 #143]. Sous l'impulsion de cette volonté de prévision de l'état futur de nos ressources en eau et grâce aussi aux développements de l'informatique, l'hydrologie s'est ainsi diversifiée en différents domaines spécifiques tels que l'hydrobiologie, l'hydrologie urbaine, l'hydrogéologie ou encore l'hydrologie de surface [1].

Face à cette nécessité d'anticipation, la modélisation hydrologique et plus particulièrement la modélisation à base physique occupe une place prépondérante au sein de l'hydrologie. Toutefois depuis quelques années, un débat de fond s'est engagé entre ce type d'approche et celle plus simple qu'est la modélisation conceptuelle [2, 3].

Parmi les objections essentielles qui sont formulées à l'encontre de la modélisation à base physique, on lui reproche d'être délicate à mettre en œuvre et d'être soumise aux mêmes conditions que les modèles conceptuels, à savoir une étape de calibration des paramètres. Malgré cela, la modélisation à base physique offre la possibilité de déterminer l'évolution de variables internes aux bassins versants, les impacts de changements d'occupation du sol et de changements climatiques ou encore la détermination des débits pour des bassins versants non jaugés [par ex. 4, 5-7].

L'objectif de cet article est de montrer que tout en restant modeste quant aux potentialités des modèles à base physique, il est possible de mettre en œuvre par le biais d'une démarche pertinente un modèle complètement distribué et de procéder à

une analyse de sensibilité qui permette ensuite de caler le modèle si cela s'avère nécessaire.

## 2. LE BASSIN VERSANT DE LA CORBASSIERE

Situé sur le Plateau Suisse, le bassin versant de la Haute-Mentue présente une surface de 12.5 km<sup>2</sup> et constitue un sous bassin de la Mentue (106 km<sup>2</sup>). Bordé à l'Ouest par la vallée de la Venoge et à l'est par la Broye, le bassin versant de la Haute-Mentue fait partie intégrante du Jorat [8].

Le bassin versant de la Corbassière, sous bassin de la Haute-Mentue, couvre une surface de 195 hectares environ et se subdivise en quatre sous-bassins principaux, à savoir: Boiz-Vuacoz (24 ha), Corbamont (58 ha), Ruzillon (18.5 ha) et Esserts (32 ha). La figure 1 donne la situation géographique ainsi que la position des exutoires des quatre sous-bassins de la Corbassière.

