

Analyse du fonctionnement hydro-sédimentaire du bassin versant Tleta du Rif Occidental du Maroc à l'aide du modèle SWAT

F. CHOUKRI¹, M. CHIKHAOUI¹, M. NAIMI¹, Y. PEPIN^{1,2}, D. RACLOT^{1,2}

(Reçu le 13/12/2018; Accepté le 06/03/2018)

Résumé

Le modèle SWAT (Soil and Water Assessment Tool) est un outil de simulation des flux dans le paysage, très utile pour orienter la gestion et les aménagements des bassins versants. Dans cette optique, ce modèle a été testé pour reproduire, à un pas de temps journalier, les flux d'eau et de sédiments arrivant à la retenue du barrage Ibn Batouta pour la période 1980-2010. Diverses données climatiques (précipitation et température), morphologiques (MNT) et thématiques (occupation du sol et pédologie) ont été utilisées pour l'alimentation du modèle. Les mesures acquises au niveau de la retenue Ibn Batouta sur les périodes 1980-1982, 1983-1996 et 1997-2010 ont été utilisées respectivement pour les étapes d'initialisation, de calibration et de validation après avoir exécuté une analyse de sensibilité pour déterminer les paramètres les plus sensibles. Les indices de performance R^2 , NSE et PBIAS ont été adoptés pour évaluer et contrôler la qualité des prédictions des débits mensuels liquides et solides. En effet la performance de prédiction est très élevée pour les débits liquides mensuels avec R^2 (0,95; 0,90), NSE (0,94; 0,89) et PBIAS (-6; 2) respectivement pour la période de calibration et la période de validation. La performance des prédictions des transports solides mensuels est également très satisfaisante avec R^2 (0,83; 0,64), NSE (0,82; 0,61) et PBIAS (17; -6). Au final, le modèle SWAT permet de reproduire correctement les flux mensuels d'eau et de sédiments à l'exutoire du bassin versant Tleta et son utilisation pour tester des scénarios de gestion et d'aménagements, peut donc être envisagée.

Mots clefs: SWAT, Modélisation hydrologique, Érosion hydrique, Rif Occidental, Maroc.

Analysis of the hydro-sedimentary functioning of Tleta watershed of the Western Rif of Morocco using the SWAT model

Abstract

SWAT Model (Soil and Water Assessment Tool) is a tool for simulating flows in the landscape, useful for guiding management and ground works within catchment areas. Accordingly, this model was tested to reproduce, on a daily times pan, water and sediment flows arriving to Ibn Batouta reservoir over the period 1980-2010. Various climatic (precipitation and temperature), morphologic (MNT) and thematic data (land use and pedology) were used for feeding the model. The measurements acquired at Ibn Batouta reservoir during the periods 1980-1982, 1983-1996 and 1997-2010 were used respectively for initialization, calibration and validation after running the sensitivity analysis to determine the most significant parameters. The performances indices of R^2 , NSE and PBIAS were adopted to assess and control the quality of predictions of the monthly flows of water and sediments. The performance of prediction of monthly water flows is very high with R^2 (0.95; 0.90), NSE (0.94; 0.89) and PBIAS (-6; 2) respectively for both periods of calibration and validation. Meanwhile the performance of predictions of the monthly solid transport is very satisfactory with R^2 (0.83; 0.64), NSE (0.82; 0.61) and PBIAS (17; -6) respectively. Finally, SWAT model allows to properly reproducing monthly water and sediment flows within the Tleta catchment area and testing scenarios of management and ground works to be considered.

Key words: SWAT, hydrological modeling, water erosion, Western Rif, Morocco.

INTRODUCTION

Au Maroc, la région du Rif constitue une zone assurant une partie importante des ressources en eau du pays. Malheureusement, l'érosion hydrique y est très importante du fait d'une combinaison de facteurs défavorables : une topographie accidentée, un réseau hydrographique très ramifié et très encaissé, une lithologie marneuse imperméable et donc très érodable, un régime de pluie comprenant des averses avec de fortes intensités ou de longue durée et une activité anthropique très marquée, par exemple en mettant à nu de très grandes étendues de sols à l'automne lors des labours. Cette forme de dégradation des sols réduit fortement la performance agricole en amont du fait de la perte de la partie la plus fertile du sol, mais

aussi la durabilité des infrastructures en aval (barrages, canaux, etc.). Partout dans le monde, l'érosion hydrique présente une forme de dégradation dangereuse à l'égard de la protection des ressources en eau et en sol. Selon Yang *et al.* (2009), l'érosion du sol peut conduire à une réduction de la fertilité des sols, la perte de nutriments et à la baisse des rendements des cultures dans les terres agricoles. De même, Bakker *et al.* (2005 et 2004) ont trouvé qu'en moyenne l'érosion des sols réduit la productivité des cultures d'environ 4 % pour chaque 10 cm de sol perdu. L'érosion excessive peut épuiser les réserves du sol, en azote et en phosphore, nécessaires pour la croissance des plantes, et l'érosion extrême peut dégrader le sol au point qu'il sera incapable de soutenir la vie végétale (Neitsch *et al.*, 2005).

¹ Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc

² IRD-UMR LISAH, Montpellier, France

Au Maroc, les pertes annuelles du sol à cause de l'érosion, mesurées à l'exutoire de bassins versants de plusieurs centaines de km² atteignent fréquemment 500 t km⁻² dans le Moyen Atlas et parfois plus de 5 000 t km⁻² dans le Rif. La première conséquence est une chute progressive de la productivité des sols et une amplification de la dégradation des sols (15 millions d'hectares de terres érodées sont concernés). Une seconde conséquence porte sur les ressources en eau puisque l'envasement des retenues de barrage est annuellement de l'ordre de 75 millions de m³, soit une réduction annuelle de 0,5 % de la capacité de stockage de l'eau par les barrages. Cela se traduit par des pénuries d'eau ou une détérioration de la qualité de l'eau qui entraînent une augmentation des frais de fonctionnement et de gestion des barrages, des usines hydro-électriques et des unités de traitement des eaux (<http://www.eauxetforets.gov.ma/fr/text.aspx?id=1025&uid=44>).

