

Mise en œuvre d'un modèle hydrologique conceptuel sur le bassin versant de la Sisaony, Région Analamanga, Madagascar

Rakotoarisoa M.¹, Fleurant C.¹, Randriamaherisoa A.² Razakamanana T.^{1,3}

1. Université d'Angers, LETG-Angers LEESA UMR 6554 CNRS, UFR Sciences, 2 Bd Lavoisier, 49045 Angers cedex 1 (France).
 2. Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Département Hydraulique (Madagascar).
 3. Université de Toliara Département des Sciences de la Terre, Faculté des Sciences (Madagascar)
-

Résumé- La compréhension de tous les processus dans le bassin versant est primordiale pour tout travail hydrologique. Ainsi, toute simulation doit être aussi plus réaliste que possible. Pour parvenir à cet accord, l'objectif principal de cette étude est de chercher un modèle physique pluie-débit en utilisant une méthode réaliste. L'outil d'évaluation du sol et de l'eau (ou Soils-Water Assessment Tool abrégé SWAT) semble être un modèle hydrologique qui convient à nos besoins, car il est capable de simuler tout le processus dans le bassin versant, et parce que c'est une distribution complète. Utilisant les données SIG (Système d'Information Géographique), l'application du SWAT permet de préciser l'hydrogramme du bassin de la Sisaony (740 km²) suite à un étalonnage des paramètres entre 2003 et 2004. Les principaux paramètres sélectionnés ont été ajustés afin de valider avec succès le modèle. Des illustrations et discussions ont été menées sur les résultats afin d'évaluer la nécessité du modèle pour son utilisation future.

Mots-clés : *bassin versant, hydrologie, SWAT, hydrogramme, Sisaony, Madagascar*

Abstract- The understanding of all process in the watershed is primordial for any hydrological work. So, all simulation has to be as realistic as possible. In order to achieve this deal, the main purpose of this paper is to seek for a physical rainfall-runoff model using a realistic method. The "Soil and Water Assessment Tool" (SWAT) seems to be a hydrological model that suits our needs because it is able to simulate all the process in the watershed and because it is a full distributed one. Using GIS data (Geographical Information System), SWAT application permits to precise the hydrogramme of the Sisaony basin (740 km²) following a calibration of the parameters between 2003 and 2004. Main selected parameters were adjusted to validate successfully the model. Illustrations and discussions have been done about the results. One purpose to evaluate the model for the future use would be necessary.

Keywords: *watershed, hydrology, SWAT, hydrogramme, Sisaony, Madagascar*

1. Introduction

La nécessité de la compréhension du fonctionnement des cours d'eau est indispensable pour la gestion des ressources mais aussi pour la prévention des risques causés par les inondations. Cette question est d'autant plus importante pour les régions des hautes terres malgaches où les principales sources d'alimentation en eau proviennent des eaux de surface [1].

Le secteur qui fait l'objet de cette étude est le bassin versant de la rivière Sisaony, le premier affluent important de l'Ikopa qu'elle rejoint en aval de la station de Mahitsy. Administrativement, c'est un bassin versant de 740 km² dont la majeure partie est dans la région Analamanga, bordé au sud par la région de Vakinankaratra, à l'Ouest par celle de l'Itasy et à l'Est par la région d'Alaotra Mangoro (**figure 1**). À l'exception de quelques parcelles de reboisement en amont, le bassin est recouvert de savane maigre. Il présente un relief morcelé dont l'altitude varie de 1250 à 1 770 m. En matière de pédologie, il est dominé par les sols ferralitiques qui couvrent la quasi-totalité du bassin et par les sols alluviaux [2].

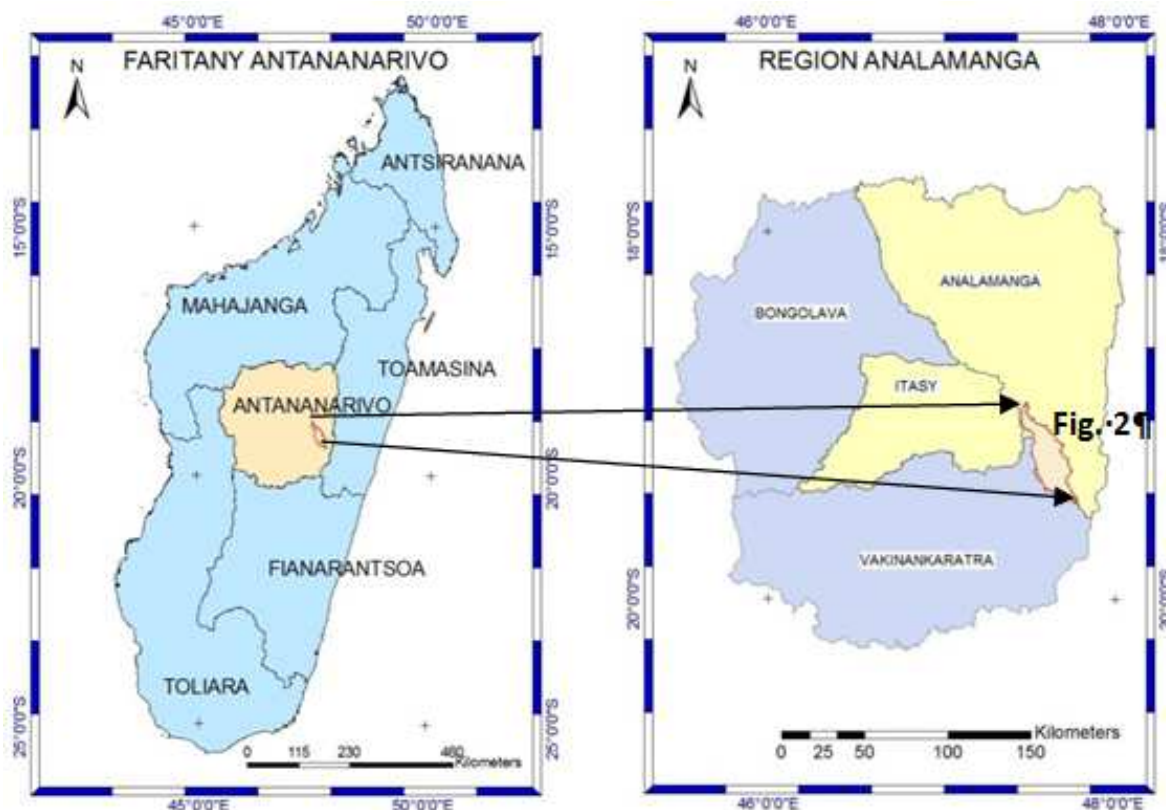


Figure 1 : Localisation du bassin versant de la Sisaony.

