

Utilisation de SWAT pour la modélisation hydrologique et l'évaluation du rendement des sédiments dans le bassin versant de Nakhla, Maroc

R. BOUKHARI TALEB¹, M. NAIMI¹, M. CHIKHAOUI¹, M. SABIR²

(Reçu le 06/04/2021; Accepté le 28/07/2021)

Résumé

Dans cette étude, le modèle SWAT est mis en œuvre, à travers une procédure de calibration à trois étapes, afin de reproduire le fonctionnement hydrologique et les pertes en sol dans le versant de Nakhla. Une pré-calibration permettant de minimiser l'incertitude des intrants et équilibrer le bilan hydrique à travers la reproduction du gradient altitudinal très prononcé au niveau de ce bassin. Une analyse de sensibilité moyennant la combinaison de la méthode Latin Hypercube-One factor At a Time (LH-OAT) et l'outil SWAT_Cup. Une calibration des débits au niveau des stations Nakhla et Timezouk, suivie d'une calibration simultanée des débits et des sédiments au niveau de la station Timezouk. Les résultats obtenus montrent que le modèle SWAT est sensible à huit paramètres liés au fonctionnement hydrologique du bassin et seulement à trois paramètres déterminant le processus de production des sédiments. Les critères statistiques et graphiques pour évaluer la performance du modèle SWAT ont montré de bons résultats au pas de temps journalier pour la période de calibration (NS et $R^2 > 0,7$) et pour la période de validation (NS et $R^2 \geq 0,7$). La calibration du processus de modélisation des sédiments a abouti à une bonne performance au pas de temps journalier pour la période de calibration et de validation (NS et $R^2 > 0,5$), avec une moyenne des pertes en sol à l'échelle du bassin versant de 11,2 T/ha pour la période 1984-1988, contre 13,4 t/ha/an pour la période 1989-1993.

Mots clés: Calibration, Validation, Analyse de sensibilité, Bassin versant de Nakhla, Maroc

Sediments yield appraisal by SWAT model in the Nakhla watershed, Morocco

Abstract

In this study, the SWAT model is implemented using a three-step calibration procedure, in order to simulate the hydrological functioning and the soil losses in the Nakhla watershed. Firstly, a pre-calibration stage that allows minimizing input uncertainty and offsetting the water balance through the duplication of the very distinct altitudinal gradient in this watershed. Secondly, an analysis of sensitivity that combines the Latin Hypercube-One Factor At a Time (LH-OAT) method and SWAT_CUP tool. Thirdly, a calibration of water flow at Nakhla and Timezouk outlets, followed by a simultaneous calibration of water flow and sediments at the Timezouk outlet. The results showed that SWAT model is sensitive to eight parameters that control the watershed's hydrological functioning and barely three parameters determining the sediment production process. The statistical and graphical criteria used to evaluate the performance of the model yielded good results at daily time step for the calibration (NS and $R^2 > 0.7$) and the validation period (NS and $R^2 \geq 0.7$). The calibration process of sediment modeling resulted in good performance at daily time step for both the calibration and validation period (NS and $R^2 > 0.5$). Indeed the average soil losses at the watershed level was about 11.2 t.ha⁻¹. year⁻¹ for 1984-1988 period and 13.4 t.ha⁻¹.year⁻¹ for 1989-1993 period.

Keywords: Calibration, Validation, Sensitivity analysis, Nakhla watershed, Morocco

INTRODUCTION

La gestion des bassins versants joue un rôle important dans la protection des sols et des ressources en eau. Dans les régions sous climat méditerranéen, la quantification de l'érosion des sols et du transport des sédiments est un défi majeur qui dépend de la variabilité des caractéristiques physiques des bassins versants et de leurs fonctionnements hydrologiques (Abdelwahab *et al.*, 2018).

Au Maroc, les pertes de capacité de stockage des barrages par le phénomène de l'envasement est estimée à 75 millions m³/an, soit l'équivalent d'un barrage de taille moyenne (Chikhaoui and Naimi, 2011). Cette situation est exacerbée par les phénomènes de dégradation des sols et du couvert végétal (Biru and Kumar, 2018). Pour analyser son état et évaluer les risques d'expansion et d'aggravation, la modélisation s'avère un excellent outil (Chikhaoui *et al.*, 2010).

