Afrique SCIENCE *18(3) (2021) 36 - 47*
ISSN 1813-548X, http://www.afriquescience.net

Modélisation hydrologique et son apport en situation de non-stationnarité et de données hydropluviométriques lacunaires, application au bassin versant du Nyong à Mbalmayo

Valentin Brice EBODE*, Jean Guy DZANA, Joseph Armathé AMOUGOU et Romain Armand Soleil BATHA

Université de Yaoundé 1, Faculté des Arts Lettres et Sciences Humaines, Département de Géographie, BP 755, Yaoundé, Cameroun

(Reçu le 24 Janvier 2021 ; Accepté le 18 Mars 2021)

* Correspondance, courriel : *ebodebriso@gmail.com*

Résumé

L'objectif de cet article est de vérifier les performances du modèle SWAT à reproduire les écoulements en région équatoriale (cas du bassin versant du Nyong) en situation de changements d'occupation du sol. Pour cela, deux principaux types de données d'entrée ont été utilisés, à savoir : les données météorologiques (pluies, températures maximales et minimales, vents, humidité relative et insolation) du projet MERRA-2 et les données spatiales (images satellitaires, modèle numérique terrain et carte des sols de la FAO), lesquelles ont permis de reproduire les caractéristiques naturelles du bassin à une résolution spatiale adaptée aux objectifs de l'étude. La méthodologie adoptée repose sur l'usage du système d'information géographique libre (QGIS) combiné avec le modèle hydrologique SWAT pour effectuer des opérations de modélisation des écoulements à l'échelle du bassin versant, et l'outil SWAT-Cup pour optimiser les opérations d'analyse de sensibilité et d'incertitude. Le processus de calibration est réalisé aux échelles temporelles journalière et mensuelle au cours de deux périodes représentatives de deux situations différentes du point de vue de l'occupation du sol (1984-86 et 2008-2011). Pour ce qui est de la validation, la période 1980-1981 a été retenue pour la première calibration, et la période 2012-2014 pour la seconde. La première année de ces différentes périodes (calibration et validation) sert à la stabilisation du modèle et n'est pas prise en compte dans les comparaisons. Les résultats obtenus en calibration et en validation sont satisfaisants quelle que soit la période considérée. Les coefficients de corrélation entre débits observés et simulés oscillent généralement autour de 0,8. De même, l'indice de Nash est toujours supérieur à 0,65. Ces résultats confirment que le modèle SWAT peut être utilisé pour l'estimation des débits dans divers projets d'aménagements sur les cours d'eau non jaugés de la région. L'on pourrait également s'en servir pour prédire l'impact du changement climatique et des modes d'occupation du sol futurs sur les écoulements, ce qui améliorerait la gestion des ressources en eau dans cette région.

Mots-clés : *région équatoriale, Nyong, SWAT, écoulements, calibration, validation.*

Abstract

Hydrological modelling and its contribution in a situation of non-stationarity and incomplete hydropluviometric data (application to the Nyong watershed at Mbalmayo outlet)

The objective of this article is to verify the performance of the SWAT model in reproducing flows in the equatorial region (case of the Nyong watershed) in a situation of land-use changes. For this, two main types of input data were used, namely : meteorological data (rainfall, maximum and minimum temperatures, winds, relative humidity and insolation) from the MERRA-2 project and spatial data (satellite images, model digital terrain and FAO soil map), which made it possible to reproduce the natural characteristics of the basin at a spatial resolution suited to the objectives of the study. The methodology adopted is based on the use of the free geographic information system (QGIS) combined with the hydrological model SWAT to perform flow modelling operations at the watershed scale, and the SWAT-Cup tool to optimize sensitivity and uncertainty analysis operations. The calibration process is carried out on daily and monthly time scales during two periods representative of two different situations from the point of view of land-use (1984-86 and 2008-2011). As regards validation, the period 1980-1981 was used for the first calibration and the period 2012-2014 for the second. The first year of these different periods (calibration and validation) serves to stabilize the model and is not taken into account in the comparisons. The results obtained in calibration and validation are satisfactory whatever the period considered. The correlation coefficients between observed and simulated flows generally oscillate around 0.8. Likewise, the Nash index is always greater than 0.65. These results confirm that the SWAT model can be used for the estimation of flows in various development projects on ungauged rivers in the region. It could also be used to predict the impact of climate change and future land use patterns on runoff, which would improve water resource management in this region.

Keywords : *equatorial region, Nyong, SWAT, flows, calibration, validation.*

1. Introduction

Les données de débits sont généralement lacunaires et même parfois non disponibles pour un grand nombre de cours d'eau équatoriaux après la décennie 1980 [1], ce qui rend difficile, voire impossible des opérations importantes comme le dimensionnement d'ouvrages hydrauliques par exemple. Dans ce contexte, il est nécessaire de pouvoir transformer les données météorologiques relativement plus faciles d'accès, en données hydrométriques, d'où l'intérêt de la modélisation pluie-débit basée sur l'utilisation de modèles à même de simuler la réalité. La modélisation hydrologique peut se faire selon une approche globale ou semi-distribuée. L'approche globale est celle qui considère le bassin versant comme une seule entité. Les modèles GR2J (Rural Engineering model with two daily Parameters) ou encore GR4J (Rural Engineering model with four daily Parameters) sont quelques-uns des modèles de référence généralement utilisés dans ce type d'approche. Y sont essentiellement pris en compte dans cette dernière, les paramètres comme les précipitations, l'évapotranspiration et la capacité en eau du sol. Dans l'approche semi-distribuée par contre, le bassin versant est considéré comme une entité plus complexe dont la modélisation des écoulements nécessite une subdivision en surfaces élémentaires homogènes. Les modèles comme SWAT (Soil and Water Assessment Tool), HSPF (Hydrologic Simulation Program-Fortran), HEC-RAS (Hydrologic Engineering Centers River Analysis System), etc. sont bien connus pour leurs performances dans ce type de modélisation. Ces modèles requièrent un large éventail de données d'entrée [2], allant des caractéristiques physiques du bassin (pentes, occupation du sol, pédologie, etc.) aux données météorologiques (précipitations, températures maximales et minimales, vitesse des vents, humidité relative, insolation, etc.). En termes de performance, la comparaison des approches globale et semi-distribuée en modélisation pluie-débit est une problématique qui