De plus, les effets récents dus aux changements climatiques peuvent engendrer une modification du régime hydrologique des cours d'eau, des lacs voire du régime marin. Ajouté à cela, l'impact des activités humaines sur l'environnement et les ressources naturelles ne cesse de se multiplier. Les effets de toutes ces actions sur le régime des cours d'eau ne sont pas encore maîtrisés et constituent la problématique de nombreuses publications. La présente étude se propose d'exploiter un outil qui pourrait répondre à cette demande en considérant le bassin versant (ensemble des surfaces topographiques drainées par un même point appelé exutoire) comme unité d'étude. Il s'agit de l'application du modèle hydrologique « Soil and Water Assessment Tools » (SWAT, [3]) sur l'un des plus importants cours d'eau de Madagascar, la Sisaony. SWAT intègre une multitude de fonctions permettant la transformation de la pluie en débit. Ces fonctions décrivent d'une façon minutieuse chaque étape du processus en s'attachant le plus possible au réalisme du phénomène.

2. Historique du modèle SWAT

Le Soil and Water Assessment Tool (SWAT) ou outil d'évaluation de l'eau et du sol a été développé par le docteur Jeff ARNOLD du centre de recherche du département d'agriculture américain de l'USDA (United States Department of Agriculture) en 1993 [3]). A l'origine, il a été conçu pour étudier les grands bassins versants allant de quelques centaines à plusieurs milliers de km² et les impacts des changements d'occupation du sol et des changements dans le type de pratique agricole sur l'eau.

Par ailleurs, il est issu de la combinaison de deux modèles : le modèle ROTO (Routing Outputs To the Outlet, [4]) et le modèle SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins, [5]) qui est un modèle distribué offrant une simulation à l'échelle du bassin versant. Progressivement, des améliorations ont été apportées au modèle. En 1998, Krysanova crée les unités de production et développe le modèle SWIM (Soil and Water Integrated Model, [6]) ; Vandenberghe [7] développe ESWAT en ajoutant un module de qualité de l'eau. A l'heure actuelle, le modèle SWAT a été largement utilisé aux Etats-Unis, en Europe, en Asie et en Afrique.

3. Matériels et méthodes

3.1. Stations de mesures

Pour l'acquisition des données, on a eu recours aux stations agrohydrométéorologiques environnant le bassin. Pour les données pluviométriques, la région d'Analamanga dispose 48 stations météorologiques [8] dont quelques-unes seulement sont fonctionnelles, les autres nécessitent une réhabilitation. Parmi ces stations, il en existe 14 qui disposent de données pluviométriques exploitables, et depuis la mise en place de l'APIPA en 2001, les données acquises y sont assez complètes (**figure 2a**). L'exploitation des données issues des ces stations s'est faite en fonction de leur proximité par rapport au bassin versant. En ce qui concerne les températures et les données, elles proviennent de la station d'Ampandrianomby.

Le suivi des débits pour la Sisaony est assuré par trois stations. D'amont en aval, on trouve la station d'Andramasina (S19°10'12,52'' - E47°30'30,17'', altitude : 1370 m), celle d'Ambatofotsy (PK22 sur la RN7, S19°04'28,69'' - E47°32'56,99'', altitude : 1271 m) et enfin celle d'Ampitatafika (RN1, 18°56'10.60"S - 47°28'44.12"E, altitude : 1255 m) considérée comme exutoire qui contrôle le bassin versant de 740 km² (**figure 2b**).

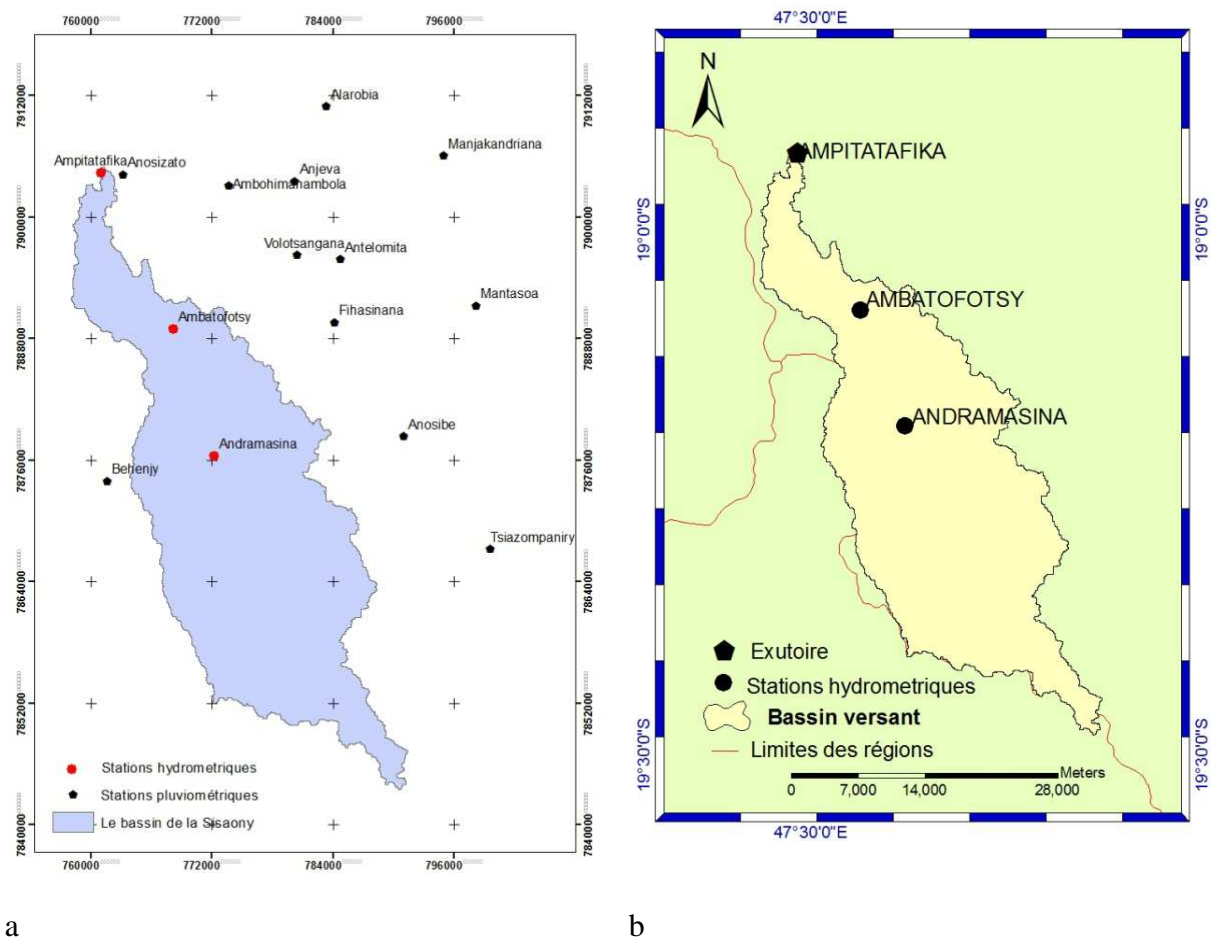


Figure 2. a- Stations météorologiques de la Sisaony. b- Stations hydrométriques du Bassin versant de Sisaony

3.2. Conceptualisation des phénomènes par le modèle SWAT

L'écoulement des eaux jusqu'à l'exutoire à travers le modèle se traduit par une conceptualisation des phénomènes simulés (figure 3).