Le modèle est une représentation quantitative du monde réel, capable de prédire l'avenir à l'issue des scénarios (Lobligeois, 2014), et fournir une référence pour la prise de décision (Mathevet *et al.*, 2010). Le modèle hydrologique est un assemblage interdépendant d'équations mathématiques qui représentent les processus régissant le mouvement (Seyler *et al.*, 2018), et le transport de l'eau (Duchemin

et al., 2001), des sédiments (El Boukhari *et al.*, 2020), des nutriments (Rollo *et al.*, 2008), des pesticides (Wang *et al.*, 2019), des bactéries (Baffaut and Sadeghi, 2010) et d'autres constituants à la surface du sol et à travers les eaux souterraines, les cours d'eau et les systèmes de réservoirs.

Au fil du temps, de nombreux modèles hydrologiques ont été développés pour permettre une meilleure compréhension des processus hydrologiques et d'érosion. Toutefois, l'utilisation réussie d'un modèle hydrologique dépend d'une part, de la qualité des données utilisées et par la suite des incertitudes dans les données d'entrée et des imperfections physiques et d'autre part, de la procédure de calibration adoptée.

La calibration des paramètres hydrologiques est une étape nécessaire à la mise en œuvre d'un modèle hydrologique (Arsenault, 2015) qui dépend de la technique et des paramètres de calibration utilisés. La calibration des modèles hydrologiques est un défi mondial en raison de l'incertitude liée à la multitude des paramètres. La difficulté augmente dans une région où les précipitations saisonnières sont élevées, et où les résultats présentent une hétéroscédasticité et une autocorrélation élevée (Sun, 2013).

L'objectif de la calibration est de trouver les valeurs des paramètres qui reproduisent les caractéristiques physiques

¹ Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc

² École Nationale Forestière d'Ingénieurs, Salé, Maroc

d'un bassin versant (Larabi, 2017). Ces paramètres peuvent être estimés à partir de l'interprétation des mesures *in situ* ou à la suite de la confrontation des sorties simulées avec des observations (Gatien, 2014). L'opération de calibration peut être i) manuelle, si les séquences d'ajustement des paramètres sont entièrement laissées à l'opérateur ou ii) automatique lorsque l'opérateur s'appuie sur des algorithmes pour faire varier les paramètres qui sont ajustés en fonction de la valeur de la fonction objectif utilisée pour la calibration et les valeurs guides introduites par l'hydrologue (Beven, 2019). Qu'elle soit manuelle ou automatique, la calibration n'est pas une opération facile et le temps alloué à sa réalisation ne suffit pas souvent pour garantir des résultats satisfaisants (Gupta *et al.*, 1999). L'automatisation de la calibration force à reproduire un modèle calibré même si ce dernier peut contenir des erreurs d'entrée de données ou des ajustements inappropriés de certains paramètres difficilement identifiés par l'utilisateur des algorithmes d'auto calibration.

Cette méthode de calibration en hydrologie a été largement critiquée par plusieurs auteurs qui recommandent la calibration manuelle lors de l'utilisation des modèles hydrologiques semi-distribués tel que SWAT. Cependant, cette technique exige la maîtrise des processus physiques dans les bassins versants étudiés et l'incertitude de variation des paramètres (Arnold *et al.*, 2012), ce qui est très difficile, voire impossible au moment de l'application du modèle à grande échelle.

L'approche traditionnelle de calibration des modèles à l'aide du débit observé d'un cours d'eau à une ou plusieurs stations peut encore mener à un modèle où plusieurs composantes du système hydrologique du bassin hydrographique demeurent pratiquement non calibrées (Wanders *et al.*, 2014). Compte tenu de ces problèmes, une bonne correspondance entre le débit observé et le débit simulé n'est pas suffisante pour évaluer la capacité de simulation des modèles hydrologiques à base physique (Demarty *et al.*, 2005).

L'une des caractéristiques les plus importantes d'un modèle hydrologique distribué est l'hétérogénéité spatiale des processus qui reflète les effets de l'hétérogénéité spatiale des facteurs météorologiques (précipitations et évaporation) et les facteurs de surface (topographie, type de sol et utilisation des terres, sur le cycle hydrologique du bassin (Gao *et al.*, 2018). Plusieurs combinaisons de paramètres sont possibles pendant la calibration et produisent des résultats de simulation tout aussi raisonnables et réalistes.