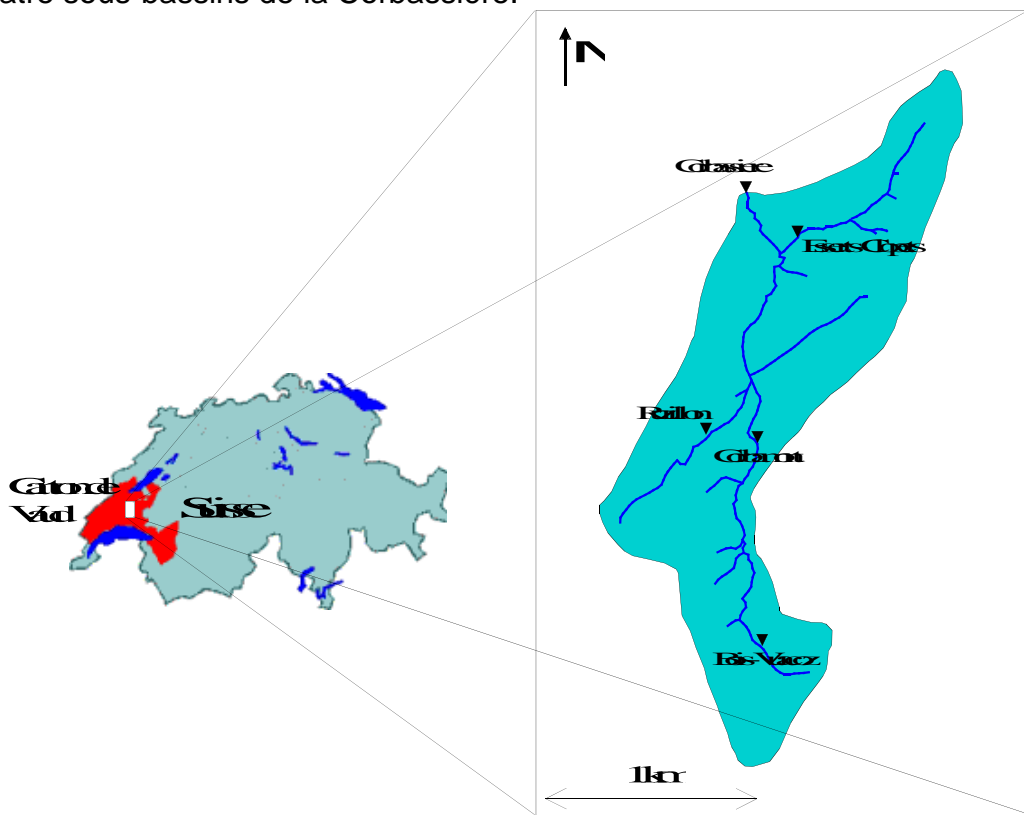


Figure 1 Situation générale du bassin versant de la Corbassière

## 3. LE MODÈLE HYDROLOGIQUE SHETRAN

Parmi les modèles à base physique, le plus connu est sans doute le Système Hydrologique Européen développé conjointement par le Danish Hydraulic Institute, le British Institute of Hydrology et la société française SOGREAH il y a une vingtaine d'années [9, 10]. Depuis la version initiale du SHE, de constantes améliorations ont permis de proposer plusieurs versions dont SHESED [11] qui intègre la modélisation des processus d'érosion et de transport de sédiments et MIKE SHE qui est la version commercialisée du modèle par le Danish Hydraulic Institute et le Laboratoire d'Hydraulique de France. Actuellement, les développements du modèle sont assurés par l'Université de Newcastle qui a récemment proposé une version tridimensionnelle

dénommée SHETRAN [12]. SHETRAN recourt essentiellement à trois composantes principales liées à l'écoulement de l'eau ainsi qu'au transfert de sédiments et solutés. La composante « eau » permet la simulation des écoulements de surface ainsi que le transfert de l'eau du sol et des écoulements souterrains. La composante « sédiment » permet d'évaluer les processus d'érosion ainsi que le transfert de particules solides à la surface du sol. La composante « solutés » offre la possibilité de déterminer le mouvement des substances en solution dans l'eau du sol ainsi que leur acheminement en rivière. Ce modèle est complètement distribué et ceci dans les trois dimensions. Le tableau 1 donne les principales équations utilisées par la composante « eau » du modèle SHETRAN en fonction de différents processus hydrologiques.

**Tableau 1** Processus et équations utilisées par le module écoulement de l'eau dans SHETRAN

Processus	Equation
Interception	Modèle de Rutter (1D)
Evaporation	Modèle de Penman et Penman-Monteith (1D)
Neige et fonte	Bilan d'énergie ou méthode du degré jour (1D)
Écoulement de subsurface	Equations de Darcy Richards (3D)
Écoulement de surface	Equations de Saint-Venant (2D)
Écoulement en rivière	Equations de Saint-Venant (1D)

#### 4. APPLICATION AU BASSIN VERSANT DE LA CORBASSIÈRE

L'exemple présenté ici est la première application du modèle SHETRAN au bassin versant de la Corbassière. Précédemment, Jordan [13] a procédé à des simulations sur le bassin versant de la Haute-Mentue à l'aide du SHE. La nouveauté essentielle de cette application réside dans le fait que le modèle est tridimensionnel d'une part et que, d'autre part, l'échelle spatiale adoptée est assez fine puisqu'il s'agit de mailles de 50 mètres de côtés. L'exploitation des résultats de campagnes de mesures a permis - par le biais d'une approche de type Monte-Carlo [14] et en recourant à des fonctions de pédotransfert [15] - la détermination de cinq types de sols pour le bassin versant étudié [16]. L'ensemble des paramètres relatifs à la végétation a été évalué sur la base d'une étude bibliographique et de terrain. En ce qui concerne le réseau hydrographique, six sections ont été choisies. Enfin, bien qu'il soit possible de prendre en considération la variabilité spatiale des précipitations, seule la station de Chalet du Villars a été exploitée pour une période allant de juin à octobre 1998 à pas de temps horaire.