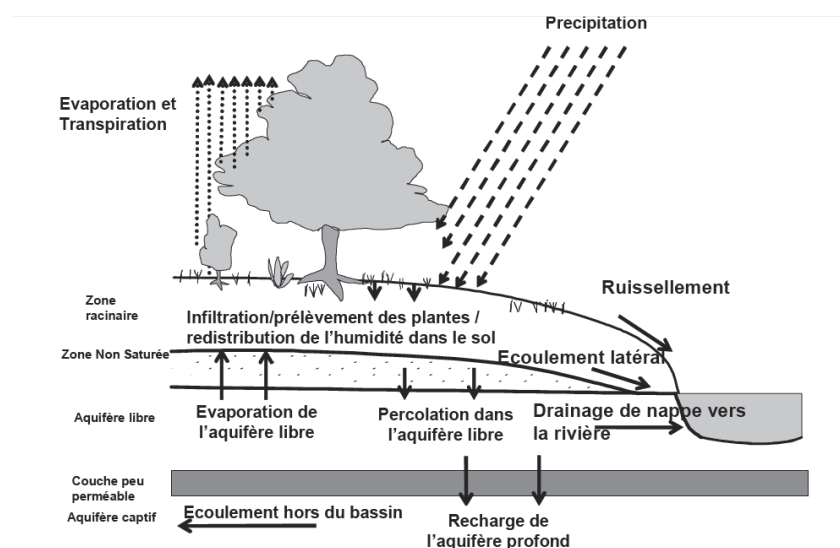


Figure 3 : Conceptualisation des processus dans SWAT [9]

Certains processus sont donc modélisés sur des bases déterministes avec des équations physiques, en revanche d'autres sont caractérisés par des relations empiriques (à l'exemple de [9]).

Dans le modèle, on distingue alors deux phases :

- Une première phase terrestre qui simule le ruissellement, l'infiltration, l'évapotranspiration ;
- Une seconde phase de transport en rivière qui caractérise le déplacement de ces éléments depuis leur entrée dans le réseau jusqu'à l'exutoire du bassin.

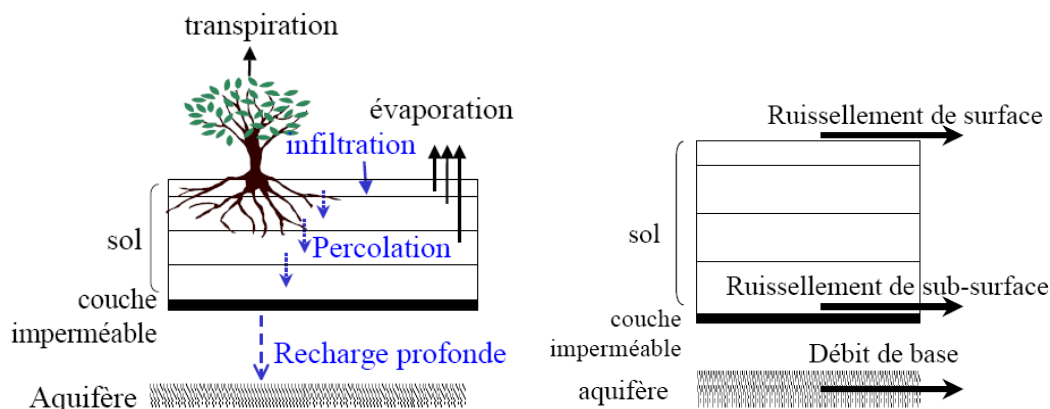


Figure 4 : Flux simulés par le modèle [10]

Cinq flux verticaux sont modélisés: l'infiltration de l'eau dans le sol, la percolation de l'eau au sein du profil de sol, la transpiration de la végétation, l'évaporation du sol et enfin la recharge profonde qui alimente les aquifères. Ajoutés à cela, trois flux latéraux contribuent au débit de rivière : les ruissellements de surface et de sub-surface ainsi que le flux issu de l'aquifère superficiel, communément appelé le débit de base (**figure 4**). La conceptualisation de ces flux fait intervenir divers paramètres physiques qui seront calibrés selon leur sensibilité au modèle [10].

Le ruissellement de surface est transféré dans le cours d'eau en tenant compte du temps de concentration du sous-bassin - Pour chaque sous-bassin, le temps de concentration est la somme du temps nécessaire au flux pour atteindre le cours d'eau en partant d'un point du bassin (temps calculé en fonction des caractéristiques du terrain) - et du temps nécessaire pour parcourir le cours d'eau (dépend des caractéristiques de la rivière) (**figure 5**, [10])

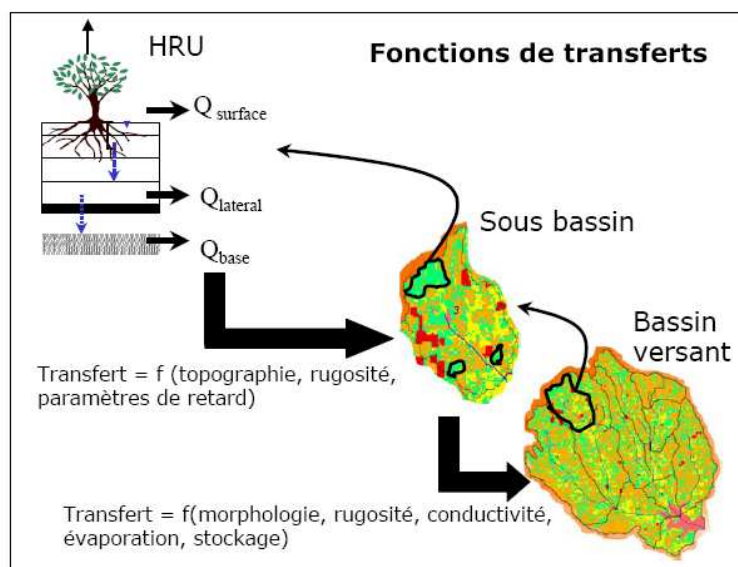


Figure 5 : Processus de transfert [10]

3.3.Acquisition des données

Topographie

Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) permet la reconstitution de la topographie du bassin versant. Le choix s'est arrêté sur les données SRTM (ou Shuttle Radar Topography Mission) de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) au format geotiff avec une résolution planimétrique de 90 m pour une résolution altimétrique de 16 m. Le système de coordonnées utilisé est la projection Transverse Universelle de Mercator UTM suivant le système géodésique WGS 84 (World Geodetic System).