Pour une meilleure calibration Arnold *et al.* (2012) suggèrent d'effectuer d'abord la calibration manuelle sur le bilan hydrologique annuel moyen et les charges annuelles moyennes (minimisant les biais en pourcentage), moyennant l'auto-calibration en premier, suivie d'une calibration manuelle, afin de s'assurer que les moyennes annuelles et les bilans généraux sont corrects. Comme c'est recommandé par Van Liew *et al.* (2005), la combinaison des deux méthodes aboutit à des résultats prometteurs en fournissant des estimations initiales des paramètres du modèle, en maintenant l'équilibre de masse et en représentant adéquatement l'ampleur des variables de sortie (Arnold *et al.*, 2012).

Afin de surmonter l'obstacle de la calibration, plusieurs auteurs ont proposé des recommandations et des suggestions. Arnold *et al.* (2012) recommandent qu'une bonne calibration et validation du modèle implique des données observées qui comprennent des années humides, moyennes et sèches, des techniques d'évaluation multiples (Legates and McCabe, 1999; Boyle *et al.*, 2000), la calibration de toutes les composantes à évaluer simultanément et la vérification que d'autres sorties du modèle sont raisonnables. Yang *et al.* (2008) affirme qu'il existe une relation forte entre la calibration et l'analyse de l'incertitude, aussi ils doivent être effectués simultanément. En d'autres termes, la calibration doit toujours s'accompagner d'une évaluation de sa qualité en tenant compte de toutes les erreurs de modélisation.