Le méthode d'analyse de sensibilité exploitée ici est due à Rosenblueth qui a proposé en 1975 une approche dite « d'estimation ponctuelle » dans le cas de paramètres stochastiques symétriques et corrélés. Etendue en 1981 aux cas de distributions asymétriques, cette méthode repose sur une approximation de la densité de probabilité d'une variable aléatoire par une distribution discrète concentrée en deux points qui conserve les trois premiers moments de la distributions initiale [17]. En partant d'une approche similaire, Harr [18] a proposé une modification de la méthode de Rosenblueth permettant de remplacer les  $2^n$  simulations par  $2n$  simulations. La méthode proposée par Harr consiste à déterminer tout d'abord une hypersphère de rayon  $\sqrt{n}$  centrée sur le point dont les coordonnées sont les valeurs moyennes des  $n$  paramètres. On détermine ensuite les  $2n$  intersections des vecteurs propres associés aux valeurs propres de la matrice **C** des corrélations de paramètres avec cette hypersphère. Les intersections ainsi obtenues

permettent d'estimer les deux premiers moments du résultat de l'application d'un modèle. Dans le cas présenté ici, nous n'avons pas cherché à estimer l'espérance et la variance des débits simulés car notre intérêt est bien évidemment de déterminer la série temporelle dans son entier. La méthode proposée permet cependant de déterminer des jeux de paramètres couvrant le domaine de réponse du modèle tout en limitant le nombre de calculs, ce qui peut s'avérer être un avantage essentiel lorsque le modèle utilisé requiert la connaissance d'un grand nombre de paramètres

L'exemple proposé ici montre une application de l'algorithme de Harr dans le cas où l'on teste la variabilité des propriétés hydrodynamiques des sols. Le modèle hydrologique SHETRAN applique les relations de van Genuchten [19, 20] pour les caractériser. Il est donc nécessaire de préciser pour chaque type de sol les valeurs des conductivités hydrauliques  $K_x$ ,  $K_y$  et  $K_z$ , les teneurs en eau à saturation et résiduelles  $\theta_s$  et  $\theta_r$ , les coefficients  $n$  et  $\alpha$  ainsi que du coefficient de stockage spécifique  $S_s$  [-]. Sur la base de 55 échantillons de sols, nous avons pu dans un premier temps déterminer, par l'application d'une procédure de Monte-Carlo aux fonctions de pédotransfert proposées par Rawls [21], les propriétés hydrodynamiques d'un sol défini comme étant représentatif à l'échelle du bassin versant. Le tableau 2 donne les propriétés ainsi déterminées.

**Tableau 2** Paramètres hydrodynamiques des sols du bassin de la Corbassière.

	$K_s$ [cm/h]	$\theta_r$ [%]	$\theta_s$ [%]	$\alpha$ [cm <sup>-1</sup> ]	$n$ [-]
Sol	$7.4 \pm 7$	$7 \pm 2$	$50 \pm 10$	$0.092 \pm 0.03$	$1.356 \pm 0.04$

N'ayant pas d'information a priori concernant l'hétérogénéité des conductivités hydrauliques, nous avons considéré le sol comme un milieu isotrope et homogène. De plus, une revue de la littérature nous a permis de fixer arbitrairement la valeur du coefficient de stockage  $S_s$  à  $0.225 \pm 0.175$ . Il a ensuite été possible de générer 12 jeux de paramètres permettant d'effectuer les simulations.