L'étude réalisée dans le Rif Occidental (Choukri *et al.*, 2016) sur la prédiction de l'évolution de l'érosivité des pluies selon des prévisions climatiques fournies par quatre MCGs et deux scénarios d'évolution du climat (A1B et A2) montre une faible évolution de ce facteur à l'échelle annuelle, mais une forte évolution selon les saisons avec une diminution du facteur R en hiver et au printemps et une augmentation marquée pendant l'été et l'automne. Les pluies exceptionnelles de la fin de l'été et du début de l'automne peuvent être classées comme dangereuses pour les sols. Durant cette période, les sols de cultures annuelles sont nus et les précipitations, généralement sous forme d'orages violents, provoquent un ruissellement intense responsable d'une érosion des sols importante en nappe et en ravins (Sadiki, 2005). Il est donc important de réfléchir à la définition d'une stratégie de planification et de conservation des ressources en eau et en sol pour la région, qui permettent d'éviter une augmentation des flux érosifs et par conséquent une accélération de l'envasement des barrages à l'aval.

Actuellement, de nombreux modèles hydrologiques sont disponibles pour l'évaluation de l'impact de l'utilisation des terres et celui des changements climatiques sur la quantité et la qualité des eaux mobilisées dans les bassins versants. Parmi ces modèles, le modèle agro-hydrologique SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (Arnold and Fohrer, 2005) est un modèle prédictif capable de simuler, sur de longues périodes de temps, les effets de différents scénarios de gestion du territoire sur les transferts hydriques et sur la mobilité des sédiments et des nutriments à l'échelle des grands bassins versants (Beaudin *et al.*, 2006). Il est issu d'une série de modèles développés antérieurement (Arnold *et al.*, 2012), notamment les modèles SWRRB (Williams *et al.*, 1985), EPIC (Williams *et al.*, 2008), CREAMS (Knisel, 1980) et GLEAMS (Leonard *et al.*, 1987). SWAT a été appliqué sur des bassins agricoles partout dans le monde pour analyser des problèmes de pollution, d'érosion ou d'aménagements (Chaponnière, 2005). S'il a été testé et validé dans des contextes et à des échelles spatio-temporelles très variées (Lévesque, 2007; Ouessar *et al.*, 2008; Laurent *et al.*, 2007; Hunink *et al.*, 2013; Bonumá *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2010; Mosbahi *et al.*, 2011; Ficklin, 2010; Salou, 2009; Gatzke, 2010; Yang *et al.*, 2008; Ficklin *et al.*, 2009), sa

pertinence pour le contexte nord-marocain du Rif doit être confirmée.

Ce papier présente la mise en œuvre, le calage et la validation du modèle SWAT dans le bassin versant Tleta (180 km²) grâce à des données de suivi des flux d'eau et de sédiments acquises au niveau du barrage Ibn Batouta durant la période 1980-2010. Ce travail de test de la pertinence de l'outil de simulation SWAT doit être perçu comme une première étape vers la possibilité de tester des scénarios d'aménagement et de conservation des eaux et des sols en vue de lutter contre les changements globaux à venir.

MÉTHODOLOGIE

Description du site

Situé au cœur du Tangérois, à mi-chemin entre deux grandes villes marocaines de Tanger et de Tétouan (Nord du Maroc), le bassin versant Tleta couvre une superficie de 180 Km² (Figure 1) à l'amont du barrage Ibn Batouta construit en 1977 avec une capacité initiale de stockage de 43,5 Mm³. Les altitudes du bassin varient entre 23 et 672 m au point culminant avec des pentes oscillant entre 0 et 30 %. C'est une zone caractérisée par un climat atlantique sous influence méditerranéenne, chaud et sec en été, froid et pluvieux en hiver, avec une période sèche entre mai et septembre et une période humide qui s'étale d'octobre à mars. Le bassin versant est exposé à une double influence marine (Mer Méditerranée et Océan Atlantique). C'est l'une des régions les plus arrosées du pays, connaissant ainsi une activité hydrologique très importante. Les précipitations moyennes annuelles sont de 778 mm sur la période 1979-2013 et la température moyenne est de 18°C sur la période 1976-2016, alors que l'évaporation au bac Colorado est estimée à 1 690 mm sur la période 1983-2013. Le bassin se caractérise par une dominance du substrat marneux, ce qui rend le sous-sol très imperméable. La lame d'eau écoulee annuellement est de 345 mm pour la période 1979-2013, soit un coefficient de ruissellement moyen interannuel de 0,43. Le bassin réagit rapidement aux précipitations, le module de débit interannuel est de 1,56 m³s⁻¹. Les caractères litho-stratigraphiques généraux de la chaîne rifaine sont bien représentés dans le bassin, à savoir le chevauchement de plusieurs nappes de charriage (Flysh) constituant la ligne de crêtes au-dessus de l'unité autochtone de Tanger (marneuse) formant les collines (Michard, 1976). Cette variété lithologique a permis le développement d'une mosaïque pédologique assez importante: sols peu évolués, sols hydromorphes, lithosols, vertisols et sols brunifiés. Le couvert végétal est conditionné lui aussi par cette disposition morpho-pédologique, en effet, les faciès gréseux et flyshiques constituent le substrat d'une végétation de matorral parfois très dégradée, alors que le faciès marneux est essentiellement cultivé et que la forêt se limite à des surfaces restreintes à l'amont du bassin (Merzouk *et al.*, 1996). Le couvert végétal a connu une dégradation au cours de la période 1977-2009 avec une baisse de la surface du bassin classée en végétation dense et moins dense de 46 à 34 %, au profit d'une progression des terrains de cultures (51,3 à 60 %) et des sols nus (2,7 à 6 %).

Données disponibles et préparation des entrées du modèle

Données de contexte

Plusieurs classes d'occupation du sol ont été reconnues au niveau du bassin versant étudié (Figure 1a) grâce à la classification supervisée d'une série des images: LandSat MSS (90 m) de 1977 et LandSat ETM (30 m) de 1984, 1988, 2000, 2003, 2007 et 2009 téléchargées du site (<http://earthexplorer.usgs.gov/>), contrôlée par des vérités terrain. L'occupation du sol de 2009 a été utilisée comme référence pour le paramétrage du modèle. Le bassin versant Telta est caractérisé par la prédominance des terrains de culture, mais possède aussi de larges zones de matorral dense et clair et de sols nus. Les caractéristiques physico-chimiques et hydrologiques des sols présentent, autre entrée importante du modèle SWAT, ont été définies à l'échelle de l'unité pédologique. Pour cela, la carte pédologique (1/50 000) (Figure 1b) couvrant l'ensemble

du bassin versant Tleta et représentant de nombreux types de sols, associés au rapport pédologique de la région Tanger-Tétouan (Inypsa, 1987), couvrant l'ensemble du bassin versant Tleta et caractérisant l'ensemble des types de sols ont été mobilisés. Ce rapport pédologique nous a permis de construire la base de données sol qui a été complétée par des échantillons prélevés sur le terrain. Enfin, un modèle numérique du terrain (MNT) à 20 m de résolution issu d'images SPOT a été utilisé pour rendre compte de la morphologie de la zone d'étude.