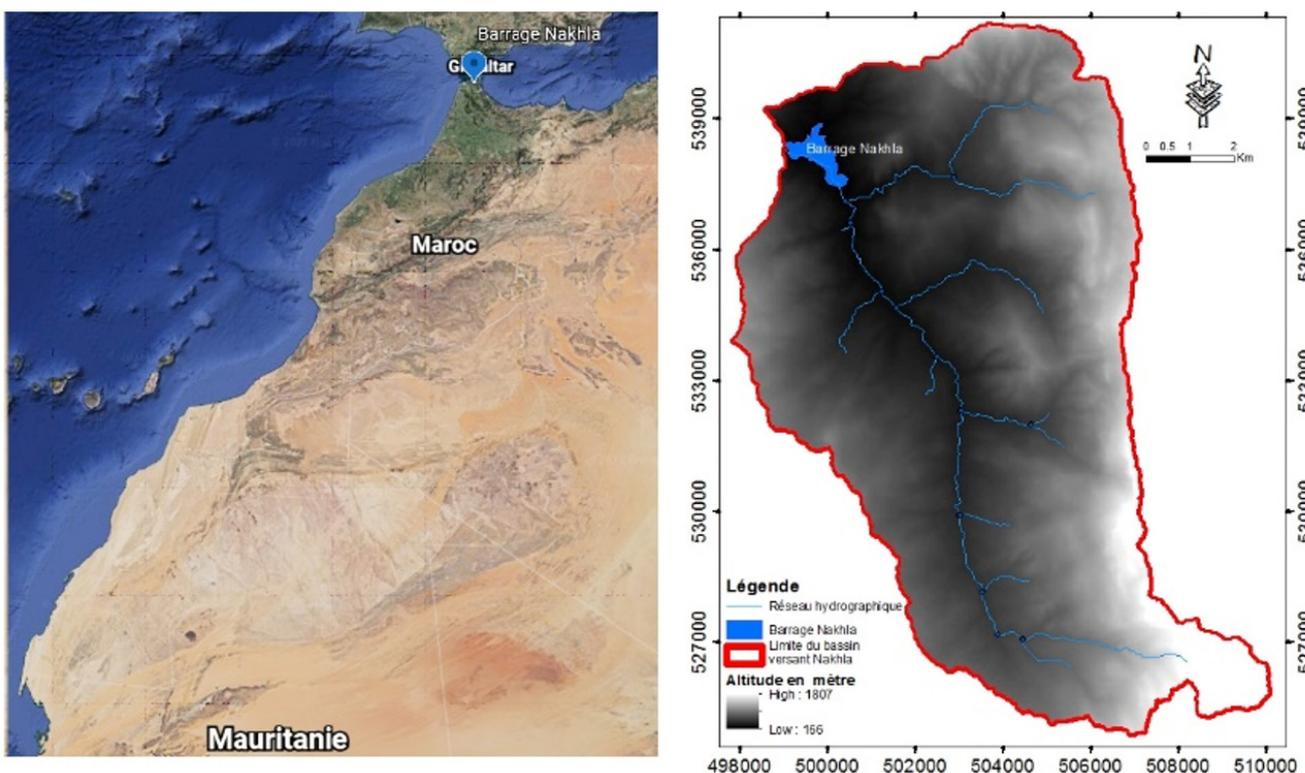


Figure 1: Situation géographique de la zone d'étude

Au niveau de cet article, le modèle SWAT est mis en œuvre au niveau du bassin versant Nakhla en adoptant une procédure de calibration qui respecte les recommandations proposées par les chercheurs au niveau de la littérature. Pour une meilleure reproduction du fonctionnement hydrologique et évaluation spatiale et temporelle des pertes en sol au niveau du bassin versant Nakhla, nous proposons d'autres recommandations pour surmonter les obstacles de calibration le long des différentes étapes de calibration du modèle SWAT.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Description de la zone d'étude

Le bassin versant Nakhla d'une superficie de 110,8 km² est situé à 20 km au sud de la ville de Tétouan (Figure 1). Il est caractérisé par un relief accidenté, avec une altitude de 1800 m au niveau des sommets calcaires dans le sud-est du bassin, de 160 m au niveau du barrage, et une pente supérieure à 20 degré pour plus de 50% du bassin versant. Les données climatiques mettent en relief le caractère méditerranéen du bassin, à savoir une saison sèche de mai-juin à septembre et une saison pluvieuse d'octobre à avril. Les précipitations moyennes annuelles sont de 670 mm au niveau de la station du barrage durant la période 1980-2008. Les formations géologiques sont dominées par deux ensembles de roches aux caractéristiques contrastées: une dorsale calcaro-dolomitique dure et compacte sur une formation marno-schisteuse tendre (Naimi *et al.*, 2003). Le substrat combiné aux autres facteurs de pédogenèse ont permis la formation d'une couverture pédologique dominée par les sols minéraux bruts, les sols peu évolués, les sols calcimagnésiques et les sols à sesquioxides de fer et/ou de manganèse. L'agriculture dans le bassin versant, en majorité pluviale, est une agriculture traditionnelle. Les zones irriguées sont limitées aux terrasses installées à proximité des sources qui surgissent à la base de la dorsale calcaire. La production agricole reste faible et elle est destinée surtout à l'autoconsommation. La végétation naturelle est dominée par le chêne liège, les lauriers et le tamaris.

Outils de modélisation adoptés

Afin de mettre en œuvre cette étude, un ensemble d'applications complémentaires a été adopté pour reproduire le fonctionnement sédiment-hydrologique et évaluer la variabilité spatiale et temporelle de l'érosion à l'échelle du bassin versant Nakhla.

SWAT: Soil and Water Assessments Tools

Le modèle SWAT a été adopté par la présente étude vu son application réussie dans la région du nord du Maroc (Boukhari Taleb *et al.*, 2019; Choukri *et al.*, 2020). Ce modèle a été développé par le département de l'agriculture et les laboratoires de l'université de Texas A & M aux États-Unis. De plus, son caractère «Open source» ouvre des horizons d'adaptation à d'éventuelles spécificités du milieu étudié. Dans cette étude, SWAT est mis en œuvre à travers l'interface Arc GIS dédiée (Arc SWAT), qui facilite la gestion des bassins versants hétérogènes sur le plan du paysage, d'utilisation des sols et de pédologie.