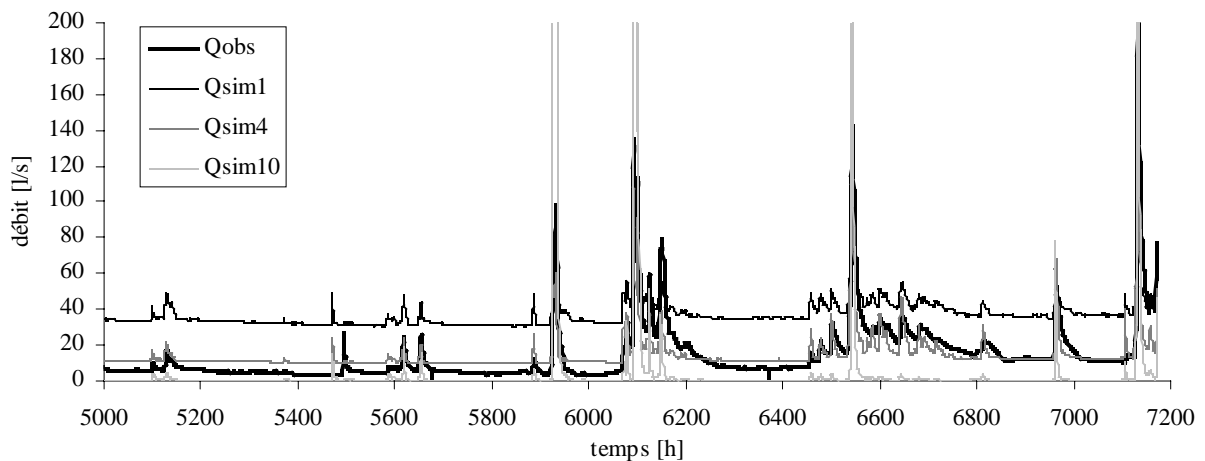
On notera enfin que la mise en œuvre du modèle nécessite la connaissance d'autres paramètres, notamment ceux concernant la végétation ainsi que les conditions initiales et aux limites. Ces grandeurs ne sont cependant pas discutées ici.

## 5. RÉSULTATS OBTENUS

L'application de la méthodologie proposée par Harr au cas d'un modèle hydrologique distribué tel que SHETRAN nous a permis de mettre en évidence une gamme assez large de comportements hydrologiques. En effet, un premier regard sur les débits simulés à l'exutoire du bassin versant fait apparaître trois groupes principaux de simulations, à savoir :

- Groupe 1 : Simulations qui présentent de la difficulté à reproduire les débits de crue mais qui surestiment fortement le débit de base (un exemple est donné à la figure 2). Il s'agit des simulations no **1**, **3**, **5**, **7**, **11**, **12**.
- Groupe 2 : Simulations qui présentent de la difficulté à reproduire les débits de base mais qui surestiment fortement les crues (un exemple est donné à la figure 3). Il s'agit des simulations **2** et **10**.
- Groupe 3 : Simulations qui offrent une représentation satisfaisante des débits (un exemple est donné à la figure 3). Il s'agit des simulations **4** et **6**.

Enfin, une simulation ne donne quasiment aucune réponse hydrologique (simulation no 8).



**Figure 2** Illustration des résultats appartenant au groupe 1 (Qsim1), 2 (Qsim10) et 3 (Qsim4) (du 28 juillet au 28 octobre)

La mise en évidence des causes probables des différences comportementales observées est un exercice délicat car chaque simulation est le résultat de l'influence des paramètres mais aussi de leurs interactions pouvant être assimilées à des boucles de rétroactions négatives ou positives, le système formé par le bassin versant étant un système ouvert et complexe.

Afin d'expliquer au mieux les relations existantes entre les paramètres et les résultats obtenus, nous avons évalués pour les 12 simulations les éléments suivants : coefficient de corrélation entre les paramètres et l'efficacité définie par le critère de Nash ( $Eff$ ) [22], erreur relative sur le volume écoulé  $\varepsilon_{vol}$ , erreur relative sur le débit de pointe  $\varepsilon_{Qp}$ , erreur relative sur le débit de base  $\varepsilon_{Qb}$ . Enfin, les coefficients de corrélation des rangs et de Spearman<sup>1</sup> ont été déterminés entre l'efficacité, les débits de pointe, les débits de base et les différents paramètres. Le tableau 3 ci-après donne les principaux résultats des simulations tandis que le tableau 4 donne les valeurs des coefficients de corrélation de Pearson  $\rho$  et Spearman  $\rho_s$  calculés pour l'échantillon duquel on a supprimé les deux simulations extrêmes, à savoir celles du groupe 2.