Hydrographie

La carte du réseau hydrographique est celle fournie par la FTM (Foiben'ny Taontsarintanin'i Madagasikara) au format vecteur à l'échelle 1/500 000. Néanmoins, afin d'obtenir plus de précision, une digitalisation de la carte scannée ayant une échelle plus acceptable de 1/100 000 a été effectuée. La confrontation de ces deux cartes provenant de la FTM a permis d'obtenir le réseau hydrographique de référence qui sera utilisé dans toute la suite du travail.

Occupation de sols

De même, la carte d'occupation de l'espace est celle délivrée par la FTM ayant le même format que celui de l'hydrographie (format vecteur, échelle 1/500 000). Une correspondance entre les classes malgaches et les classes utilisées par SWAT a dû être faite pour que SWAT puisse donner une valeur aux paramètres hydrologiques tels que le CN (**tableau 1**).

Tableau 1 : Correspondance entre SWAT et FTM

Classification FTM			Classification SWAT	
OS_ID	NAT_BD	Land use	code	Land use
8	58	Savane arborée	FRST	forêt mixte
9	59	Savane herbeuse	PAST	Pâturages
10	60	Zone reboisée	FRSE	Zone reboisée
12	62	Mosaïque de culture	AGRR	Terre agricole - culture en rang
13	63	Rizière	RICE	Riz
19	65	Plan d'eau	WATR	Eau

Données pédologiques

Le bassin étant constitué essentiellement de sols ferralitiques [2], on les a optés pour l'homogénéité de la pédologie sur toute la surface du bassin versant. Les caractéristiques des sols ferralitiques n'étant pas reconnues par la base de données de SWAT, une table a été créée incluant les valeurs des paramètres physiques de ce type de sols. La plupart des paramètres ont été trouvés à partir de la base de données provenant des analyses faites par le laboratoire de pédologie de Beltsville, U.S.D.A. Maryland, USA [9].

Données climatiques et météorologiques

Les précipitations obtenues par les stations sont au pas de temps horaires. Elles ont été converties pour les ramener au pas de temps journalier.

3.4. Etapes de la mise en œuvre

Elle consiste à extraire à partir du MNT les limites du bassin versant de la rivière Sisaony ainsi que son réseau hydrographique. Grâce au couplage du logiciel ArcGIS avec le modèle SWAT, l'extraction des limites est presque automatique et utilise une méthode classique mettant en œuvre les traitements de l'algorithme (D8) de [11]. L'algorithme utilisé est dénommé D8 car il considère les directions d'écoulement suivant un flux unidirectionnel en huit connexités, en prenant en compte les huit cellules voisines du point considéré [12].

Ce traitement est réalisé en suivant les étapes suivantes : comblement des points bas et calcul des pentes (flow accumulation), détermination des directions d'écoulement (flow direction), calcul des surfaces drainées et extraction du réseau hydrographique. Toutefois, la qualité du réseau hydrographique issu du MNT doit être contrôlée. On entend ici par qualité, l'écart entre le réseau extrait du MNT et le réseau de référence utilisé pour décrire le bassin. Le réseau de référence est celui fourni par la FTM.

Pour la première délimitation, l'essai d'extraction du réseau hydrographique se base seulement sur le résultat issu du MNT brut sans modifications. Le réseau tracé semble correspondre au réseau réel pour les zones à hautes altitudes mais pour les zones plates notamment du côté d'Ampitatafika, le tracé issu du MNT est totalement différent du réseau réel (**figure 5**). C'est la résolution altimétrique de la source (16 m) qui est insuffisante et qui

entraîne une imprécision dans la méthode d'interpolation. De ce fait, pour les zones à très faible pente, l'extraction du réseau n'est pas fiable.

Pour pallier à ce problème, il a fallu « forcer » le modèle à suivre le réseau hydrographique réel en modifiant le MNT de manière à ce que le réseau issu de l'extraction puisse être similaire au réseau réel (**figure 6**).