s'est fortement développée depuis longtemps [3]. L'ensemble des recherches scientifiques dans ce sens donne une image relativement complexe. Certaines d'entre elles affirment clairement le bénéfice que l'on peut avoir à utiliser l'approche semi-distribuée [4 - 6]. Par contre, d'autres travaux [7, 8] présentent des conclusions allant en sens inverse. Ces recherches montrent également que l'approche globale donne de meilleurs résultats dans les petits bassins versants, alors que l'approche semi-distribuée est plus performante dans le cas des grands bassins versants. Cette constatation indique que les modèles semi-distribués sont particulièrement applicables pour les bassins hydrographiques complexes en raison de leur hétérogénéité physique [9]. C'est ce qui explique le choix de cette approche pour ce travail. L'objectif de cet article est de modéliser le fonctionnement hydrologique du bassin versant forestier du Nyong à partir du modèle SWAT. Le choix de ce modèle dans la large gamme de modèles semi-distribués disponibles s'explique par non nombre réduit de paramètres de calage sensibles [10], étant donné le contexte peu jaugé du bassin. Le choix du bassin du Nyong quant à lui s'explique par le fait qu'il est l'un des rares en Afrique centrale équatoriale ayant enregistré des changements significatifs d'occupation du sol entre les années 1970 et les années 2010, ce qui permet d'évaluer la performance du modèle à simuler les écoulements dans la région en situation de changement d'états de surface. La prise en compte de cet aspect constitue actuellement un enjeu majeur de la modélisation des écoulements des cours d'eau tropicaux, au regard de la forte anthropisation récemment observée dans leurs bassins versants dont les impacts hydrologiques sont bien connus. Les récents travaux de modélisation effectués en Afrique subsaharienne ont déjà commencé à intégrer ces aspects [11, 12]. Il serait également intéressant de poursuivre ce travail sur des bassins plus étendus.

2. Matériel et méthodes

2-1. Cadre d'étude

L'étude porte sur le bassin versant du Nyong à Mbalmayo (14438 km^2). Ce bassin est situé en Afrique centrale entre les latitudes 3°22' N et 4°40' N et les longitudes 11°20' E et 13°30' E ***(Figure 1)***. Il appartient au domaine et sub-équatorial, avec des précipitations abondantes (oscillant autour de 1600 mm), réparties sur quatre saisons d'inégale importance, dont deux sèches et deux pluvieuses. Les saisons de pluies (du printemps et d'automne boréal) sont généralement très humides avec des totaux records avoisinant 900 mm et marquées par de nombreux orages qui occasionnent parfois des crues importantes. La saison sèche d'hiver est la seule véritable saison sèche de la région, avec des précipitations moyennes oscillant respectivement autour de 90 mm, la saison sèche d'été ayant tendance à devenir de plus en plus humide dans la région depuis les années 80 [13]. Les bassins du Nyong sont disséqués, profondément raviné et découpé en collines aux versants convexes et en larges vallées marécageuses [14]. Il est observé sur ce dernier de part et d'autre du cours d'eau principal un paysage topographique en gradins qui semblent être la résultante d'une tectonique cassante. Dans la partie médiane, on note de l'est à l'ouest de chaque bassin la vallée majeure du Nyong (600 m d'altitude en moyenne), qui représente le fossé d'effondrement. Il s'agit d'un vaste couloir au centre duquel coule la rivière principale. Cette unité est directement suivie de chaque côté du cours d'eau principal par un grand plateau dont l'altitude moyenne avoisine 700 m, puis des massifs (800 m d'altitude en moyenne) qui sont hérissés de quelques inselbergs situés majoritairement à la ligne de partage des eaux avec les bassins voisins, et dont l'altitude peut parfois atteindre 1200 m [1]. Le substratum géologique de ce bassin est constitué d'un socle granito-gneissique sur lequel se développent des sols ferralitiques (sur les sommets et les versants) et hydromorphes (dans les bas-fonds). La végétation rencontrée sur ce dernier est une forêt dense semi-décidue à Sterculiacées et Ulmacées fortement soumise aux actions anthropiques [15].