Données climatiques

Le dispositif de mesures du climat a varié au cours du temps. Il est composé de trois pluviomètres journaliers répartis à l'amont du bassin versant et d'une station climatique au niveau de la digue du barrage, relevée à 7 heures du matin et composée d'un pluviomètre journalier, d'un pluviographe à auget basculeur de 0,1 mm, d'un bac d'évaporation type Colorado, de deux thermomètres (max. – min.),

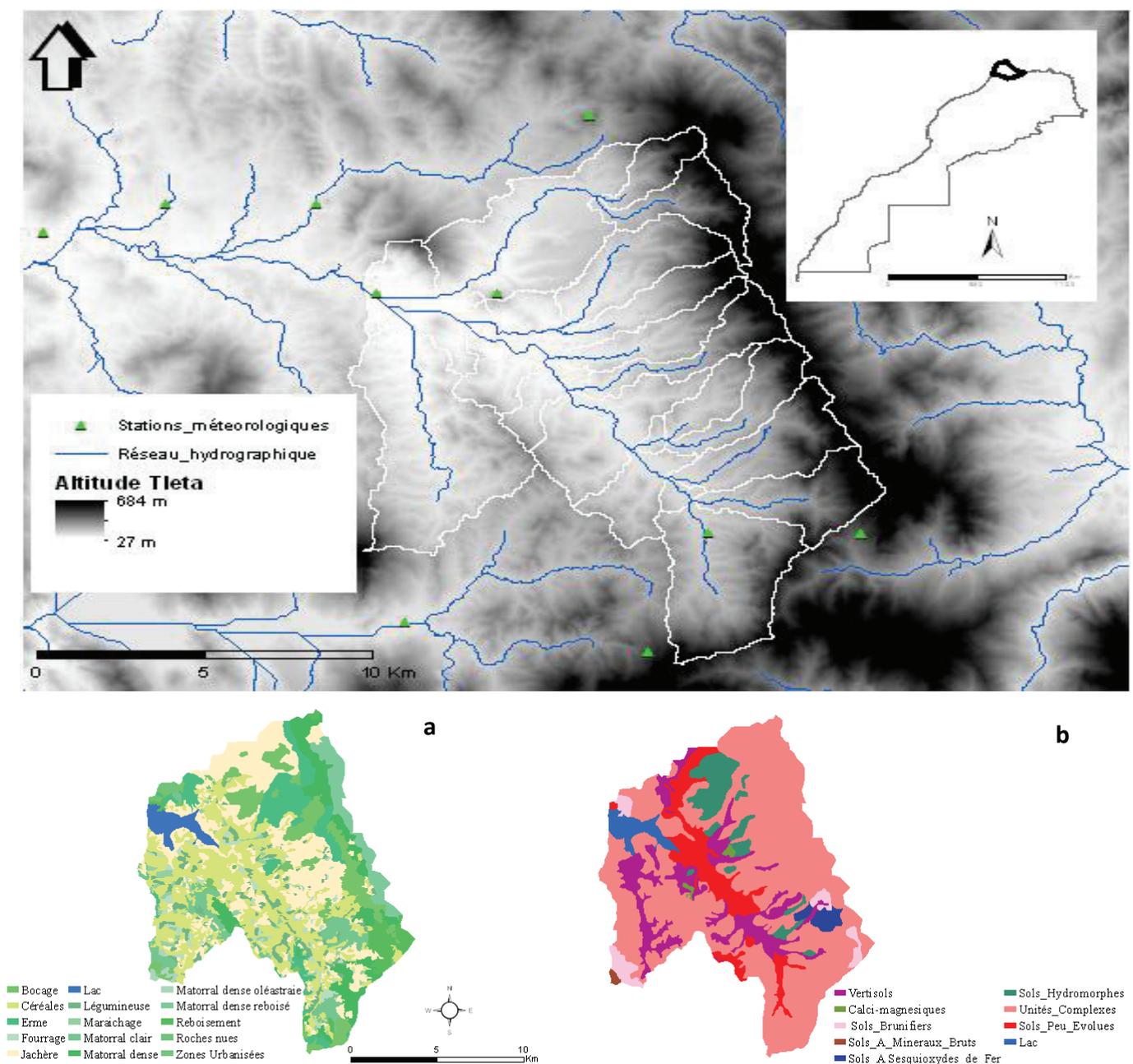


Figure 1. Localisation du bassin versant Tleta avec les sous-bassins et le modèle numérique de la zone. (a) Carte d'occupation du sol du bassin (2009). (b) Carte pédologique du bassin (CPCS, 1967)

d'un anémomètre et d'une girouette. Les températures maximales et minimales sont lues sur les thermomètres (à 0,1°C), chaque température journalière est la moyenne entre le maximum et le minimum du jour. Les données climatiques exigées par SWAT sont la pluviométrie et la température journalière (min. et max.). D'autres données météorologiques optionnelles dépendent de la méthode de l'estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP). SWAT propose trois méthodes (Chaponnière, 2005) pour estimer l'ETP (Hargreaves, 1975 ; Priestley-Taylor, 1972 et Penman-Monteith, 1948). Les données climatiques (Pluie, T_{min.}, T_{max.}) ont été prises sur les stations météorologiques gérées par l'Agence du Bassin Hydraulique du Loukkos (ABHL) ou par la Direction de la Météorologie Nationale (DMN) (Tableau 1).

Tableau 1. Données météorologiques utilisées

Nom	Latitude N	Longitude W	Mesures
Béni Harchane	35,531	-5,720	Pjour
Ibn Battouta	35,645	-5,733	Pjour
Kalaya	35,673	-5,747	Pjour
Romane	35,704	-5,656	Pjour
Aéroport-Tanger	35,726	-5,906	Tjour

Données de débits liquides

Un suivi du niveau d'eau dans la retenue du barrage accompagné du suivi des vidanges et des déversements est réalisé au pas de temps horaire. La reconstitution des débits entrants dans la retenue est faite au pas de temps horaire en utilisant le logiciel Hydraccess. Le calcul du débit entrant repose sur la conservation de l'eau à travers une équation de bilan (Albergel *et al.*, 1999) qui fait intervenir les apports directs de la pluie sur la surface en eau de la retenue, l'évaporation de la surface en eau, Le débit de déversement (m^3s^{-1}), le débit de vidange pour alimenter l'ONEP (m^3s^{-1}), le débit de vidange de fond (m^3s^{-1}) et la variation du volume stocké (m^3s^{-1}), ce dernier pouvant être positif ou négatif. Nous calculons ensuite, au pas de temps horaire, le débit entrant $Q_e = dV/dt + Q_{dev} + Q_{vi}$ où dV/dt est la variation du volume stocké, Q_{dev} est le déversement et Q_{vi} le débit de vidange. Les débits journaliers puis mensuels sont ensuite dérivés des valeurs horaires. Une crue

démontre quand Q_e devient positif et finit quand il devient nul, sauf si une autre crue vient la chevaucher, dans ce cas nous arrêtons la première quand l'autre démarre. De chacune des crues isolées, nous extrayons le volume total de la crue (V) et son débit maximal (Q_{max}).