<sup>1</sup> Les coefficients de Pearson et de Spearman permettent respectivement de mesurer le degré de linéarité et de monotonie existant dans une relation. [voir 23, page 17]

**Tableau 3** Efficience, erreur relative sur le volume écoulé, le débit de pointe et le débit de base pour les 12 simulations effectuées

Simulation	$Eff$ [-]	$\varepsilon_{Vol}$ [-]	$\varepsilon_{Qp}$ [-]	$\varepsilon_{Qb}$ [-]
Sim1	-0.90	1.55	-0.62	4.43
Sim2	-15.23	-0.12	3.17	-0.95
Sim3	-0.29	1.23	-0.55	3.64
Sim4	0.74	0.04	-0.19	0.79
Sim5	0.74	0.04	-0.19	3.25
Sim6	0.70	0.31	-0.44	1.25
Sim7	-0.66	1.42	-0.60	4.15
Sim8	0.04	-0.68	-0.60	-0.42
Sim9	-0.61	1.38	-0.64	3.94
Sim10	-11.29	-0.26	2.79	-0.94
Sim11	0.55	0.51	-0.46	1.91
Sim12	0.31	0.78	-0.49	2.56

**Tableau 4** Corrélation de Pearson et Spearman entre l'efficience de Nash, le débit de base et les caractéristiques des sols pour 10 simulations (en gras : corrélations significatives au seuil de 5%)

Paramètres	$\rho$	$\rho_s$	Paramètres	$\rho$	$\rho_s$
$Eff / K_s$	<b>-0.77</b>	<b>-0.73</b>	$Qb / K_s$	<b>0.89</b>	<b>0.92</b>
$Eff / \theta_s$	-0.34	-0.41	$Qb / \theta_s$	0.42	0.47
$Eff / \theta_r$	0.02	0.03	$Qb / \theta_r$	-0.18	-0.22
$Eff / S_s$	0.16	0.12	$Qb / S_s$	0.25	0.23
$Eff / n$	0.09	0.12	$Qb / n$	-0.13	-0.10
$Eff / \alpha$	-0.01	-0.25	$Qb / \alpha$	-0.40	-0.10

Une analyse préliminaire de ces résultats nous permet ainsi de constater que :

- L'efficience des résultats obtenus dépend pour l'essentiel des valeurs de conductivités hydrauliques. En effet, une augmentation de la conductivité hydraulique s'accompagne d'une augmentation du débit de base et par conséquent du volume total simulé tandis que les débits de pointe tendent à diminuer. Des corrélations significatives sont aussi obtenues entre la conductivité hydraulique et le débit de pointe ( $\rho = -0.54$ ,  $\rho_s = -0.61$ ) ainsi qu'avec le volume total d'eau écoulée ( $\rho = 0.92$ ,  $\rho_s = 0.92$ ).
- Malgré la faible taille de l'échantillon statistique et bien que peu de corrélations sont statistiquement significatives, on ne peut pas négliger l'influence de la teneur en eau à saturation  $\theta_s$  ainsi que celle du paramètre  $\alpha$  qui représente l'inverse du potentiel de succion matricielle sur l'estimation du débit de base.
- Qu'une étude de l'influence des paramètres sur l'évolution du stock hydrique du versant conduit à montrer le fort impact de la teneur en eau à saturation ainsi que l'influence des conditions initiales sur le stock d'eau données par la profondeur de la nappe au début des simulations. Le taux de vidange de la nappe est quant à lui largement dominé par la conductivité hydraulique.