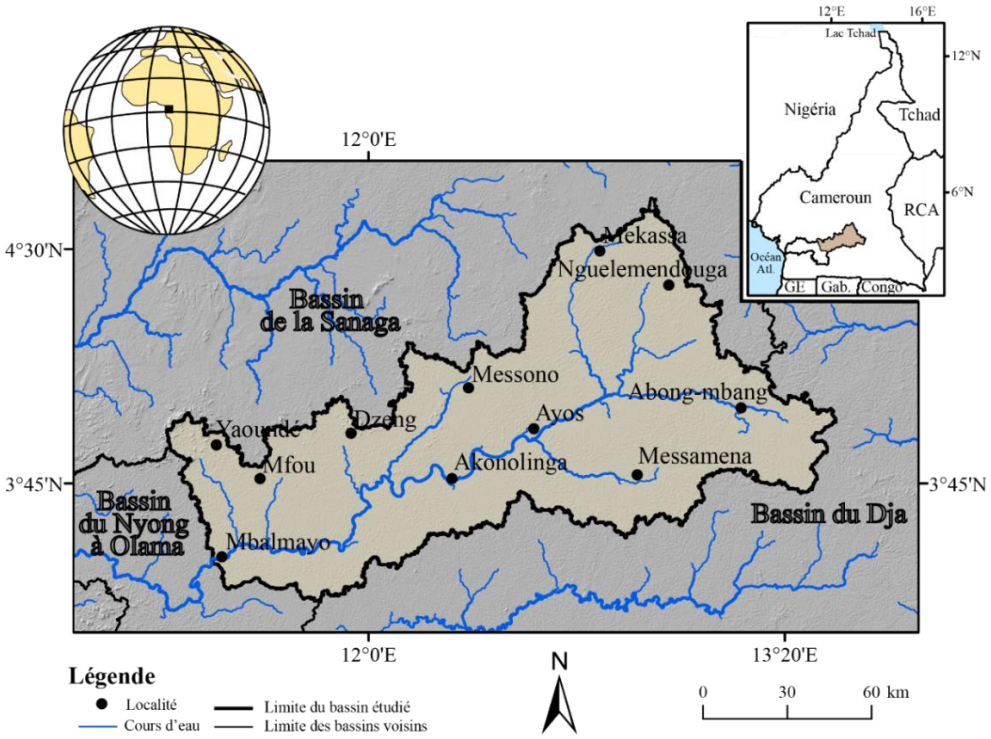

Figure 1 : *Localisation du bassin versant du Nyong à Mbalmayo*

2-2. Sources de données

Le modèle SWAT nécessite d'une part l'utilisation des données journalières de températures maximale et minimale (°C), précipitations (mm/j), humidité relative (%), vitesse du vent (m/s) et le rayonnement solaire (en W/m^2). Les données MERRA-2 ont été retenues pour cette étude. C'est est la plus récente réanalyse atmosphérique de l'ère moderne des satellites réalisée par Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) de la NASA. Cette réanalyse est l'une des rares proches des observations à disposer de tous ces paramètres à la fois. Les données MERRA-2 utilisées dans cette étude ont été collectées au format ASCII à 11 stations (existantes et virtuelles) sur le site https://giovanni.gsfc.nasa.gov. Les stations virtuelles ***(Tableau 1** et **Figure 2)*** ont été créées pour pouvoir collecter les données dans tous les coins du bassin, ceci compte tenu du fait que le modèle utilisé divise le bassin en sous-bassins, et que les données météorologiques considérées pour un sous bassin sont celles des stations les plus proches.

Tableau 1 : *Codes, noms et coordonnées des stations (existantes et virtuelles) de collecte des données météorologiques MERRA-2 utilisées*

Codes	Noms	Latitude	Longitude	Altitude
1	Abong mbang	3,96	13,18	717
2	Akonolinga	3,79	12,25	615
3	Ayos	3,9	12,51	578
4	Mbalmayo	3,51	11,5	420
5	Messamena (SV)	3,73	12,83	658
6	Messono (SV)	4,06	12,32	759
7	Mfou (SV)	3,71	11,64	420
8	Ndzeng (SV)	3,74	11,89	427
9	Nguelemendouga (SV)	4,37	12,99	696
10	Nyabong (SV)	4,03	12,75	658
11	Yaoundé	3,83	11,51	715

SV : Station virtuelle

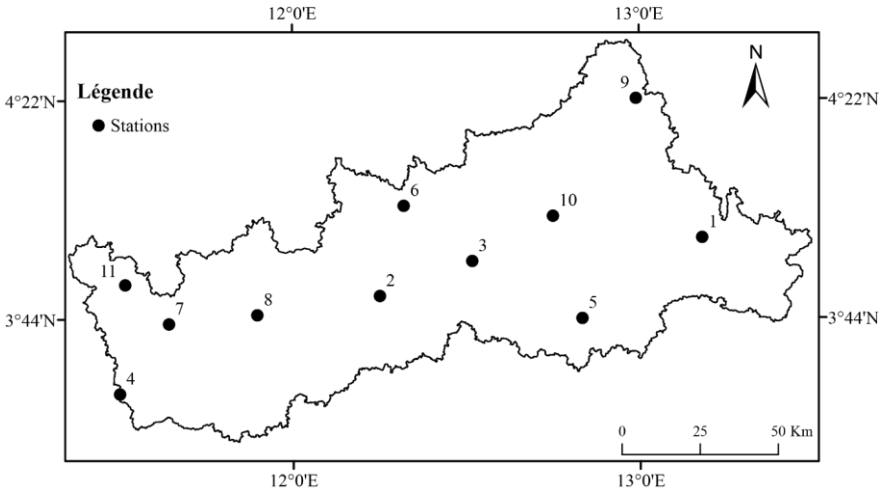

Figure 2 : *Distribution spatiale des stations (existantes et virtuelles) de collecte des données météorologiques MERRA-2 utilisées*

D'autre part, l'usage du modèle SWAT nécessite des données spatiales (Modèle numérique de terrain, occupation du sol et types de sols). Les données SRTM (30 m de résolution), les classifications, et la carte des sols de la FAO ont été utilisées dans cette étude ***(Figure 3)***. A partir des données SRTM, une carte des pentes ***(Figure 3)*** du bassin est automatiquement générée à partir SWAT. Les classifications utilisées ont été faites au moyen des images satellitaires des années retenues et à partir du logiciel SNAP. Celle de 1983 est utilisée pour la première simulation, tandis que celle de 2012 est utilisée pour la seconde. La carte mondiale des sols de la FAO a été téléchargée sur http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/metadata.show?id=14116, puis la partie concernée par le bassin étudié a été extraite.

2-3. Description du modèle

SWAT est un modèle hydrologique semi-distribué à base physique, conçu et développé par les chercheurs de l'USDA (United States Department of Agriculture) [16, 17]. L'aspect physique du modèle permet de reproduire les processus qui ont réellement lieu dans l'environnement, à l'aide de nombreuses et parfois complexes équations [18, 19]. Ce modèle est continu dans le temps, il est conçu pour faire des simulations sur de longues périodes [20]. Le modèle SWAT analyse le bassin versant dans toute sa globalité mais en le subdivisant en sous-bassins versants contenant des portions homogènes appelées unités de réponse hydrologiques (URH). Cependant, chaque URH se caractérise par une occupation du sol unique, un type de sol et de sous-sol uniques et une topographie moyenne. SWAT permet d'avoir accès aux différentes variables du bilan hydrologique à l'échelle de l'URH pour chaque pas de temps (journalier, mensuel et annuel), et ce sur toute la période de simulation [21].