Données de débits solides

Des campagnes bathymétriques sont réalisées environ tous les 5 ans, elles permettent d'établir les courbes Hauteur/Surface/Volume (H, V, S) utiles pour le calcul du bilan en eau du barrage, mais aussi pour le calcul des taux d'envasement de la retenue. Huit mesures de bathymétrie sont disponibles pour le barrage Ibn Batouta (Tableau 1).

Les flux des sédiments utilisés pour caler le modèle SWAT sont issus des mesures bathymétriques et de l'analyse de la réponse hydrologique détaillée de chaque crue. Ils correspondent à la somme des débits solides piégés par la retenue et des débits solides qui n'ont pas été retenus au sein de la retenue. Pour chaque crue, le volume de sédiments piégés dans la retenue ($A_{piégé}$ en m^3) a été calculé en déconvoluant le volume de sédiments accumulés dans la retenue entre deux mesures d'envasement (période de 5 ans) en fonction du volume global de la crue (V en m^3) et du débit maximal instantané de la crue (Q_{max} en m^3s^{-1}) à l'aide de l'équation de Williams (1975) (Equation 1).

$$A_{piégé} \sim (V Q_p)^{0,56} \quad (\text{eq. 1})$$

Le flux de sédiment piégé par la retenue est ensuite déduit en multipliant le volume de sédiments $A_{piégé}$ par la densité moyenne des sédiments de la retenue estimée à 1,2.

On ajoute ensuite les flux de sédiments non piégés par le barrage. Pour évaluer ces flux de sédiments non piégés, les flux de vidange ONEP sur la période 1980-2010 sont supposés avoir des concentrations négligeables en sédiments étant donné que le niveau de sédiments n'a atteint le niveau des prises Jet Creux qu'en 2010, les flux de vidange de fond sont supposés avoir une concentration moyenne de 0,5 g l⁻¹ et les flux de déversement une concentration moyenne de 0,1 g l⁻¹. Les campagnes bathymétriques effectuées sur Ibn Batouta (Tableau 3) font apparaître que la retenue a perdu 33 % de sa capacité entre 1977 et 2013, soit une perte annuelle de 1 % (ou une durée de vie du barrage estimée à 100 ans).

Tableau 2. Base de données utilisée pour le paramétrage, la calibration et la validation du modèle SWAT

Type	Source	Échelle/ Période	Description
MNT	SPOT	20 m	Modèle numérique du terrain
Sol	LCGS/Inypsa (1989)	1/50000	Classes du sol/ Caractéristiques pédologique (Figure 1b)
Occupation du sol	Classification d'une image Landsat (2009, 30 m)	1/50000	Classes d'occupation du sol (Figure 1a)
Pluviométrie	ABHL - Agence du Bassin Hydraulique de Loukkos	1980-2010	Précipitations journalière (Station Ibn Batouta, Béni Harchane, Romaine, Kalaya)
Température	DMN - Direction de la Météorologie Nationale	1980-2010	Températures journalières (min., max., moy.)
Débits liquides	ABHL	1980-2010	Débits liquides journaliers (Station Ibn Batouta)
Débits solides	Débits reconstitués	1980-2010	Débits solides journaliers (Station Ibn Batouta)

Tableau 3. Mesures de bathymétrie disponibles au niveau du barrage Ibn Batouta

Date	Volume normal (Mm ³)
01/05/1983	41
01/04/1989	38,5
01/05/1994	34,3
15/05/2000	33,1
30/11/2003	32,5
31/10/2007	31,8
01/09/2013	29,12

Mise en œuvre du modèle SWAT

Le modèle SWAT (Soil and Water Assessment Tool) est un modèle hydrologique semi distribué à base physique. Dans son utilisation la plus courante, l'ensemble des processus hydrologiques sont simulés sur un pas de temps journalier à l'échelle de l'unité de réponse hydrologique (URHs), l'unité de base pour la modélisation SWAT. Chaque unité présente une combinaison unique d'occupation de sol, de type de sol à l'intérieur d'un sous bassin (Gassman *et al.*, 2007). Le modèle SWAT décompose le fonctionnement du bassin en deux grandes phases : la phase terrestre où il simule les déplacements de l'eau et des sédiments de la zone de production vers le réseau hydrographique et la phase fluviale où il représente le routage de ces éléments tout au long des cours d'eau jusqu'à l'exutoire du bassin (Neitsch *et al.*, 2005). La simulation des apports en eaux et en sédiments au niveau du bassin versant Tleta a été faite à partir des données présentées dans le tableau 2 et de la version ArcSWAT 2009. La structuration des données ainsi que la démarche suivie pour l'intégration de ces informations dans le modèle a été réalisée en suivant la procédure décrite dans la documentation du modèle. Après la préparation des entrées de SWAT, nous sommes passés à la phase de paramétrage qui englobe trois grandes phases principales:

- La prise en compte de la topographie à travers le MNT (Modèle Numérique du Terrain) a permis de délimiter le bassin et les sous bassins, de définir le réseau hydrographique et de dériver la carte des pentes. Quatre classes de pente ont été considérées (0-5 %; 5-15 %; 15-30 % et > 30 %) pour le bassin versant Tleta;
- La superposition des informations, relatives à la pente, l'occupation du sol et au type du sol a permis de discrétiser le bassin d'étude en unités de réponse hydrologique (URHs);
- La prise en compte des données de forçage climatique pour la période de référence de 31 ans (1980-2010) : précipitations journalières et températures (min, max., moyenne journalière) collectées au niveau des quatre stations météorologiques (Tableau 3). En l'absence des données relatives à la vitesse du vent, l'humidité relative moyenne et la radiation solaire, la méthode Hargreaves (Hargreaves et Samani, 1982) basée uniquement sur les températures maximales et minimales journalières a été adoptée pour la simulation de l'ETP.