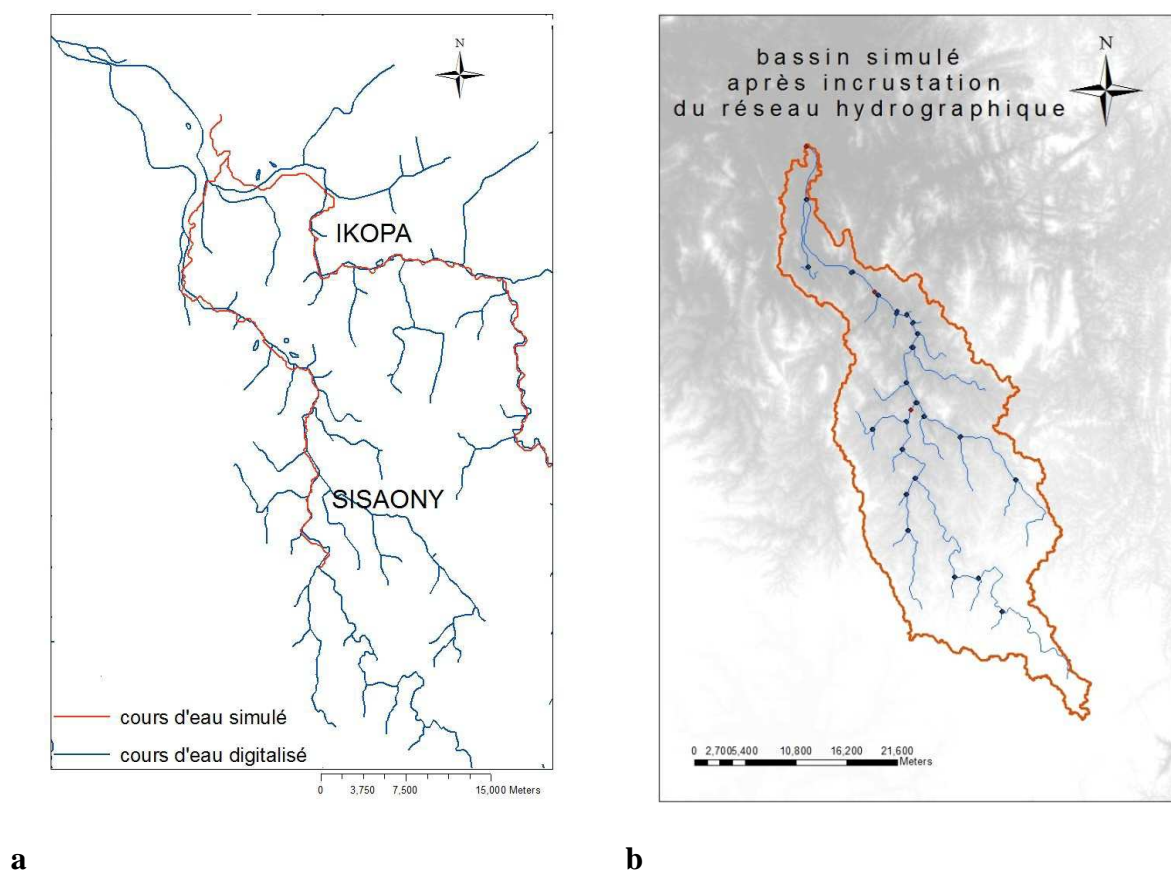


Figure 6. *a- Comparaison entre réseaux hydrographiques simulés et réseaux hydrographiques digitalisés ; b- Bassin simulé après incrustation du réseau hydrographique*

Cela s'est fait en appliquant la technique du « burning option » en superposant sur le MNT le réseau hydrographique de référence et en « grattant » les cellules d'altitude où une partie du réseau hydrographique est présente. L'altitude devenant moindre, l'écoulement va être forcé lors de l'extraction du réseau, et apparaître en meilleure adéquation avec la réalité du terrain.

Et pour déterminer les limites du bassin versant, on choisit un pixel exutoire. A partir de ce pixel et de la matrice de direction des écoulements, le SIG va déterminer quels sont les pixels situés en amont de l'exutoire qui vont se diriger vers le pixel de sortie. Le bassin et les sous-bassins obtenus correspondent aux bassins versants topographiques (**figure 6b** et **figure 7a**).

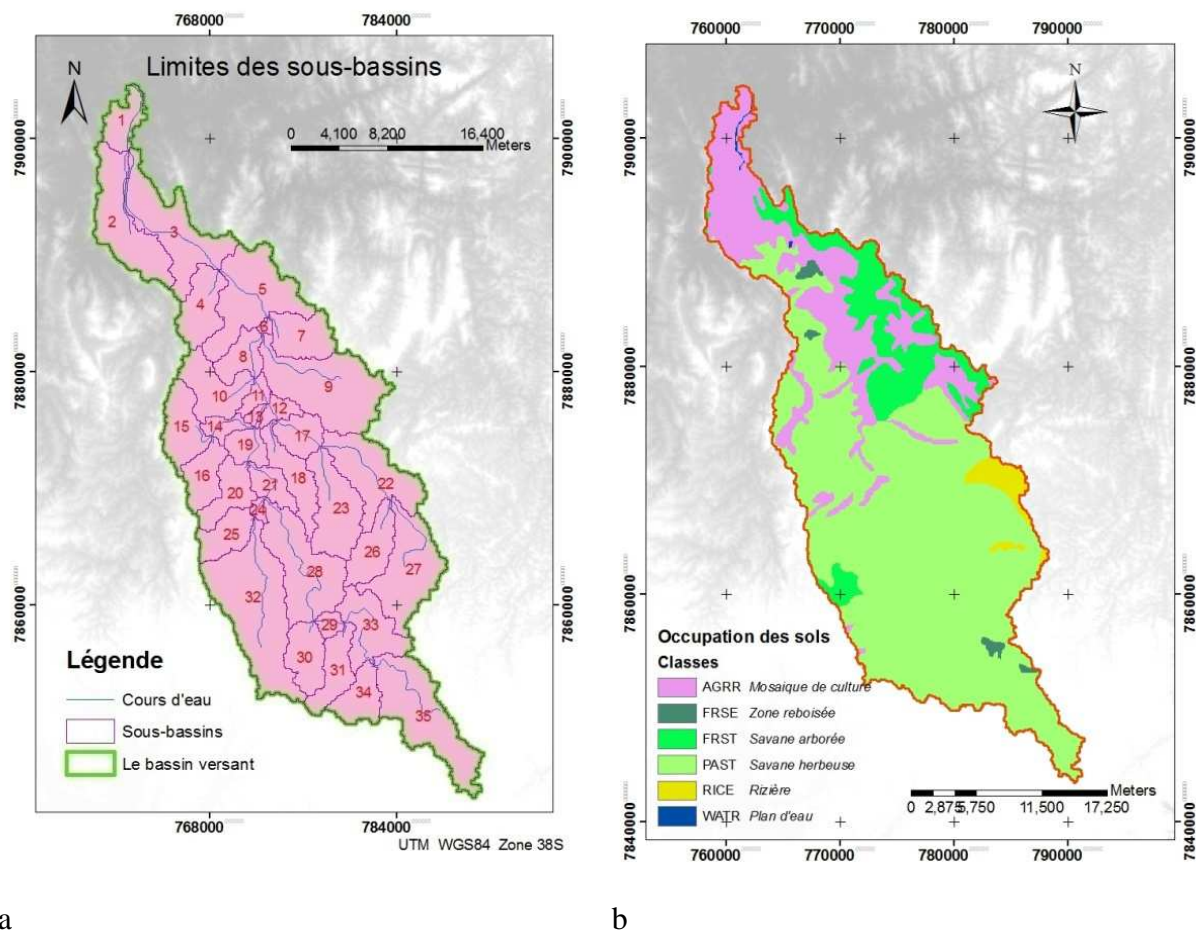


Figure 7. a- Distribution des sous-bassins versants dans le Sisaony; **b-** Figure 8 : Types de couches d'occupation de sols du bassin versant de la Sisaony

Les couches de pédologie et d'occupation de sols sont alors ajoutées au-dessus de la carte délimitée par ces sous-bassins versants (**figure 7b**). La simulation peut commencer une fois toutes ces couches en place et dès qu'on a choisi les formalismes à utiliser. Dans la présente étude, la méthode du SCS (Soil Conservation Service) a été adoptée pour le ruissellement, celle de l'équation de Penman-Monteith pour l'évapo-transpiration ([13]; [14]) et celle de Muskingum pour le cheminement de l'eau dans le réseau hydrographique bien développée dans la littérature hydrologique (e.g. [15], [16], [17], [18], [19]). On a considéré que le pas de temps de sortie est le pas de temps mensuel.