2-4. Critères de qualité

La validité du modèle est vérifiée par une comparaison des débits calculés (Q_{cal}) et observés (Q_{obs}) à travers des critères subjectifs et quantitatifs. Dans le premier cas, une bonne concordance entre les hydrogrammes de débits observés et simulés attestera d'un bon calibrage. Dans le second, on fera recours à deux des critères les plus utilisés pour la validation des modèles hydrologiques, en occurrence le coefficient de corrélation (r) et l'indice de Nash (NSE). Le coefficient de corrélation est le rapport entre la covariance (γ) de deux variables et le produit de leurs écarts types. Il donne une indication sur l'intensité et le sens de la relation linéaire entre deux variables. Variant entre -1 et +1, il rend compte d'une corrélation forte s'il est inférieur à -0,5 ou supérieure à 0,5.

$$r = \frac{\gamma(X,Y)}{\sigma X \sigma Y} \quad (1)$$

Le critère de Nash-Sutcliffe donne un rapport de la différence au carré entre les observations et les estimations pour les rapporter à un écart sur la moyenne des observations. Il varie entre 0 et 1. Lorsque le critère de Nash vaut 1, les estimations sont identiques aux observations. Lorsqu'il vaut 0, il est considéré que le modèle n'est pas mieux que si l'on avait pris à chaque pas de temps, la moyenne temporelle des observations.

$$NSE = 1 - \frac{\Sigma(Q_{est} - Q_{obs})^2}{\Sigma(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (2)$$

Il est certes communément admis dans la littérature [1, 22], qu'un coefficient de corrélation et un indice de Nash $\geq 0,5$ sont acceptables. Mais dans cette étude, la calibration et la validation ne seront considérés comme satisfaisantes que si $r \geq 0,8$ et $NSE \geq 0,65$.

2-5. Calage et validation du modèle

Le jeu de données à disposition permet l'exploitation des périodes s'étalant de 1980 à 2016. Cependant, les nombreuses indisponibilités de données restreignent les années d'application. Deux périodes ont été choisies pour déterminer les paramètres de calibration (1984-86 et 2008-2011). Ces deux périodes ont l'avantage d'être bien réparties dans le temps et représentent également deux situations différentes du point de vue de l'occupation du sol. Pour ce qui est de la validation, la période 1980-1981 a été retenue pour la première calibration, et la période 2011-2014 pour la seconde. La première année de ces différentes périodes (calibration et validation) servira à la stabilisation du modèle et ne sera pas prise en compte dans les comparaisons. S'agissant du processus de calibration/validation proprement dit, la méthode préconisée par les concepteurs de SWAT se nomme Shuffled Complex Evolution Algorithm - University of Arizona (SCE-UA). Cet algorithme permet de trouver le jeu de paramètres optimal et une description détaillée du fonctionnement de l'algorithme est donnée [23]. La première phase de calage dans SWAT consiste à comparer les sorties du modèle en termes de pourcentage d'eau ruisselée et infiltrée avec les données observées. Bien que les pourcentages d'eau ruisselée et infiltrée observés ne soient pas connus, une estimation peut être faite à partir du programme Baseflow développé [24] et amélioré [25]. Une fois que cette comparaison est effectuée, on procède à la fixation des limites des paramètres qui ont une influence sur l'eau ruisselée et infiltrée. Ensuite, on fait varier les autres paramètres de façon automatique jusqu'à ce qu'ils soient du même ordre de grandeur. Une simulation est faite avec de nouvelles données d'entrée et les résultats sont comparés avec les données de terrain (données mesurées) afin de vérifier le comportement du modèle sujet au jeu de paramètres trouvés.