Les méthodes SCS (USDA-SCS, 1972) et Muskingum (Overton, 1966; Brakensiek, 1967) ont été retenues dans cette étude pour estimer respectivement le ruissellement de surface et le transfert d'eau et de sédiments dans le réseau hydrographique. Le modèle SWAT utilise la méthode MUSLE (équation 2) pour simuler l'érosion au niveau des bassins versants (Neitsch *et al.*, 2005).

$$\text{Sed} = 11,8 * (V_{\text{tot}} * Q_{\text{max}})^{0,56} * K * \text{LS} * C * P \text{ (équation 2)}$$

Où Sed: flux de sédiments dans un jour donné (tonnes métriques), V_{tot} : volume de ruissellement de surface (en m³), Q_{max} : débit de pointe (en m³ s⁻¹), K: le facteur d'érodibilité du sol, C: le facteur de couverture et de gestion, P est le facteur des pratiques antiérosives, LS: le facteur topographique. V_{tot} est estimé, dans la modélisation SWAT par l'équation empirique SCS, alors que Q_{max} est estimé par la méthode rationnelle modifiée (Neitsch *et al.*, 2005).

MUSLE (Williams, 1975) est la version modifiée de l'Universal Soil Loss Equation (USLE) développé par Wischmeier et Smith (1965, 1978). Elle permet le calcul de l'érosion causée par les précipitations et le ruissellement, alors qu'USLE prédit l'érosion moyenne interannuelle en fonction de l'énergie de la pluie. Dans MUSLE, le facteur d'énergie des précipitations est remplacé par un coefficient représentant le ruissellement. Il représente l'énergie utilisée dans l'arrachement et le transport des sédiments dans les cours d'eau et pas seulement ceux liés au détachement comme pour l'équation classique d'USLE (Neitsch *et al.*, 2005). Les sorties en sédiments sont restituées en tonnes par hectare à l'échelle de chaque URH, de chaque sous-bassin, ou du bassin dans sa totalité.

Analyse de sensibilité, calage et validation du modèle SWAT

La phase décalage consiste à ajuster certains paramètres clés pour faire coïncider au mieux les données observées avec celles simulées par le modèle SWAT. Généralement, une période de temps qui dépasse au moins trois ans est nécessaire pour cette étape de calage. Pour mieux satisfaire cette étape, une analyse de sensibilité permet préalablement de déterminer les paramètres clés qui méritent une grande attention lors du calage. L'analyse de sensibilité et l'estimation des paramètres optimaux du modèle ont été réalisées en mixant des approches semi-automatiques regroupées dans l'outil libre SWAT-CUP, et une approche manuelle («Manual calibration») pour finaliser l'ajustement des paramètres. Pour évaluer la performance du modèle à reproduire les observations, nous avons retenus plusieurs indicateurs statistiques recommandés par les utilisateurs de SWAT (Arnold *et al.*, 2012): le coefficient de détermination (R^2), le coefficient de Nash-Sutcliffe (NSE) et l'indicateur de biais (%PBIAS). Pour donner un ordre de grandeur, Moriasi *et al.* (2007) considèrent comme satisfaisantes des valeurs de NSE dépassant 0,75 (admissibles à partir de 0,65), des valeurs de NSE dépassant 50 %, et des valeurs de biais inférieures à 25% pour les débits et inférieures à 55% pour les sédiments. La procédure traditionnelle du calage avec SWAT est d'ajuster successivement les débits, les sédiments et finalement les nutriments.

Pour cette étude, la période de référence de 31 ans (1980-2010) a été répartie en trois périodes: 1980-1982 pour l'initialisation du modèle et pour prendre en compte des conditions initiales du milieu, 1983-1996 pour le calage et 1997-2010 pour la validation.

Le calage des paramètres hydrologiques consiste à ajuster au mieux les différents paramètres afin de reproduire les différents termes du bilan en eau (Rasolomanana, 2012). Cette première étape du calage de SWAT est cruciale, car l'eau est la composante la plus importante et la plus critique du fait qu'elle présente la force motrice qui contrôle le fonctionnement des phénomènes qui se déroulent au niveau de l'hydrosystème (érosion, envasement, transfert de polluants, etc.). Suivant une démarche classique (Carvalho-Santos *et al.*, 2015), le calage a consisté à reproduire au mieux les débits journaliers à l'exutoire du bassin versant. Pour cette étude, la série de débits entrants dans le barrage Ibn Batouta pour la période 1983-1996 a été considérée. Pour affiner le calage des processus hydrologiques, nous avons également cherché à bien reproduire la contribution du ruissellement direct et la contribution du ruissellement retardé. Deux méthodes ont été utilisées pour séparer ces 2 contributions dans les données mesurées : une méthode graphique sur quelques crues et une méthode de filtrage automatique sur l'ensemble de la série. La séparation du ruissellement entre ces deux composantes par la méthode de filtrage automatique ne permet pas de fournir un résultat fiable à l'échelle de chaque crue mais elle permet de fournir une indication assez fiable de la contribution moyenne interannuelle de chaque composante. Si la fonction objective visée dans la phase de calage reste une bonne reproduction des débits, la répartition des différentes composantes du ruissellement sera également analysée et discutée. Une fois les flux d'eau correctement reproduits, le calage des paramètres d'érosion les plus influents, a été réalisé en tentant de minimiser les écarts entre les flux de sédiments arrivant au barrage issus de la mesure et du modèle sur la période 1983-1996.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité réalisée à l'aide de SWAT-CUP a permis d'identifier un certain nombre de paramètres influents. Pour la partie hydrologique, ces paramètres sont liés à la partition entre ruissellement et infiltration (CN2, curve number), ou l'interaction entre le compartiment sous-terrain et l'écoulement dans l'oued (RCHRG_DP, GWQMN, REVAPMN, GW_DELAY), et un facteur de compensation pour le calcul de l'évapotranspiration (ESCO). Concernant la dynamique d'exportation des sédiments, les paramètres qui se sont avérés les plus sensibles sont les caractéristiques de longueur de pente (SLSUBBSN) et d'inclinaison (SLOPE), les coefficients de rugosité de Manning (OV_N) et le facteur d'ajustement des débits de pointe pour le transport fluvial des sédiments (PRF).

Calibration et validation du modèle

La figure 2 montre la comparaison graphique des débits mensuels observés et simulés par SWAT après calage. Les graphes de calibration et de validation présentent une bonne similarité entre les données de ruissellement simulées et observées pour la zone d'étude. Les critères statistiques d'estimation de la qualité du modèle confirment cette impression visuelle avec les valeurs suivantes: R^2 (0,95), NSE (0,94) et %PBIAS (2) pour la période de calibration (1983-1996) contre R^2 (0,90), NSE (0,89) et %PBIAS (-6) pour la période de validation (1997-2010). Les résultats obtenus montrent donc que SWAT est capable de reproduire correctement les données observées à l'exutoire du bassin étudié au pas de temps mensuel.