3.5. Paramétrisation du modèle- Analyse de sensibilité

L'étalonnage consiste à modifier certains paramètres pour obtenir la meilleure corrélation possible entre les débits simulés et les débits observés dans le cas d'un modèle hydrologique. C'est cette phase qui détermine la plausibilité de la modélisation.

Le modèle SWAT comprend plus d'une centaine de paramètres. Caler tous ces paramètres serait très difficile voire impossible. Une analyse de sensibilité permet d'identifier les paramètres qui influencent le plus la performance du modèle pour le site à l'étude et ainsi de réduire le nombre de paramètres à optimiser. L'analyse de sensibilité, mise en place par les concepteurs du modèle SWAT, s'effectue en faisant varier certains paramètres tout en gardant

fixes les autres paramètres [20]. Le but de ce processus est d'identifier les paramètres dont la variation entraîne des changements notables sur les sorties du modèle. Pour le bassin de la Sisaony, 21 paramètres ont une influence sur le débit. Les six principaux paramètres qui ont une influence notable sont donnés dans le **tableau 2** ci-dessous et ainsi classés selon leur ordre d'importance au niveau de leur sensibilité.

Tableau 2 : Classement des paramètres par ordre de sensibilité

	Paramètre	Description	Limites
1	Alpha_Bf	Constante de récession de l'écoulement de base	0-1
2	Cn2	Curve Number (du SCS)	0- 100
3	Sol_Awc	Quantité d'eau disponible	0-1
4	Esco	Facteur de compensation pour l'évaporation du sol	0-1
5	Ch_K2 (mm/h)	Conductivité hydraulique du fond du cours d'eau principal	0-1500
6	Surlag	Coefficient de retardement du ruissellement de surface (coefficient de rétention)	0-10

La constante de récession de l'écoulement de base (Baseflow alpha factor : alpha_bf)

C'est un paramètre de très grande importance. Physiquement, il intervient dans l'évaluation du débit de base. Concrètement, cet indice correspond à un facteur de rapidité de recharge du cours d'eau par l'aquifère profond. Il permet d'ajuster les temps de réponse du bassin, de limiter les décalages temporels et contrôler les récessions pendant les décrues. Selon la littérature, sa valeur varie de 0 à 0.3 pour les bassins à faible réponse et de 0.9 à 1 pour les autres [21].

Le Curve Number du SCS (Cn2)

C'est un des paramètres les plus connus du fait qu'il est utilisé par d'autres modèles ([22], [23]). Il intervient lors du calcul de la part de pluie destinée au ruissellement. Plus, le Curve Number (Cn2) est élevé, plus le ruissellement est important. Compte tenu du fait que lors des premières simulations, l'hydrogramme des débits simulés a toujours été au-dessus des débits observés, ce paramètre a dû être légèrement abaissé.

La capacité en eau du sol (Available Water Capacity of the Soil : Sol_awc)

La diminution de ce paramètre entraîne logiquement une augmentation du ruissellement de surface. Les valeurs initiales proviennent de la carte de sols délivrée par la FAO qui ont dû être légèrement modifiés lors du calage.

Le facteur de compensation pour l'évaporation du sol (Esco)

Ce paramètre intervient dans le calcul de l'évaporation du sol. Il modifie donc la quantité d'eau qui peut être évaporée [24]). L'influence de ce paramètre sur l'évaporation dépend de la profondeur du sol. Il varie de 0,7 (pour un sol très sensible à l'évaporation) à 1.

Le coefficient de retardement du ruissellement de surface (surlag)

Ce paramètre intervient dans le transfert du ruissellement de surface. Il influence le ruissellement en fonction du temps de concentration du sous-bassin considéré. Par exemple, dans un grand sous-bassin ayant un temps de concentration supérieur à 24 heures, seulement une partie du ruissellement peut atteindre le cours d'eau principal le même jour où il a été généré. Une fonction retard incorporée dans le modèle limite la portion de ruissellement évacué vers le cours d'eau principal. Dans ce concept, on peut assimiler ceci comme un réservoir qui retient une partie du ruissellement avant de l'envoyer dans le cours d'eau. Surlag contrôle la fraction de ruissellement qui sera autorisé à rejoindre le cours d'eau en un jour. La fraction de ruissellement qui rejoint le cours d'eau dépend donc du temps de concentration, mais aussi du coefficient de retardement surlag (**figure 8**).

Pratiquement, au cours du calage ce coefficient a permis de régler le degré de « nervosité » du débit simulé : si celui-ci présente uniquement des pics très fins et très élevés lors d'épisodes pluvieux, il faudra diminuer le coefficient surlag, puisque celui-ci permet de limiter la proportion de l'écoulement de surface qui arrive dans les cours d'eau, en un temps donné. Ce coefficient est fondamental et permet de « lisser » les courbes des débits simulés, ou au contraire d'accentuer leur variabilité dans la figure ci-dessous.

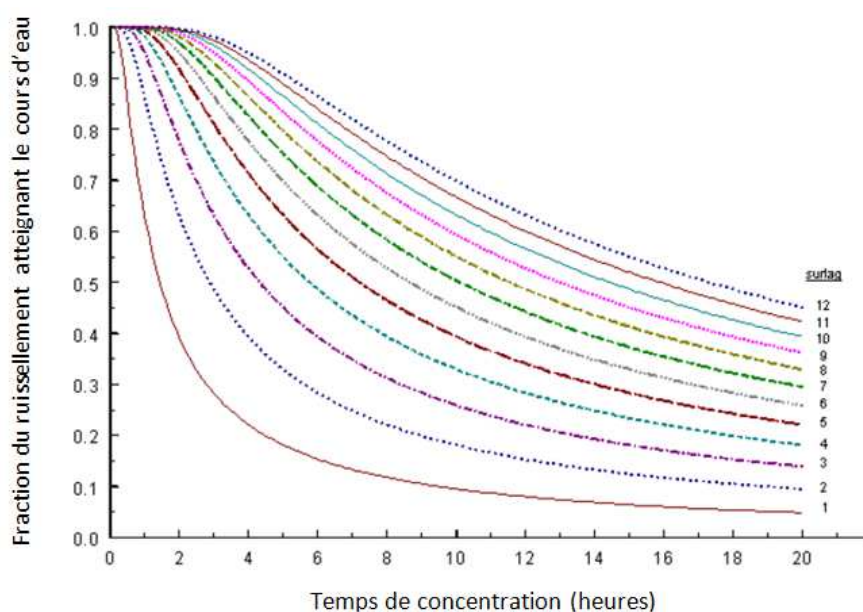


Figure 8 : *Influence du temps de concentration et du coefficient surlag sur la fraction de ruissellement délivrée vers le cours d'eau*

La conductivité hydraulique du fond du cours d'eau principal (Ch_K2)

Etant donné que ce paramètre fait partie lui aussi de ceux qui influencent le plus sur le débit, son intervention dans les travaux d'ajustement a aussi été nécessaire. Sa valeur n'a pas été fixée mais a été étalonnée.