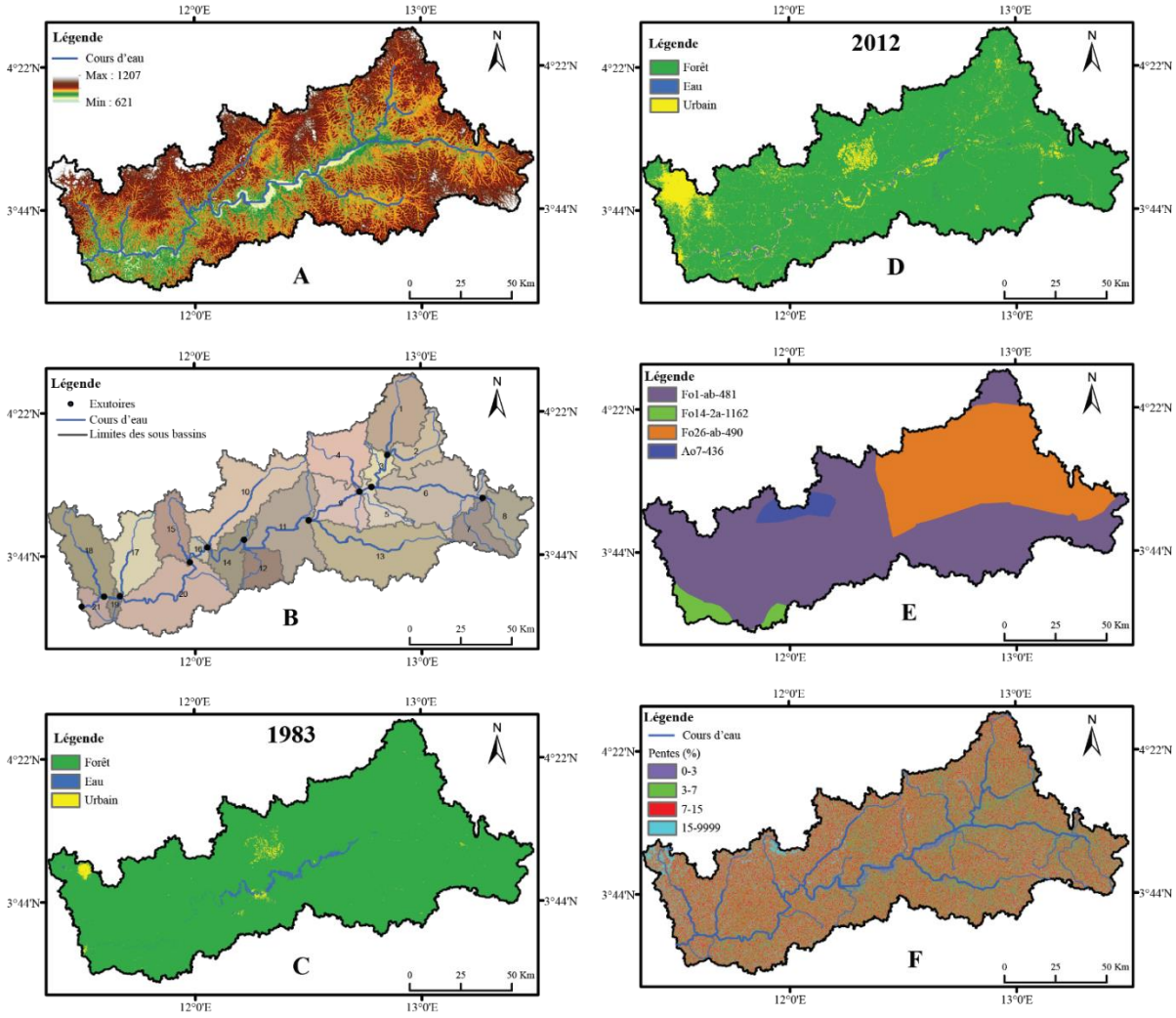

Figure 3 : *Données spatiales utilisées sur SWAT pour les différentes simulations*

3. Résultats

3-1. En calibration

Les paramètres de calibration pour les deux périodes retenues (1985-86 et 2009-2011) sont présentés dans le ***Tableau 2***. Ces paramètres sont les mêmes au cours des deux périodes. Cela peut en partie s'expliquer par une situation pratiquement identique du milieu physique du bassin. Le taux de couverture végétale est le seul élément susceptible d'avoir connu une évolution notable, qui ne s'élève qu'à -6 % environ. S'agissant de la première simulation (1985-1986), les résultats de calage du modèle SWAT montrent que les débits journaliers et mensuels simulés concordent avec ceux observés à la station de Mbalmayo ***(Figures 4, 5 et 6)***. Ce calage satisfaisant se traduit par un coefficient de corrélation et un indice de Nash de 0,81 et 0,65 pour les débits journaliers. Pour les débits mensuels, les valeurs de ces deux fonctions critères sont respectivement de 0,88 et 0,65 ***(Tableau 3)***. On peut cependant relever une sous-estimation des écoulements par le model qui oscille entre -6,4 % et -12,4 % ***(Tableau 4)***.

Tableau 2 : *Paramètres calibrés pour les différentes périodes de calibration*

Paramètres	Définition	Plage	Valeur calibrée
Première simulation			
ESCO	Soil evaporation compensation factor	0,2 - 0,99	0,95
EPCO	Plant uptake compensation factor	0.2 - 0,99	0,99
CN2	Runoff Curve Number	65 - 85	70
Deuxième simulation			
ESCO	Soil evaporation compensation factor	0,2 - 0,99	0,95
EPCO	Plant uptake compensation factor	0.2 - 0,99	0,99
CN2	Runoff Curve Number	65 - 85	70

La seconde simulation (2009-2011) affiche des résultats sensiblement meilleurs que la première en calibration, qui s'observent par un synchronisme plus net entre les courbes de débits comparés aux pas de temps journalier et mensuel ***(Figures 4, 5 et 6)***. Pour les débits journaliers, les performances du modèle se confirment par un coefficient de corrélation et un indice de Nash de 0,89 et de 0,81 ***(Tableau 3)***. Les débits mensuels quant à eux affichent un coefficient de corrélation et un indice de Nash de 0,94 et 0,86 ***(Tableau 3)***. Contrairement à la première période, le modèle surestime néanmoins les écoulements en calibration suivant des taux allant de 2 % à 12,1 % ***(Tableau 5)***.

Tableau 3 : *Valeurs des fonctions critères r et NSE pour les différents essais de calibration et de validation des débits journaliers et mensuels*

Débits journaliers			**Débits mensuels**		
Paramètres	Calibration	Validation	Paramètres	Calibration	Validation
Première simulation			Première simulation		
r	0,81	0,86	r	0,88	0,9
NSE	0,65	0,81	NSE	0,69	0,79
Deuxième simulation			Deuxième simulation		
r	0,89	0,81	r	0,94	0,86
NSE	0,81	0,68	NSE	0,86	0,73

Tableau 4 : *Ecarts entre les modules annuels observés et simulés en calibration et en validation durant la première période*

Années	Observé	Simulé	Ecarts (%)
Periode de calibration			
1985	138,5	120,9	-12,7
1986	126,9	139,2	-6,4
Periode de validation			
1981	129,5	146,8	13,3

Tableau 5 : *Ecarts entre les modules annuels observés et simulés en calibration et en validation durant la seconde période*

Années	Observé	Simulé	Ecarts (%)
Periode de calibration			
2009	141,9	159,0	12,1
2010	126,9	139,2	9,7
2011	134,8	137,6	2,0
Periode de validation			
2012	106,8	142,6	33,5
2013	121,8	149,8	23
2014	160,8	142,1	-11,7