Les performances mensuelles obtenues pour le calage des flux de sédiments transportés vers l'exutoire du bassin versant Tleta sont, selon les critères d'évaluation de Moriasi *et al.* (2007), satisfaisantes pour la période de calibration (R^2 de 0.83, NSE de 0.82 et %PBIAS de +17%) et acceptables

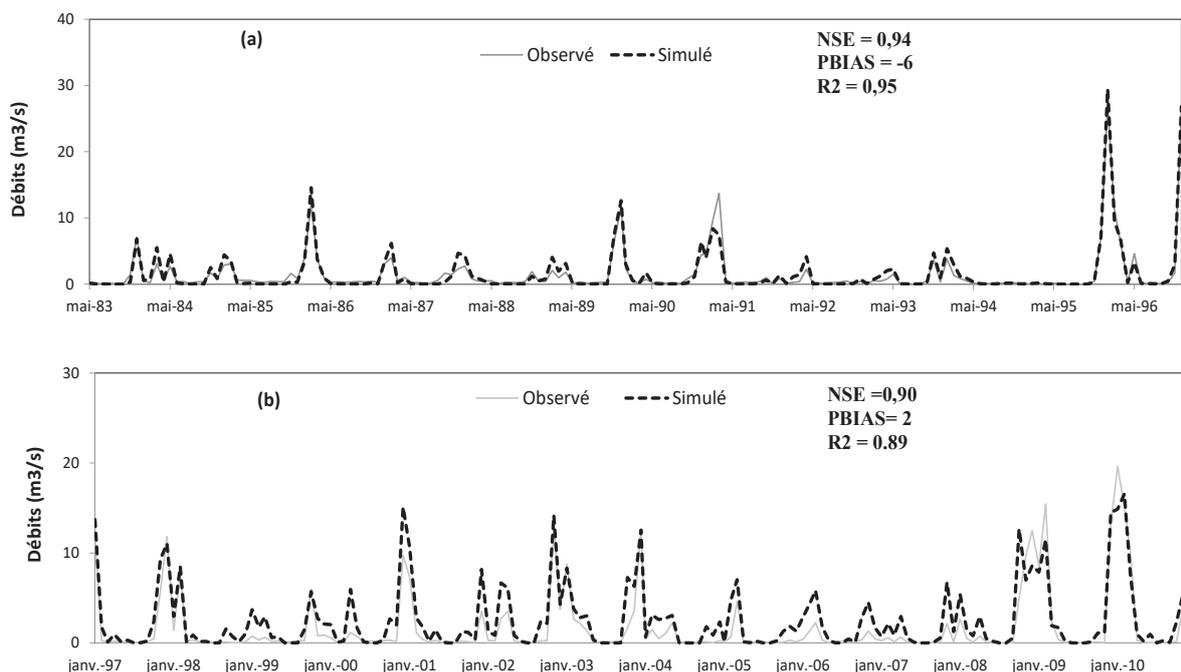


Figure 2. Comparaison entre les débits mensuels observés et simulés par SWAT: (a) période de calibration et (b) période de validation.

pour la période de validation (R^2 de 0.64, NSE de 0.61 et %PBIAS de -6%). Ces chiffres traduisent une légère sous-estimation des sédiments observés pour la période de calibration et une légère surestimation des sédiments observés pour la période de validation (Figure 3). Le taux d'érosion moyen simulé par SWAT au niveau de Tleta est de 29 t/ha/an pour la période de validation (1983-2010) alors que la dégradation spécifique sur ce bassin issue des mesures bathymétriques corrigées des sédiments non piégés est de 28,8 t ha⁻¹ an⁻¹ sur la période (1983-2013, pas de bathymétrie disponible en 2010). Cette valeur globale pour le bassin ne doit cependant pas masquer de fortes disparités au sein du bassin versant. En effet de nombreux secteurs du bassin constituent aujourd'hui des badlands, zones sources de forts départs de sédiments. Les zones cultivées ou en jachère sur fortes pentes peuvent aussi constituer des sources importantes de sédiments pour le barrage. Les sédiments sortants du barrage par vidange ou par déversement représentent moins de 5 % des sédiments entrant dans la retenue. Le taux d'arrachement du sol pour le nord du Rif se situe généralement entre 1 000 et 3 000 m³km⁻²an⁻¹, correspondant à des dégradations spécifiques de 12 à 35 t ha⁻¹an⁻¹.

Analyse du bilan hydrique

Les sorties du modèle SWAT entre 1983 et 2010 intégrant la période de calage et de validation permettent d'appréhender les différents termes du bilan hydrique (Tableau 4). Sur cette période, les résultats de simulation montrent que sur une moyenne annuelle de 777 mm de précipitation sur l'ensemble du bassin d'Ibn Batouta, environ 60 % (458,4 mm) retourne à l'atmosphère par évapotranspiration. Le débit du cours d'eau tel que simulé par SWAT totalise 283,4 mm qui se divise en ruissellement direct (160,3 mm), flux latéraux dans le sol (9,4 mm) et contribution des aquifères peu profonds (113,7 mm). Ce total est légèrement supérieur à la valeur moyenne des flux d'eau arrivant au barrage annuellement (282 mm). Pour vérifier que les différents termes du bilan sont bien reproduits, nous avons analysé les données mesurées entre 1983 et 2010. Pour vérifier si les contributions de l'écoulement di-

rect et de l'écoulement retardé étaient bien respectées dans les simulations. L'application de la méthode graphique de séparation des hydrogrammes a permis de quantifier à 20 % ou 25 % environ la contribution de l'écoulement souterrain (incluant le débit de base et l'écoulement hypodermique) au niveau du bassin versant Tleta, alors que le méthode par filtrage automatique l'a évalué entre 15 à 25 % selon les paramètres de filtrage retenus. L'analyse du bilan nous permet donc d'identifier que le modèle semble sous-estimer légèrement la part du ruissellement direct et surestimer légèrement la part du ruissellement retardé. Les pistes de correction de cette légère anomalie reposent sur une meilleure estimation des paramètres régissant la partition entre ruissellement et infiltration ou l'interaction entre le compartiment sous-terrain et l'écoulement dans l'oued. D'autres sources d'incertitudes que le calage du modèle peuvent également expliquer ce léger décalage entre valeurs simulées et valeurs mesurées. Par exemple, la méthode de Hargreaves utilisée pour calculer l'évapotranspiration potentielle est peu précise, puisqu'elle implique seulement les paramètres min et max de la température et que les valeurs utilisées pour ces deux paramètres ont été mesurées sur une station climatique située à l'extérieur du bassin Tleta (aérodrome de Tanger), faute de données disponibles au sein du bassin versant.