4. Résultats

En raison des données initialement disponibles, le calage des débits observés et simulés s'est fait pour la période allant de 2003 à 2004 (**figure 9**).

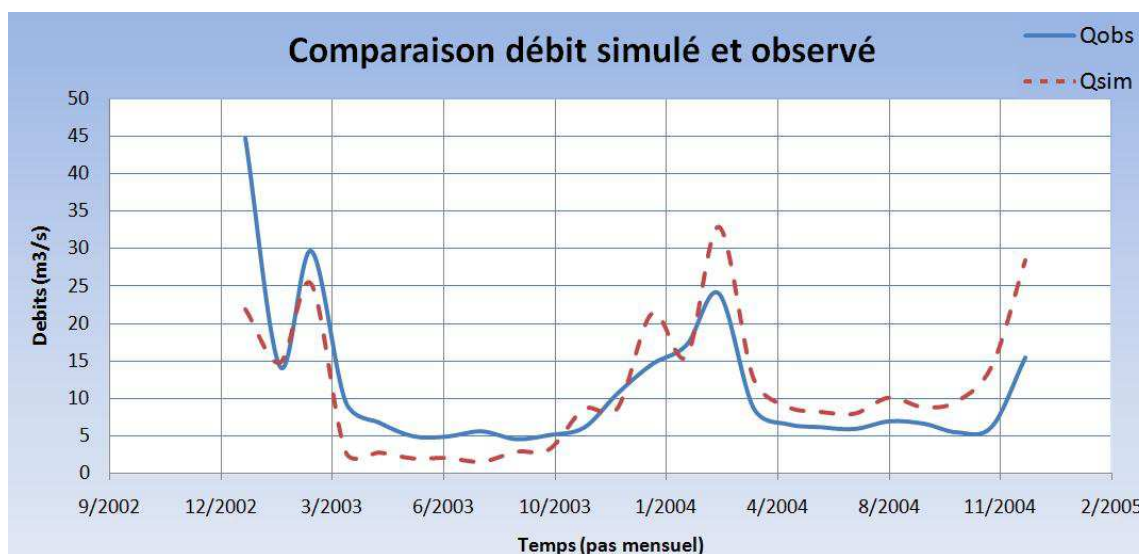


Figure 9 : Hydrogramme simulé après ajustement

Pour juger de l'efficacité des simulations produites, plusieurs critères ont été exploités : le coefficient de détermination R^2 [25] variant de -1 à 1 est très utilisé en hydrologie pour évaluer la qualité d'une modélisation et le critère de Nash [26], variable de $-\infty$ pour un ajustement très mauvais à 1. Une valeur proche de 1 traduit une forte liaison entre les observations et les simulations.

$$R^2 = \left(\frac{\sum[(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})(Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})]}{\sqrt{\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2 \sum(Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})^2}} \right)^2$$

$$E_{Nash} = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2}$$

Avec $\overline{Q_{obs}}$ = valeur moyenne de la variable observée

Q_{obs} = valeur de la variable observée

$\overline{Q_{sim}}$ = valeur moyenne de la variable simulée

Q_{sim} = valeur de la variable simulée

Le calage des paramètres d'un modèle peut être réalisé de manière manuelle ou automatique, nous avons fait une combinaison des deux. Des ajustements manuels des six premiers paramètres suivis de plusieurs calages automatiques sur les autres ont été effectués avant de trouver le meilleur résultat. Comme la **figure 9** montre l'allure de l'hydrogramme simulé par rapport à celui observé pour la période de calage, d'où les valeurs des principaux paramètres sont présentées dans le **tableau 3**.

Tableau 3 : Valeurs des paramètres utilisés dans le bassin de la Sisaony

Paramètres	Alpha_Bf	Cn2	Sol_Awc	Esco	Ch_K2	Surlag
Valeurs	0.15	-0.25%	-0.18%	0.1	4	1.5

Les pourcentages expriment une augmentation ou une diminution de la valeur du paramètre suivant ce pourcentage. La performance du calage est exprimée à travers les valeurs des critères (**tableau 4**).

Tableau 4 : Critères de performances

Critères	Nash	R ²
Valeurs	0.493	0.531

5. Discussion

Le premier paramètre qui domine le débit est celui qui intervient dans l'écoulement de base (alpha_bf). Celui qui calcule le ruissellement (Cn2, Curve number) ne vient qu'en deuxième position. Ce qui traduit une influence notable de la participation de la nappe aquifère sur la rivière, mais sans pour autant négliger l'apport conséquent apporté par l'écoulement de surface.

Le critère d'évaluation du modèle (critère de Nash) reflète un rapport de volume écoulé ([26], [27], [28]). On remarque une compensation de la différence entre volume écoulé simulé et volume écoulé observé. Celle-ci s'observe avant et après le pic de l'hydrogramme (en Mars 2004). Cette compensation aurait pu influencer le critère sans remettre en question la capacité du modèle à reproduire le comportement de l'hydrogramme.

La calibration et l'adaptation d'un modèle aussi exhaustif en terme de conceptualisation des processus d'écoulements s'avère être très ambitieux. L'ajustement des premiers paramètres a abouti à un résultat moyen, mais au-delà de ce qu'on attendait bien que l'intégration des données soit assez longue, et que la mise en œuvre soit assez fastidieuse. Le principal inconvénient de ce travail de modélisation avec SWAT est la nécessité d'un grand nombre de paramètres pour pouvoir fonctionner, dont la plupart ne sont pas disponibles dans la zone considérée. Ceci entraîne l'obligation d'un calage automatique donnant des valeurs non réalistes qui peut conduire à un problème d'équifinalité. En fait, cette équifinalité consiste à avoir les mêmes débits simulés avec des jeux de paramètres complètement différents, auquel cas on ne sait lequel représente au mieux la réalité [29].

6. Conclusion

L'objectif du présent travail était de trouver et d'exploiter un outil capable d'étudier le système bassin versant dans toute sa complexité. Le Soil and Water Assessment Tool (SWAT) s'avère être un outil qui peut répondre à cette demande. Il propose une modélisation hydrologique physique et distribué du bassin versant dont les performances ont été évaluées. Les premières étapes du projet qui consistaient à mettre en place les premières couches de données nécessaires au fonctionnement de SWAT ont été réalisées avec succès. Les données recueillies auprès des différents intervenants ont été intégrées au modèle, permettant ainsi son bon fonctionnement. Le bassin versant a ainsi été découpé en plus de 33 sous-bassins dont chacun possède une combinaison sol/occupation propre. Une calibration et un ajustement préliminaire ont été réalisés. Beaucoup d'améliorations doivent encore être apporté au modèle pour que celui-ci soit complètement fiable. Les perspectives s'avèrent très intéressantes notamment en ce qui concerne l'exploitation de la variabilité climatique ou l'étude des impacts des activités de l'homme sur le bassin (par exemple le changement d'occupation de sols et de pratiques culturelles).