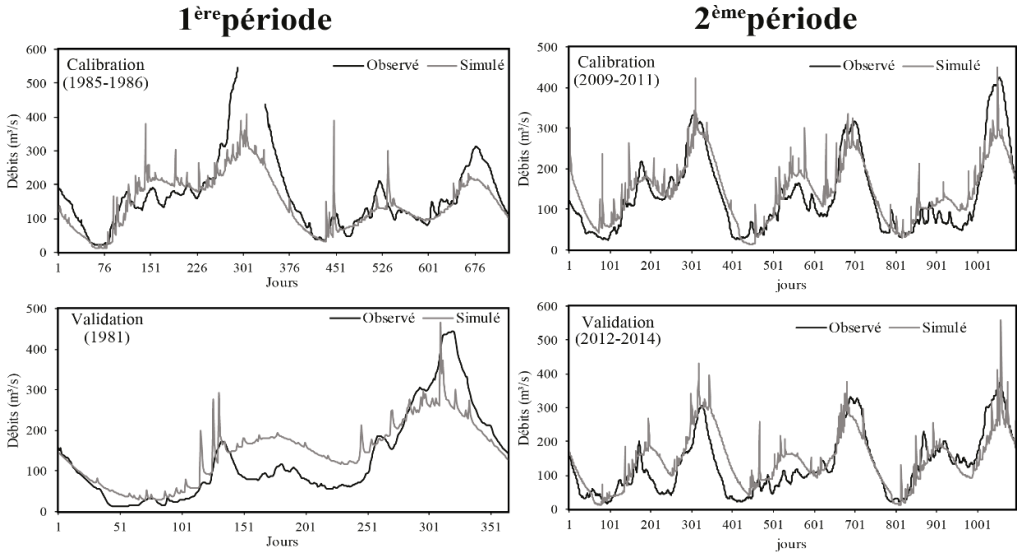

Figure 4 : *Comparaison des débits journaliers observés et simulés au cours des deux périodes retenues en calibration et en validation*

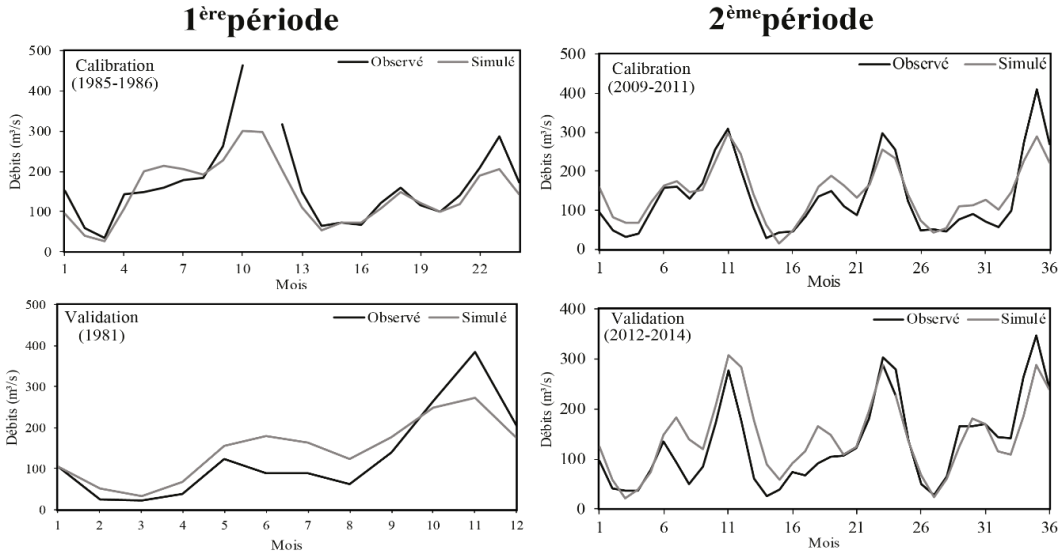

Figure 5 : *Comparaison des débits mensuels observés et simulés au cours des deux périodes retenues en calibration et en validation*

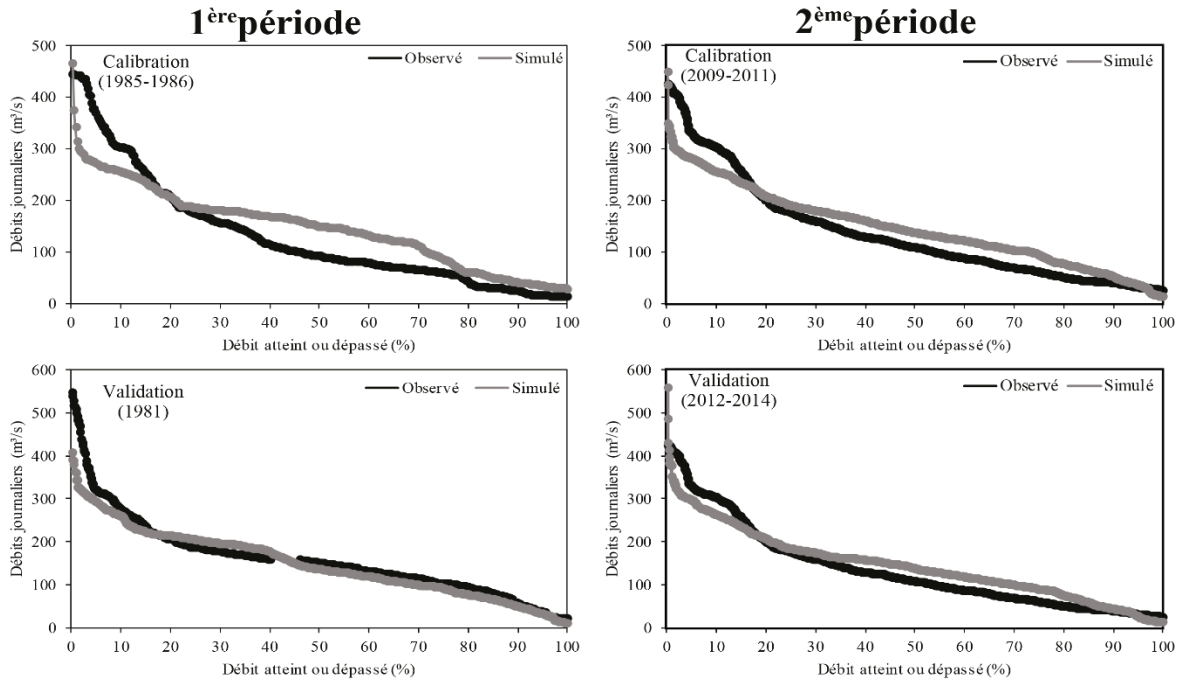

Figure 6 : *Comparaison des courbes des débits journaliers atteints ou dépassés observés et simulés au cours des deux périodes retenues en calibration et en validation*