Tableau 4. Analyse des composantes hydrologiques issues du modèle SWAT calé et validé

Fractionnement du bilan hydrique	Quantités (mm)
Précipitation totale	777
Ruissellement	160,3
Mouvements latéraux d'eau dans le sol contribuant au débit du cours d'eau	9,4
Contribution de l'eau souterraine (aquifère peu profond) au débit du cours d'eau	113,7
Évapotranspiration réelle	458,4
Évapotranspiration potentielle	1266,3

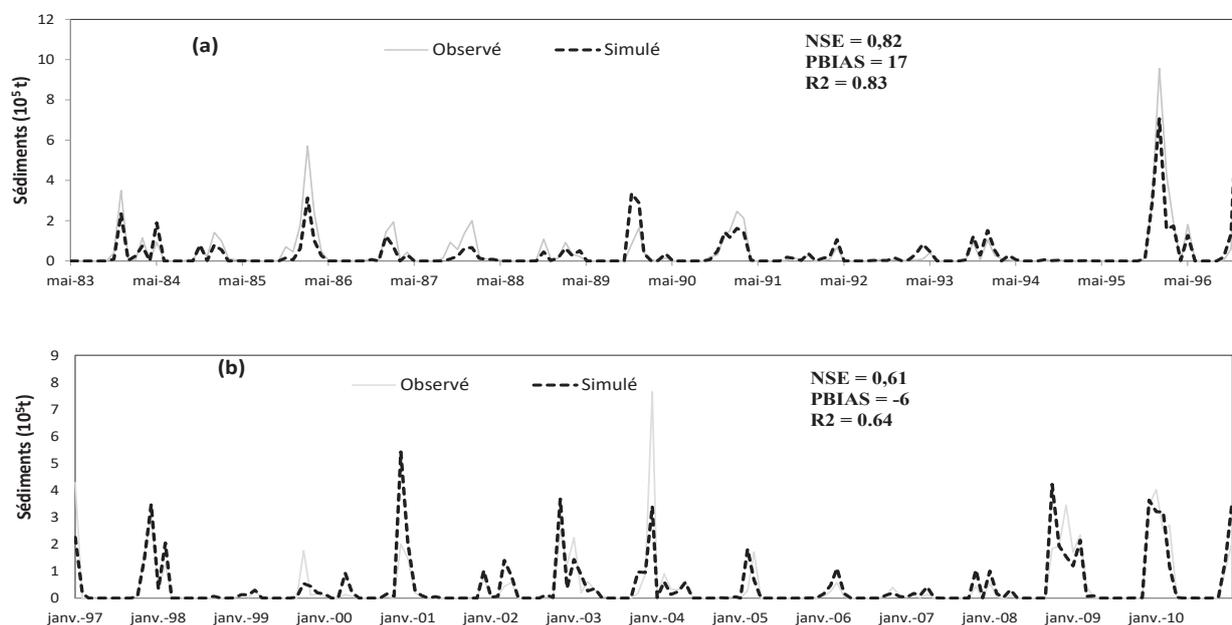


Figure 3. Comparaison entre les flux mensuels de sédiments observés et simulés par SWAT : (a) période de calibration et (b) période de validation

CONCLUSION

Le modèle SWAT est un outil très utile pour la gestion orientée des bassins versants hydrologiques. La calibration et la validation du modèle sont des étapes clés dans la simulation et la réduction des incertitudes. L'étude réalisée au niveau du bassin versant Tleta a montré que le modèle SWAT peut simuler d'une façon satisfaisante les débits et les sédiments dans une zone sous influence atlantique et méditerranéenne semi-aride. L'évaluation de la qualité de simulation a été réalisée par comparaison avec les mesures de terrain suivant trois estimateurs statistiques. Les valeurs trouvées de R^2 (0,95; 0,90), NSE (0,94; 0,89) et %PBIAS (-6; 2) pour les débits respectivement pour la calibration et la validation et les valeurs de R^2 (0,83; 0,64), NSE (0,82; 0,61) et %PBIAS (17; -6) pour le transport solide confirme cette bonne qualité de simulation. Quelques pistes d'amélioration ont été évoquées, comme par exemple, renforcer la connaissance des propriétés hydrodynamiques et érosives des sols, renforcer les mesures météorologiques au sein même du bassin afin d'améliorer l'estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP), ou encore affiner le calage des paramètres régissant la partition infiltration/ruissellement et les échanges nappe-rivière. Cependant, le modèle fournit des résultats largement satisfaisants et peut donc être utilisé dans le bassin versant de Tleta pour évaluer l'impact combiné des scénarios d'occupation du sol et climatiques sur la quantité et la qualité des eaux mobilisées par le barrage d'Ibn Batouta.

Remerciements

Les auteurs remercient le programme JEAI Vecteur financé par l'IRD et le projet ALMIRA (ANR-12-TMED-0003) financé par l'ANR pour leur support financier et technique.