Fort de ces premiers constats, on peut alors proposer l'interprétation suivante en terme de processus hydrologique :

- Le premier groupe de simulations présente la situation d'un bassin conditionné par la réponse de la nappe par le biais d'un mécanisme d'écoulement de retour ainsi que de ruissellement sur des surfaces saturées pour la fraction

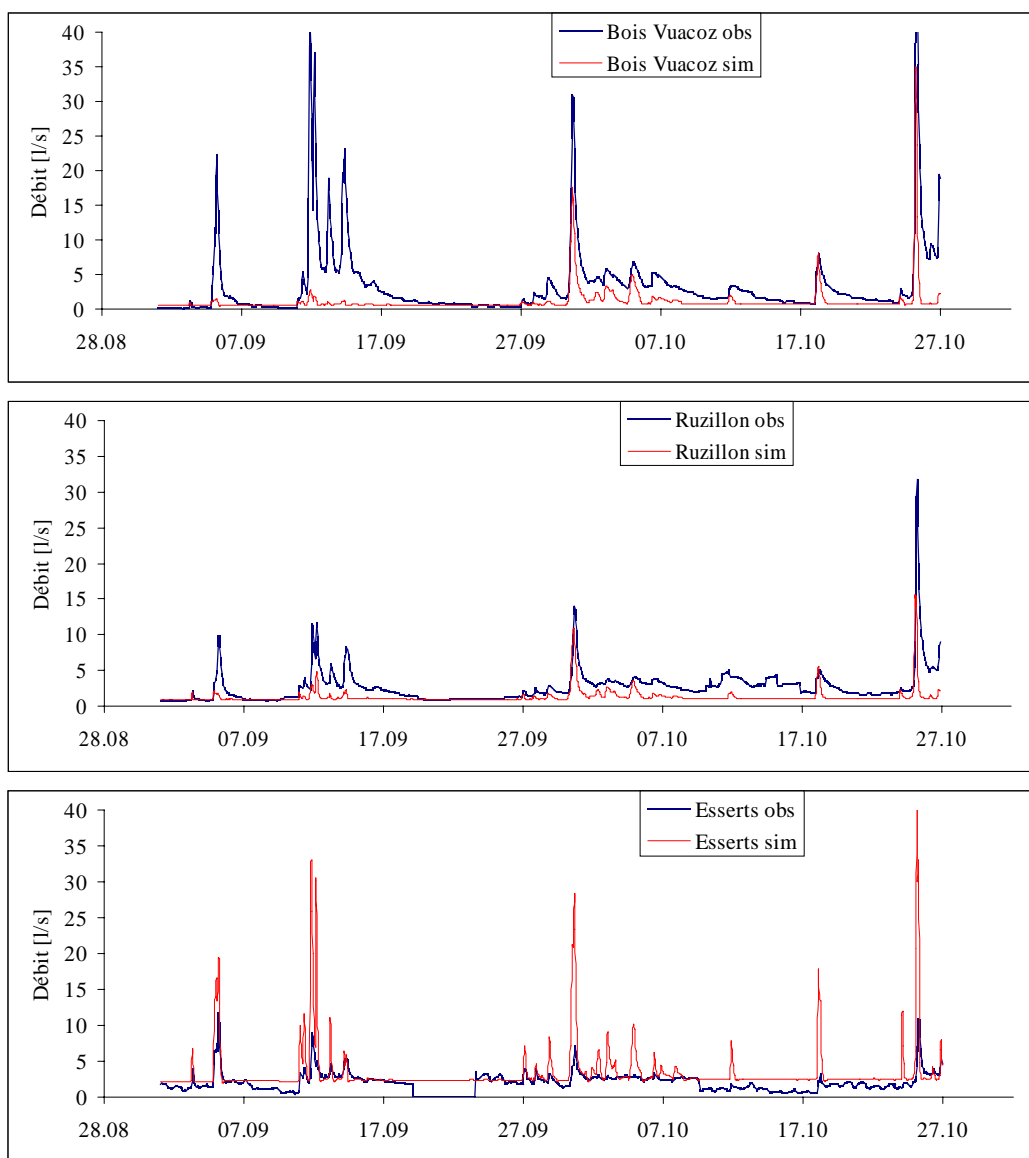
d'écoulement rapide. Ces simulations sont caractérisées par un stock hydrique initial sans doute trop élevé accompagné de trop grandes conductivités hydrauliques qui impliquent un fort taux de vidange de la nappe en absence de précipitations (simulations 1, 3, 5, 7, 11, 12).