3-2. En validation

En validation, le modèle est légèrement plus performant dans la simulation des débits journaliers et mensuels durant la première période ***(Figures 4, 5 et 6)***, bien qu'un surplus de 13 % soit noté pour le débit simulé de l'année retenue ***(Tableau 4)***. Le coefficient de corrélation et l'indice de Nash calculés pour les débits journaliers sont de 0,86 et 0,81. Ceux obtenus pour les débits mensuels sont de 0,9 et de 0,79 ***(Tableau 3)***. Pour la seconde période par contre, la concordance entre les courbes de débits observés et simulés est moins nette qu'en période de calibration ***(Figures 4, 5 et 6)***. Les fonctions critères retenues attestent également d'une performance satisfaisante, mais légèrement moins accrue du modèle à reproduire les débits journaliers et mensuels. Le coefficient de corrélation et l'indice de Nash affichent des valeurs de 0,81 et 0,68 pour les débits journaliers. Leurs valeurs sont de 0,86 et 0,73 pour les débits mensuels ***(Tableau 3)***. Les modules annuels sont surestimés de -33,5 % et -23 % au cours des années 2012 et 2013, mais sous-estimés de -11,7 en 2014 ***(Tableau 5)***.

4. Discussion

Dans cette étude comme dans plusieurs autres entreprises à travers le monde [26 - 33], les débits de certains cours d'eau ont pu être simulés à partir du modèle SWAT. Le présent travail confirme la capacité du modèle SWAT à reproduire les écoulements de manière satisfaisante en région équatoriale. Des résultats similaires ont été obtenus partout ailleurs. Certains auteurs [26] ont utilisé des données observées de trois bassins versants, dont les tailles varient de 122 à 246 km^2, pour valider avec succès les écoulements simulés à partir de SWAT. D'autres auteurs [25] ont aussi évalué avec succès la capacité du modèle à reproduire les écoulements dans le bassin du golfe du Texas sur des bassins de tailles comprises entre 2253 km^2 et 304260 km^2. Environ 1000 séries de débits observés entre 1960 à 1989 avaient été utilisées pour étalonner et valider le modèle. Les débits mensuels simulés de trois grands bassins (20593 km^2 à 108 788 km^2) étaient

seulement plus élevés que les débits observés de 5 %, avec des écarts-types entre les observations et les simulations de moins de 2 %. Le ruissellement a été simulé sur dix ans pour un bassin versant du nord du Mississippi à partir du modèle SWAT [27]. Les résultats obtenus confirment des simulations raisonnables des écoulements sur une base quotidienne et annuelle pour plusieurs sous-bassins. Le modèle SWAT a également été validé pour la reproduction des écoulements du bassin versant du ruisseau Mill au Texas pour les années 1965-1968 et 1968-1975 [28]. Les débits mensuels ont été bien simulés, mais le modèle a surestimé les débits de quelques années au printemps et en été. La surestimation a pu être expliquée par des variations des précipitations au cours de ces mois. La capacité du SWAT à prédire l'écoulement fluvial dans des conditions climatiques variables pour trois sous-bassins versants imbriqués dans le bassin versant expérimental de 610 km2 de la rivière Little Washita dans le sud-ouest de l'Oklahoma a été évaluée [31]. Il ressort également que SWAT pouvait simuler de manière adéquate le ruissellement dans des conditions climatiques sèches, moyennes et humides dans un sous-bassin hydrographique. Cette étude révèle la capacité du modèle SWAT à simuler les écoulements en région équatoriale en situation de changement d'occupation du sol. Les indices de Nash obtenus en calibration et en validation au pas de temps journalier pour les premières simulations (années 1980) sont de 0,65 et 0,81. Ceux obtenus pour les secondes (années 2010) sont de 0,81 et 0,68. Des résultats similaires ont été obtenus sur le bassin de la Mefou (sous bassin du Nyong) à partir du Modèle HEC-RAS [11]. Les indices de Nash obtenus en calibration et en validation à ce même pas de temps oscillent entre 0,5 et 0,6.

5. Conclusion

Le présent article est consacré à la modélisation des écoulements d'un bassin versant équatorial en urbanisation (Nyong) à partir du modèle SWAT. Son objectif est de vérifier la capacité de cet outil dont la robustesse a mainte fois été confirmée ailleurs à prendre en compte de manière efficace la dynamique des états de surface dans la reproduction des écoulements en région équatoriale. Pour ce faire, deux périodes (se situant autour des années 1980 et des années 2010) clairement distinctes du point de vue de l'occupation du sol sur ce bassin ont été retenues pour les simulations. Les résultats obtenus en calibration et en validation sont satisfaisants quelle que soit la période considérée. Les coefficients de corrélation entre débits observés et simulés oscillent généralement autour de 0,8. De même, l'indice de Nash est toujours supérieur à 0,65. Ces résultats confirment la bonne performance du modèle dans la région en terme de prédiction. Ils confirment également sa bonne capacité à prendre en compte l'évolution des états de surface dans ses simulations. Les légers décalages entre les observations et les simulations proviendraient des données météorologiques utilisées (réanalyses).