La modélisation du fonctionnement hydrologique sous SWAT se déroule en deux phases. Au départ, le bassin versant est subdivisé en sous-bassins reliés par un réseau

hydrographique. Ensuite chaque sous-bassin est divisé en unités de réponse hydrologique (URH), caractérisées par une combinaison unique de pente, d'occupation et de type de sol et les pratiques culturales représentant l'hétérogénéité spatiale de l'environnement étudié (Zhang *et al.*, 2021). Les URH sont les unités de base pour lesquelles le modèle calcule le bilan hydrique, la croissance des cultures et l'effet des pratiques culturales (application d'engrais ou protection antiérosive). Le ruissellement au niveau de chaque sous-bassin est évalué en tenant compte du bilan hydrique sur l'ensemble des URH qui le compose.

Le cycle hydrologique est simulé par SWAT selon l'équation du bilan hydrique (Neitsch, 2005). Afin de modéliser le processus d'érosion, SWAT utilise la version modifiée de l'équation universelle de la perte en sol modifiée-MUSLE (Williams, 1975; Wischmeier and Smith, 1978). Cette version estime les pertes en sol en utilisant le volume et le pic de ruissellement (Laurent *et al.*, 2007). Elle dépend de l'érodibilité du sol, de la couverture végétale, de la topographie et des aménagements antiérosifs. MUSLE peut être exprimé comme suit:

$$Sed = 11.8 \times (Q_{surf} \times q_{peak} \times Area_{hru})^{0.56} \times K_{usle} \times C_{usle} \times P_{usle} \times LS_{usle} \times CFRG$$

Où Sed est la quantité de sédiments par jour donné en tonne, Q_{surf} est le volume d'écoulement de surface (mm.ha⁻¹), q_{peak} est le débit de ruissellement de pointe (m³.s⁻¹), $Area_{hru}$ est la surface de l'HRU (ha), K_{usle} est le facteur d'érodibilité du sol, C_{usle} est le facteur de couverture végétale du sol, P_{usle} est le facteur de pratique antiérosif, LS_{usle} est le facteur topographique et CFRG est le facteur brut de fragmentation (Neitsch, 2005).

SWAT_CUP: SWAT calibration uncertainty programs

L'utilitaire SWAT_CUP (SWAT Calibration Uncertainty Programs) assure la manipulation et la modification des paramètres du modèle SWAT (Arnold *et al.*, 2012). Cet outil comporte cinq méthodes d'estimation de l'incertitude, basée sur les méthodes bayésiennes (SUFI-2, Glue, Parasol, MCMC et PSO). Ces algorithmes facilitent la réalisation de l'analyse de sensibilité, la calibration, la validation et l'analyse d'incertitude du modèle SWAT (Abbaspour *et al.*, 2007).

LOAD ESTIMATOR (LOADEST)

Le principal défi de la modélisation d'un bassin hydrographique, en particulier dans les pays en développement, est la disponibilité des données. S'il est souvent possible d'obtenir des données sur le ruissellement des rivières, les stations de mesure de sédiments sont rares et les données pour calibrer un modèle n'existent généralement pas. LOAD ESTimator (LOADEST) est un logiciel en FORTRAN (Crain and Martin, 2009; William *et al.*, 2010), développé par U.S. Geological Survey en 2004 sur la base de deux logiciels LOADEST2 et ESTIMATOR, pour estimer les charges constituantes des rivières et des ruisseaux (Runkel *et al.*, 2004). L'approche d'estimation du rendement des sédiments dans LOADEST est purement statistique et repose uniquement sur des mesures de ruissellement à long terme et au moins 12 mesures de concentration pour la calibration du modèle. Ce logiciel, appliqué dans plusieurs études (Crain and Martin, 2009; William *et al.*, 2010), est considéré comme un outil privilégié pour l'estimation de toute sorte de solide en suspension.

MÉTHODES

Préparation des données d'entrée du modèle SWAT

La préparation des inputs de SWAT est une étape primordiale pour la réussite et la fiabilité du modèle. Ce processus commence par la préparation des tableaux des paramètres météorologiques et pédologiques nécessaires et leur saisie sur le générateur météorologique et la base de données de SWAT.