- Le second groupe est assimilable à un comportement d'écoulement sur surfaces imperméables. On a ainsi un milieu à deux composantes. D'une part une surface imperméable sur laquelle s'écoule la précipitation de façon très rapide et, d'autre part, un réservoir de faible conductivité situé sous la surface imperméable et qui se vidange lentement sous l'effet de la topographie (simulations 2 et 10).
- Le troisième groupe, qui donne des résultats acceptables, reproduit pour l'essentiel des écoulements sur surfaces saturées (simulations 4 et 6).

En conclusion, on notera que cette première série de simulations ne reproduit que partiellement les processus hydrologiques dominants sur le bassin versant puisque les écoulements sont pour l'essentiel conditionnés par les horizons de subsurface, par la présence de macropores ainsi que par l'extension rapide d'un chevelu hydrographique important lors des événements pluviométriques [13, 24]. Une étude de la profondeur de la nappe montre en effet que celle-ci est trop proche de la surface du sol. De plus, l'amplitude des variations de la profondeur de la nappe est largement sous-estimée.

Pour terminer, la figure 3 donne les débits observés et simulés pour trois sous-bassins versants de la Corbassière pour les paramètres de la simulation no 4 présentée précédemment.

On note alors que si la reproduction des débits est correcte pour le bassin versant de la Corbassière, il n'en va de même en ce qui concerne les sous-bassins versants. Ce type de constat met en évidence l'importance de la variabilité spatiale des paramètres et / ou des données météorologiques tels que la précipitation. Le comportement hydrologique des bassins versants est donc différents et le principe d'homogénéité ou de similarité du comportement hydrologique n'est pas valide pour le bassin versant de la Corbassière.



**FIGURE 3** Débits observés et simulés pour les sous bassins versants de Bois-Vuacoz, Ruzillon et Esserts

## 6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'étude proposée dans cet article a permis de montrer la possibilité de recourir à une algorithmme relativement simple en vue de l'estimation des paramètres qui soit applicable à des modèles à base physique complexes. Cette approche souligne d'une part que différents jeux de paramètres conduisent à des processus hydrologiques forts différents et que, d'autre part, la variabilité spatiale des processus est importante même à l'échelle d'un petit bassin versant comme celui faisant l'objet de cette étude.

A l'avenir, des progrès devront être réalisés dans l'identification des grandeurs essentielles qui conditionnent le comportement hydrologique d'un bassin versant. Ceci devrait permettre d'améliorer les facilités d'usage des modèles à base physique en proposant des tables pour les paramètres les moins significatifs ainsi que des approches simples et peu coûteuses en temps de calcul pour effectuer des analyses

de sensibilité de modèles complexes et permettant surtout d'évaluer les interactions entre paramètres et l'effet de ces dernières sur le comportement hydrologique.

## 7. REMERCIEMENTS

Cette recherche est soutenue par l'Office Fédéral pour l'Education et la Science (# 95.0049) dans le cadre du projet européen VAHMPIRE.