Remerciements

Je tiens particulièrement à remercier Aziz Ballouche et Cyril Fleurant de l'Université d'Angers ainsi que Théodore Razakamanana de l'Université de Toliara de m'avoir encouragé pour relater dans cet article une partie de mon travail sur le bassin versant de la Sisaony. Théodore Razakamanana présente aussi toute sa grande reconnaissance à l'Université d'Angers de l'avoir invité afin de produire des travaux scientifiques relatifs aux modélisations des bassins versants de Madagascar.

Références

- [1] **Razafimanjato L. L.**, 1992. Modélisation hydrologique du bassin versant de l'Ikopa à Antananarivo. Université des sciences de Montpellier, Laboratoire d'hydrologie et modélisation. DEA National d'hydrologie, 81p.
- [2] **Riquier J., Moureaux C.**, 1957. Les sols Malgaches: pédologie et types principaux. Office de la recherche scientifique et technique outre-mer. 12 p.
- [3] **Arnold J.G., Allen P.M., Bernhardt G.**, 1993. A comprehensive surface-groundwater flow model. *Journal of Hydrology* 142, 47–69.
- [4] **Arnold J., Williams A., Maidment D.R.**, 1995. Continuous-time water and sediment routing model for large basins. *Journal of Hydraulic engineering*, 121(2), pp. 171-183.
- [5] **Arnold J.G., Williams J.R., Nicks A.D., Sammons N.B.**, 1990. SWRRB-A basin scale simulation model for soil and water resources management. Texas A & M University Press, 142 p.
- [6] **Krysanova V., Müller-Wohlfeil D.I., Becker A.** 1998. "Development and test of a spatially distributed hydrological/water quality model for mesoscale watersheds." *Ecological modelling*, 16, pp. 261-289.

- [7] **Vandenbergh V., van Griensven A., Bauwens W.** 2002. "Detection of the most optimal measuring points for water quality variables : application to the river water quality model of the river Dender in ESWAT. *Water Science and Technol.*, 46(3), pp. 1-7.
- [8] **Unité de politique de développement rural (UPDR)**, 2003. Monographie de la région d'Antananarivo. MINISTERE DE L'AGRICULTURE, DE L'ELEVAGE ET DE LA PECHE (MAEP), 139 pp.
- [9] **Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., Srinivasan R., Williams J.R.**, 2005. Soil and Water Assessment tool Input/Output File Documentation, version 2005, Agricultural Research Service / Blackland research center. Temple, TEXAS, USA. 620 pp.
- [10] **Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., Srinivasan R., Williams J.R.**, 2005. Soil and Water Assessment tool theoretical Documentation, version 2005, Agricultural Research Service / Blackland research center. Temple, TEXAS, USA. 620 pp.
- [11] **Jenson S.K., Domingue J.O.**, 1998. Extracting topographic structures from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 54 (11), pp. 1593–1600.
- [12] **Charleux-Demargne J.**, 2001. Qualité des Modèles Numériques de Terrain pour l'hydrologie. Application à la caractérisation du régime de crue des bassins versants. Thèse ENSG. Université de Marne la Vallée. 275 pp.
- [13] **Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M.**, 1998. Crop evapotranspiration – guidelines for computing crop water requirements – FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, 1998. ISBN 92-5-104219-5.
- [14] **Allen R.**, 2005. Penman–Monteith Equation. In: *water*. Elsevier, pp. 180-188 http://www.kimberly.uidaho.edu/water/papers/evapotranspiration/Reference%20ET/Penman_Monteith_Encyclopedia_Soils_00399.pdf
- [15] **McCarthy G.T.**, 1938. The unit hydrograph and flood routing, Conference of North Atlantic Division, US Army Corps of Engineers, New London, CT. US Engineering
- [16] **Chow V. T.**, 1964. Handbook of Applied Hydrology, McGraw-Hill, New York
- [17] **Birkhead A.L., James, C.S.**, 2002. Muskingum River routing with dynamic bank storage, *Journal of Hydrology* 264, pp. 113–132.
- [18] **Al-Humoud J. M., Esen I.**, 2006. Approximate method for the estimation of Muskingum flood routing parameters, *Water Resources Management* 2006 20: pp. 979-990, Springer 2006.
- [19] **Baláz M., Danáčová M., Szolgay J.**, 2010. On the use of the Muskingum method for the simulation of flood wave movements. *Slovak Journal of civil engineering*, 2010/3 pp 14–20.

- [20] **Van Griensven A.**, 2005. Sensitivity, auto-calibration, uncertainty and model évalution in SWAT2005. User's Manual (Draft version). BIOMATH, Department of Applied Mathematics, Biometrics and Process Control, Gent University, Belgium
- [21] **Han E., Merwade V., Heathman G.C.**, 2012. Implementation of surface soil moisture data assimilation with watershed scale distributed hydrological model. *Journal of Hydrology*, 416–417, pp. 98-117.
- [22] **USDA-SCS**, 1972. SCS National Engineering Handbook, Section 4, Chapter 10-Hydrology. Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall. Hydrology. US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington, DC. pp. 10.1–10.24.
- [23] **HEC-HMS**, 2009. Hydrologic modeling system user's manual-version. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis, California.
- [24] **Kannan N., White S.M., Worrall F., Whelan M.J.**, 2007. Sensitivity analysis and identification of the best evapotranspiration and runoff options for hydrological modelling in SWAT-2000. *Journal of Hydrology*, 332, pp. 456-466.
- [25] **Guinot V., Cappelaere B., Delenne C., Ruelland D.**, 2011. Towards improved criteria for hydrological model calibration: theoretical analysis of distance- and weak form-based functions. *Journal of hydrology*, 401, pp. 1–13.
- [26] **Nash J.E., Sutcliffe J.V.**, 1970. River flow forecasting through conceptual models. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, pp. 282–290.
- [27] **McCuen R.H., Knight Z., Cutter A.G.**, 2006. Evaluation of the Nash–Sutcliffe Efficiency Index. *Journal of Hydrologic Engineering*, 11, pp. 597–602.
- [28] **Gupta H.V., Kling H., Yilmaz K., Martinez F.**, 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modeling. *Journal of Hydrology*, 377, pp. 80-91.
- [29] **Beven K., Freer J.**, 2001. Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology. *Journal of Hydrology*, 249, pp. 11-29.