RÉFÉRENCES

- Albergel J., Mansouri T., Pépin Y., Seguis L. (1999). Reconstitution des crues sur les bassins versants des lacs collinaires en Tunisie Centrale et au Cap-Bon. (Atelier sur l'estimation des crues et des étiages. ENIT - INRS-eau Université du Québec - AUPELF réf. Tunis, 16-17 février 99.
- Arnold, J., Moriasi, D., Gassman, P., Abbaspour, K., White, M., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R., Van Griensven, A. and Van Liew, M. (2012). SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE* 55(4): 1491-1508.
- Arnold, J. G. and Fohrer, N. (2005). SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. *Hydrological processes* 19(3): 563-572.
- Bakker, M. M., Govers, G., Kosmas, C., Vanacker, V., Van Oost, K. and Rounsevell, M. (2005). Soil erosion as a driver of land-use change. *Agriculture, ecosystems & environment* 105(3): 467-481.
- Bakker, M. M., Govers, G. and Rounsevell, M. D. (2004). The crop productivity-erosion relationship: an analysis based on experimental work. *Catena* 57(1): 55-76.
- Bonumá, N. B., Rossi, C. G., Arnold, J. G., Reichert, J. M., Minella, J. P., Allen, P. M. and Volk, M. (2014). Simulating landscape sediment transport capacity by using a modified SWAT model. *Journal of Environmental Quality* 43(1): 55-66.
- Brakensiek, D. L. (1967). Kinematic Flood Routing. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 10(3): 340-343.
- Carvalho-Santos, C., Nunes, J. P., Monteiro, A. T., Hein, L. and Honrado, J. P. (2015). Assessing the effects of land cover and future climate conditions on the provision of hydrological services in a medium-sized watershed of Portugal. *Hydrological processes*.
- Chaponnière, A. (2005). Fonctionnement hydrologique d'un bassin versant montagneux semi-aride: cas du bassin versant du Rehraya (Haut Atlas marocain).
- Choukri, F., Chikhaoui, M., Naimi, M., Raclot, D., Pépin, Y. and Lafia, K. (2016). Impact du changement climatique sur l'évolution de l'érosivité des pluies dans le Rif Occidental (Nord du Maroc). *European Scientific Journal*, ESJ 12(32).
- Fadil, A., Rhinane, H., Kaoukaya, A., Kharchaf, Y. and Bachir, O. A. (2011). Hydrologic modeling of the Bouregreg Watershed (Morocco) using GIS and SWAT model. *Journal of Geographic Information System* 3(04): 279.
- Ficklin, D. L. (2010). Modeling the impacts of climate change on hydrology and agricultural pollutant runoff in California's Central Valley. University of California, Davis.
- Ficklin, D. L., Luo, Y., Luedeling, E. and Zhang, M. (2009). Climate change sensitivity assessment of a highly agricultural watershed using SWAT.
- Gassman, P. W., Reyes, M. R., Green, C. H. and Arnold, J. G. (2007). The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. Center for Agricultural and Rural Development, Iowa State University.
- Gatzke, S. E. (2010). Modeling the effects of agricultural conservation practices and climate variability on sediment yield and transport in the Colusa Basin, California. University of California, Davis.
- Hargreaves, G. H. (1975). Moisture Availability and Crop Production, *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 18(5): 980-984.
- Hargreaves, G. H. and Samani, Z. A. (1982). Estimating potential evapotranspiration. *Journal of the Irrigation and Drainage Division* 108(3): 225-230.
- Hunink, J., Niadas, I., Antonaropoulos, P., Droogers, P. and De Vente, J. (2013). Targeting of intervention areas to reduce reservoir sedimentation in the Tana catchment (Kenya) using SWAT. *Hydrological Sciences Journal* 58(3): 600-614.
- Kim, N. W., Lee, J. W., Lee, J. and Lee, J. E. (2010). SWAT application to estimate design runoff curve number for South Korean conditions. *Hydrological processes* 24(15): 2156-2170.
- Knisel, W. G. (1980). CREAMS: a field scale model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems [USA]. United States. Dept. of Agriculture. Conservation research report (USA).
- Laurent, F., Ruelland, D. et Chapdelaine, M. (2007). Simulation de l'effet de changements de pratiques agricoles sur la qualité des eaux avec le modèle SWAT. *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science* 20(4): 395-408.
- Leonard, R., Knisel, W. and Still, D. (1987). GLEAMS: Groundwater loading effects of agricultural management systems. *Transactions of the ASAE* 30(5): 1403-1418.

- Lévesque, É. (2007). Évaluation de la performance hydrologique du modèle SWAT pour de petits bassins versants agricoles du Québec. Université Laval.
- Merzouk, A., Fenjiro, I. et Laouina, A. (1996). Cartographie de l'évolution des formes d'érosion dans le Rif occidental (Maroc): étude multirate utilisant un SIG bassin versant. *Bulletin-Réseau Erosion* (16): 444-456.
- Michard, A. (1976). *Éléments de géologie marocaine*. Éditions du Service géologique du Maroc.
- Michaud, A., Deslandes, J. et Beaudin, I. (2006). Modélisation de l'hydrologie et des dynamiques de pollution diffuse dans le bassin versant de la rivière aux Brochets à l'aide du modèle SWAT—Rapport final. Sainte-Foy, Institut de recherche et développement en agroenvironnement, [En ligne]. http://www.irda.qc.ca/_documents/_Results/18.pdf (5 octobre 2006).
- Moriasi, D., Arnold, J., Van Liew, M., Bingner, R., Harmel, R. and Veith, T. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. ASABE* 50(3): 885-900.
- Mosbahi, M., Benabdallah, S. and Boussema, M. (2011). Hydrological Modeling in a Semi-Arid Catchment Using SWAT Model. *Journal of Environmental Science and Engineering* 5(12): 1695-1701.
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J., Williams, J. & King, K. (2005). Soil and water assessment tool: theoretical documentation, version 2005. Texas, USA.
- Ouessar, M., Bruggeman, A., Abdelli, F., Mohtar, R., Gabriels, D. and Cornelis, W. (2008). Modelling water-harvesting systems in the arid south of Tunisia using SWAT. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 5(4): 1863-1902.
- Overton, D. (1966). Muskingum flood routing of upland streamflow. *Journal of Hydrology* 4: 185-200.
- Partie, I. (2006). Variabilité spatio-temporelle des exportations de sédiments et de phosphore dans le bassin versant de la Rivière aux Brochets au sud-ouest du Québec.
- Rasolomanana, S. D. (2012). Modélisation des petits bassins versants en milieu rural: problématique des modèles fortement paramétrés. Université Laval.
- Salou, B. I. G. (2009). Estimation des apports au lac Saint-Charles à l'aide du modèle hydrologique SWAT. Université Laval.
- Service, U. S. S. C. (1972). SCS national engineering handbook, section 4: hydrology. The Service.
- Williams, J., Arnold, J., Kiniry, J., Gassman, P. and Green, C. (2008). History of model development at Temple, Texas. *Hydrological Sciences Journal* 53(5): 948-960.
- Williams, J. R. (1975). Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor.
- Williams, J. R., Nicks, A. and Arnold, J. G. (1985). Simulator for water resources in rural basins. *Journal of Hydraulic Engineering* 111(6): 970-986.
- Wischmeier, W. H. and Smith, D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses - A guide to conservation planning. Predicting rainfall erosion losses - A guide to conservation planning.
- Yang, J., Reichert, P., Abbaspour, K., Xia, J. and Yang, H. (2008). Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China. *Journal of Hydrology* 358(1): 1-23.
- Yang, Q., Meng, F.-R., Zhao, Z., Chow, T. L., Benoy, G., Rees, H. W. and Bourque, C. P.-A. (2009). Assessing the impacts of flow diversion terraces on stream water and sediment yields at a watershed level using SWAT model. *Agriculture, ecosystems & environment* 132(1): 23-31.
- Zhang, X., Srinivasan, R. and Van Liew, M. (2008). Multi-site calibration of the SWAT model for hydrologic modeling. *Transactions of the ASABE* 51(6): 2039-2049.