Une attention particulière a été accordée à l'élaboration de la base de données des sols du bassin Nakhla. En effet, ce travail est réalisé sur la base d'une étude pédologique au 1:50 000 du bassin versant. Outre les propriétés physiques des sols obtenues à partir de cette carte (Naimi *et al.*, 2005), nous avons décrit de nouveaux profils pédologiques et calculé d'autres caractéristiques du sol (conductivité hydraulique saturée, densité apparente, eau disponible

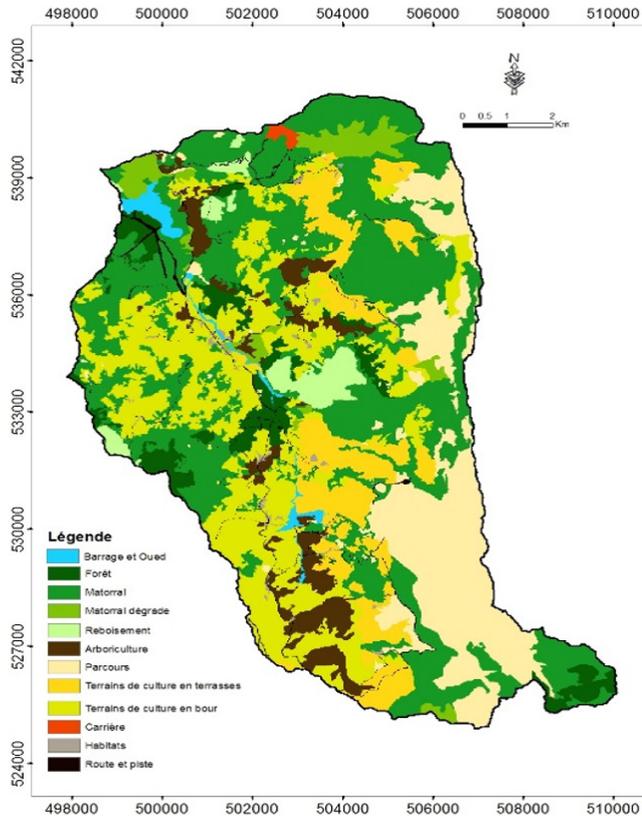


Figure 2: Carte d'occupation des sols

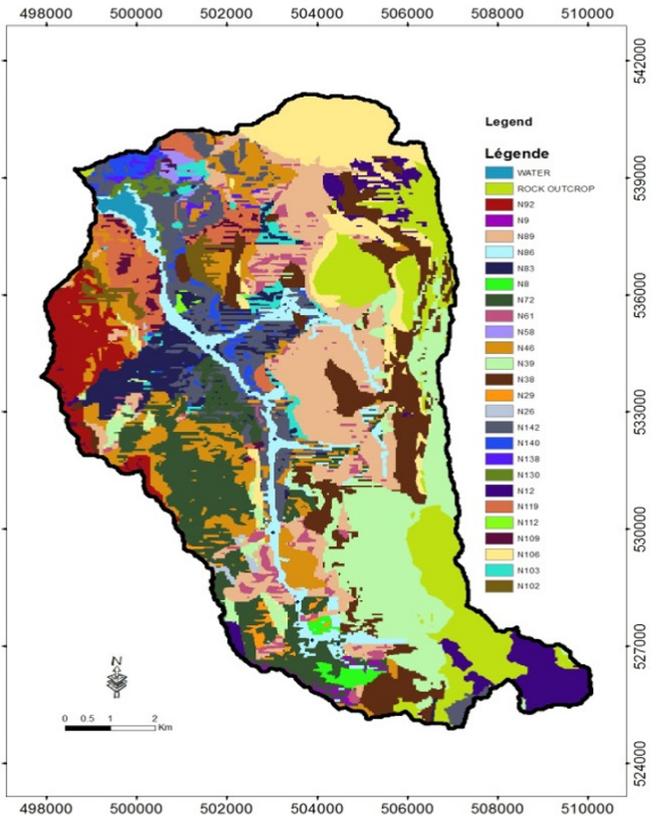


Figure 3: Carte des classes de sols

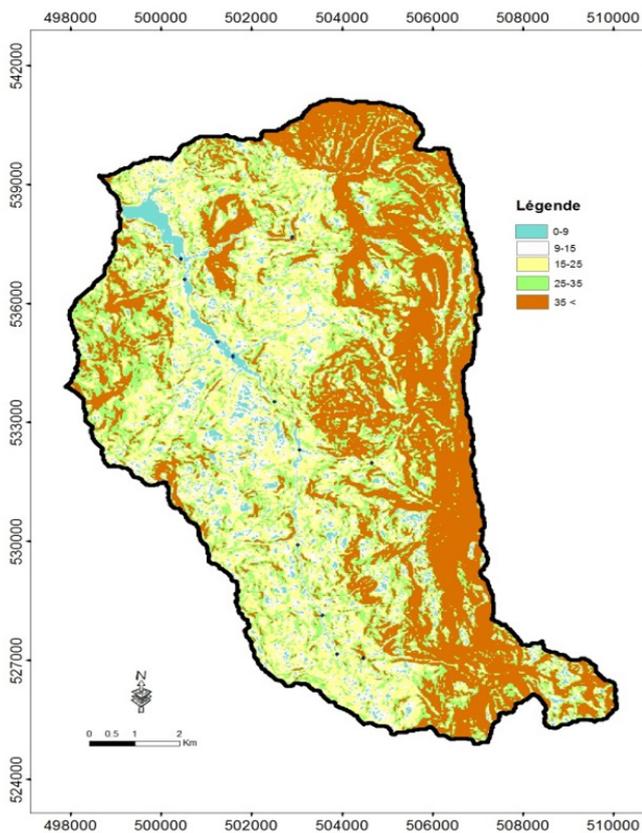


Figure 4: Carte de classe des pentes

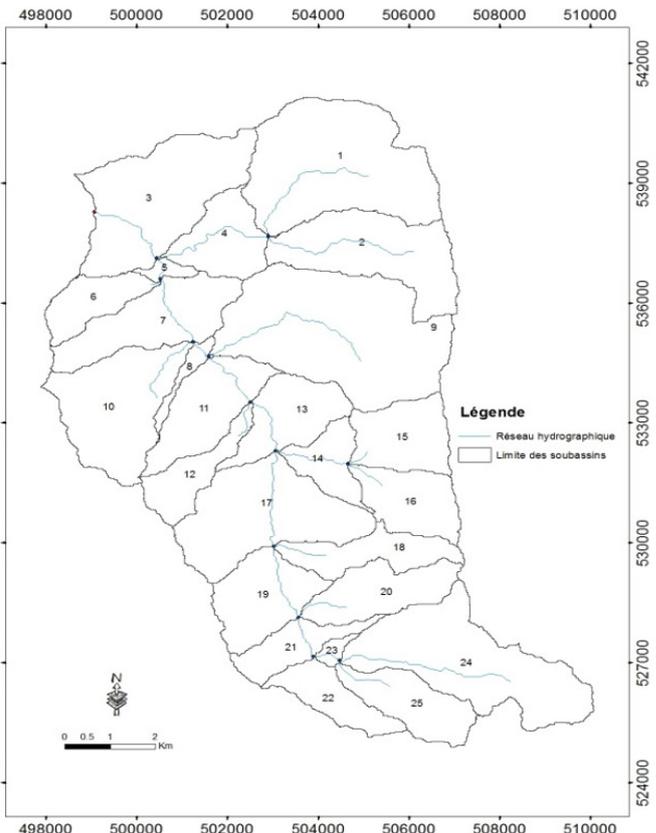


Figure 5: Carte des sous-bassins

et classe texturale à différentes profondeurs) à l'aide des fonctions de pédotransfert. Le facteur d'érodibilité des sols (USLE_K) est estimé par l'équation de Barril (1988) adopté par Ait Brahim *et al.* (2002). La conductivité hydraulique saturée SOL_K et la capacité de stockage du sol SOL_AWC sont estimées par les équations proposées par Wosten *et al.* (1999) et établies sur la base des données de sols HYPRES (Van Liew *et al.*, 2005).

La subdivision du bassin versant Nakhla en sous-bassins (Figure 5) et la génération du réseau de cours d'eau à partir de MNT (30 m) à une échelle de 1:50 000 ont été réalisées à l'aide d'Arc SWAT. Ce processus a été accompagné d'un prétraitement des cartes d'occupation du sol afin de faciliter leur superposition au MNT. En outre, l'occupation du sol et la carte pédologique ainsi que leurs tableaux de données respectifs préparés, ont été introduites dans le modèle en suivant le codage conventionnel de SWAT. Enfin, la carte des pentes (Figure 4) du bassin versant a été élaborée en adoptant cinq classes de pente à l'aide de l'interface du modèle existant. Les cartes d'occupation du sol, de pente et pédologique ont été superposées pour créer des URH ayant des conditions hydrologiques similaires.