Références

[1] - V. B. EBODE, G. MAHE G, J. G. DZANA and J. A. AMOUGOU, *Water,* 12 (2020) 1 - 24
[2] - R. B. TALEB, M. NAIMI, M. CHIKHAOUI, D. RACLOT, M. SABIR, *European Scientific Journal,* 15 (2019) 311 - 333
[3] - J. WENDING, "Modélisation pluie-débit en zone méditerranéenne: comparaison d'approches globales/distribuées, conceptuelles/physico-déterministes : essai de prise en compte de la variabilité spatiale des pluies (application au bassin versant du Réal Collobrier)", Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, France, (1992) 250 p.
[4] - J. MICHAUD and S. SOROSHIAN, *Water Res.,* 30 (1994) 593 - 605
[5] - V. KRYSANOVA, A. BRONSTERT and D. L. MULLERWOHLFEIL, *Hydrol. Sci. J.,* 44 (1999) 313 - 331
[6] - D. P. BOYLE D, H. V. GUPTA, S. SOROSHIAN, V. KOREN, Z. ZHANG and M. SMITH, *Water Res.,* 37 (2001) 2749 - 2759

[7] - F. DIERMANSE, *Phys. Chem. Earth B.*, 24 (1999) 787 - 792
[8] - T. S. KOKKONEN and A. J. JAKEMAN, *Water Res.,* 37 (2001) 2345 - 2352
[9] - G. TEGEGNE, D. K. PARK and Y. O. KIM, *J. Hydrol. Reg. Stud.,* 14 (2017) 49 - 66
[10] - J. SINGH, H. VERNON KNAPP and D. MISGANAW, Hydrologic Modeling of the Iroquois River Watershed Using HSPF and SWAT, Illinois State Water Survey Contract Report 2004-08, (2008)
[11] - J. E. PATUREL, G. MAHE, P. DIELLO, B. BARBIER, A. DEZETTER, C. DIEULIN, H. KARAMBIRI, H. YACOUBA and A. MAIGA. *Hydrol. Proc.*, 31 (2017) 811 - 824
[12] - C. JOURDAN, "Approche mixte instrumentation-modélisation hydrologique multi-échelle d'un bassin tropical peu jaugé soumis à des changements d'occupation du sol : cas du bassin de la Mefou (Yaoundé, Cameroun)", Thèse de Doctorat, Université de Montpellier, France, (2019)
[13] - G. LIENOU, G. MAHE, J. E. PATUREL, E. SERVAT, D. SIGHOMNOU, G. E. EKODECK, A. DEZETTER et C. DIEULIN, *Journal des Sciences Hydrologiques,* 53 (2008) 789 - 800
[14] - J. C. OLIVRY, Fleuves et rivières du Cameroun, MESIRES-ORSTOM, Paris, (1986)
[15] - R. LETOUZEY, Notice de la carte phytogéographique du Cameroun au 1 :500.000. IRA, Yaoundé, Institut de la Carte Internationale de la Végétation, Toulouse, (1985)
[16] - J. G. ARNOLD, P. M. ALLEN and G. BERNHARDT, *J. Hydrol.*, 142 (1993) 47 - 69
[17] - J. G. ARNOLD, R. SRINIVASAN, R. S. MUTTIAH and J. R. WIILLIAMS, *J. Am. Water Resour. Assoc.,* 34 (1998) 73 - 89
[18] - S. L. NEITSCH S, J. G. ARNOLD, J. R. KINIRY and J. R. WILLIAMS, Soil and water assessment tool: theoreti Agricultural Research Service, Blackland Research Center, Texas A&M University, Etats-Unis, (2005)
[19] - J. G. ARNOLD, J. R. KINIRY, R. SRINIVASAN, J. R. WILLIAMS, B. HANEY and S. L. NEITSCH, Soil and water assessment tool: input/output documentation, version 2012, TR-439, Texas Water Resources Institute, College Station, Etats-Unis, (2012)
[20] - S. PAYRAUDEAU, Modélisation distribuée des flux d'azote sur des petits bassins versants méditerranéens. ENGREF, Paris, France, (2002)
[21] - S. L. NEITSCH S, J. G. ARNOLD, J. R. KINIRY and J. R. WILLIAMS, Soil and water assessment tool: user manual. Agriculture Research Service, Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Temple (TX), Etats-Unis, (2001)
[22] - D. N. MORIASI D, J. G. ARNOLD, M. W. VAN LIEW, R. L. BINGER, R. D. HARMEL and T. VEITH, *Trans. ASABE,* 50 (2007) 885 - 900
[23] - A. V. GRIENSVEN, T. MEIXNER, S. GRUNWALD, T. BISHOP, M. DILUZIO and R. SRINIVASAN, *J. Hydrol.,* 324 (2006) 10 - 23
[24] - J. G. ARNOLD, P. M. ALLEN, R. MUTTIAH and G. BERNHARDT, *Ground Water,* 33 (1995) 1010 - 1018
[25] - J. G. ARNOLD, R. SRINIVASAN, T. S. RAMANARAYANAN, M. DI LUZIO, *Water Sci. Tech.,* 39 (1999) 121 - 133
[26] - J. G. ARNOLD and P. M. ALLEN, Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds. *J. Hydrol.,* 176 (1996) 57 - 77
[27] - R. L. BINGNER, *Trans. ASAE,* 39 (1996) 85 - 90
[28] - R. SRINIVASAN, T. S. RAMANARAYANAN, J. G. ARNOLD, S. T. BEDNARZ, *J. Am. Water Res. Assoc.,* 34 (1998) 91 - 101
[29] - W. D. ROSENTHAL and D. W. HOFFMAN, *Trans. ASAE,* 42 (1999) 1591 - 1598
[30] - C. SANTHI, J. G. ARNOLD, J. R. WILLIAMS, W. A. DUGAS, R. SRINIVASAN and L. M. HAUCK Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *J. American Water Res. Assoc.*, 37(2001) 1169 - 1188
[31] - M. W. VAN LIEW and J. GARBRECHT, *J. American Water Res. Assoc.,* 39 (2003) 413 - 426
[32] - M. GOVENDER and C. S. EVERSON, *Hydrol. Process,* 19 (2005) 683 - 692
[33] - A. OTMANE, K. BABA HAMED and A. BOUANANI, *Jour. Wat. Sci.,* 32 (2019) 117 - 144