## 8. BIBLIOGRAPHIE

- [1] G. de Marsily and J. L. Sasseville, "Les sciences de l'eau: présent et futur," *Revue des Sciences de l'Eau*, vol. no spécial 10ème anniversaire, pp. 223-241, 1998.
- [2] K. Beven, "Changing ideas in hydrology - the case of physically-based models," *Journal of Hydrology*, vol. 105, pp. 157-172, 1989.
- [3] G. de Marsily, "Quelques réflexions sur l'utilisation des modèles en hydrologie," *Revue des Sciences de l'Eau*, vol. 7, pp. 219-234, 1994.
- [4] K. Beven and P. E. O'Connell, "On the Role of Physically-Based Distributed Modelling in Hydrology," Institute of Hydrology 81, 1982.
- [5] J. C. Bathurst and P. E. O'Connell, "Future of distributed modelling: The Systeme Hydrologique Europeen," *Hydrological processes*, vol. 6, pp. 265-277, 1992.
- [6] I. Iorgulescu, A. Musy, D. Devred, and J.-P. Jordan, "Modélisation à base physique: Objectifs, réalités et perspectives," *Beiträge zur Hydrologie der Schweiz*, vol. 35, pp. 181-194, 1994.
- [7] K. R. Fawcett, M. G. Anderson, P. D. Bates, J.-P. Jordan, and J. C. Bathurst, "The importance of internal validation in the assessment of physically based distributed models," *Trans. Inst. Br. Geogr.*, vol. NS 20, pp. 248-265, 1995.
- [8] D. Aubert, "Géomorphologie du Gros-de-Vaud," *Mémoires de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles*, vol. 100, pp. 57-116, 1981.
- [9] M. B. Abbott, J. C. Bathurst, J. A. Cunge, P. E. O'Connell, and J. Rasmussen, "An Introduction to the european Hydrological System - Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system.," *Journal of Hydrology*, vol. 87, pp. 45-59, 1986.
- [10] M. B. Abbott, J. C. Bathurst, J. A. Cunge, P. E. O'Connell, and J. Rasmussen, "An Introduction to the european Hydrological System - Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system.," *Journal of Hydrology*, vol. 87, pp. 61-77, 1986.
- [11] J. M. Wicks and J. C. Bathurst, "SHESED: a physically based, distributed erosion and sediment yield component for the SHE hydrological modelling system," *Journal of Hydrology*, vol. 175, pp. 213-238, 1996.
- [12] J. Ewen, G. Parkin, and P. E. O'Connell, "SHETRAN: a coupled surface/subsurface modelling system for 3D water flow and sediment and solute transport in river basins," *Water Resources Research*, pp. 33, 1998.

- [13] J.-P. Jordan, "Identification et modélisation des processus de génération des crues. Application au bassin versant de la Haute-Mentue," in *DGR: EPFL*, 1992, pp. 318.
- [14] R. F. Carsel and R. S. Parrish, "Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics," *Water Resources Research*, vol. 24(5), pp. 755-769, 1988.
- [15] W. J. Rawls and D. L. Brakensiek, "Estimation of Soil Water Retention and Hydraulic Properties," in *Unsaturated Flow in Hydrological Modeling, Theory and Practice*, vol. 275, *Mathematical and Physical Sciences*, H. J. Morel-Seytoux, Ed.: Kluwer Academic Publishers, 1989, pp. 275-300.
- [16] C. Higy, "Evaluation des courbes caractéristiques d'humidité de quelques sols : Application au bassin versant de la Corbassière (Haute-Mentue) 1. Présentation des données, analyse des fonctions de pédotransfert et comportement d'un sol "moyen".," DGR-EPFL, Rapport interne de 3<sup>ème</sup> cycle 1997.
- [17] K. C. Yeh and Y. K. Tung, "Uncertainty and sensitivity analyses of pit-migration model," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 119, pp. 262-283, 1993.
- [18] M. E. Harr, "Probabilistic estimates for multivariate analyses," *Appl. Math. Modelling*, vol. 13, pp. 313-318, 1989.
- [19] M. T. van Genuchten, "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils," *Soil Science Society of American Journal*, vol. 44, pp. 892-898, 1980.
- [20] M. T. van Genuchten and F. J. Leij, "On estimating the hydraulic properties of unsaturated soil," in *Indirect methods for estimating properties of unsaturated soils*, M. T. van Genuchten, F.J. Laij, L.J. Lund, Ed., 1992, pp. 1-14.
- [21] W. J. Rawls, D. L. Brakensiek, and K. E. Saxton, "Estimation of soil water properties," *ASAE Paper*, vol. 81-2510, pp. 1316-1320, 1982.
- [22] J. E. Nash and J. V. Sutcliffe, "River flow forecasting through conceptual model. Part1 - a discussion of principles," *Journal of Hydrology*, vol. 10, pp. 282-290, 1970.
- [23] M. Soutter, "Prédiction stochastique à l'échelle régionale des risques de contamination des eaux souterraines par des pesticides," in *DGR: EPFL*, 1996, pp. 100.
- [24] I. Iorgulescu, "Analyse du comportement hydrologique par une approche intégrée à l'échelle du bassin versant. Application au bassin versant de la Haute-Mentue," in *DGR: EPFL*, 1997, pp. 216.