Les variables climatiques requises par le modèle ont été obtenues auprès du Service National de Météorologie, Tanger-Maroc. Alors que les données de débits quotidiens moyens aux stations de jaugeage de Nakhla et Timezouk, les données de charges sédimentaires à la station de jaugeage Timezouk, les mesures de bathymétrie effectuées au niveau du barrage Nakhla ont été obtenues de l'Agence du Bassin Hydraulique du Loukkos pour une période de 30 ans (1980-2009).

Modélisation agro-hydrologique

Pré-calibration

La calibration est un processus réservé aux paramètres difficilement mesurables ou intrinsèquement hétérogènes ou incertains. Ce processus doit prendre en considération les incertitudes relatives aux entrées du modèle, les données observées et la structure du modèle.

Afin de minimiser ces incertitudes, la pré-calibration est indispensable. Cette étape consiste au choix des périodes de calage et de validation, du niveau de discrétisation, de la correction des entrées et la calibration du facteur C. L'obtention de valeurs satisfaisantes pour les indicateurs de performances au pas de temps annuel et mensuel, en plus d'une bonne reproduction du bilan hydrique du bassin versant, permettent de juger de la qualité de la pré-calibration.

Choix des périodes de calage et de validation

Trois périodes doivent être définies dans le processus de modélisation sous SWAT: une période de préchauffage du modèle, une deuxième pour la calibration et une troisième pour la validation. Des études antérieures (Kannan *et al.*, 2007; Van Liew *et al.*, 2003) recommandent d'inclure des événements humides avec pics de ruissellement durant la période de calibration. Quant à la validation du modèle, Reckhow (1994) annonce que ses conditions devraient être différentes et que les fonctions de forçage soient différentes des conditions de calibration. Une analyse de la variabilité du régime pluviométrique des séries annuelles, enregistrées au cours de la période 1980-1995 au niveau des stations Timezouk et Nakhla, a permis de choisir les

périodes de calibration et de validation qui permettent au modèle de réaliser de bonnes performances quelles que soient les conditions climatiques de l'année.

Choix du niveau de discrétisation

Subdiviser un bassin versant en sous-bassins et en unités homogènes (URH) à des fins de modélisation est indispensable. Cependant, adopter un grand nombre de sous-bassins et d'URH afin de reproduire la réalité du terrain, demande plus d'effort de préparation et de traitement des données. De même, une diminution du nombre de sous-bassins et d'URH pour réduire la taille du projet et le temps de traitement pourrait affecter les résultats de la simulation. Donc, une échelle appropriée de discrétisation devrait être identifiée pour simuler le comportement d'un bassin versant de manière efficace et adéquate.

Des études ont montré une sensibilité limitée du ruissellement annuel et des débits journaliers à différents niveaux de subdivision des bassins versants, mais une variabilité importante du rendement des sédiments annuel (Bingner *et al.*, 1997; FitzHugh and Mackay, 2000, 2001; Jha *et al.*, 2004; Tripathi *et al.*, 2006; Rouhani *et al.*, 2006; Chiang and Yuan, 2015; Momm *et al.*, 2017).

Dans le but de reproduire convenablement le fonctionnement hydrologique et d'évaluer correctement la production des sédiments, la discrétisation en sous bassins de 50, 100, 200, 300 et 400 ha a été testée, alors qu'à l'échelle d'URH, différents niveaux et combinaisons de simplification ont été étudiés (5, 10 et 20%).

La correction des entrées: Reproduction orographique gradient

La pluie reste la variable climatique fondamentale pour la reproduction du fonctionnement hydrologique d'un bassin versant. Le débit qui est la réponse dynamique du bassin versant aux précipitations est le résultat des effets combinés de nombreux processus hydrologiques (interception, infiltration, ruissellement, stockage ou saturation du sol et conditions initiales du bassin). Donc la réussite de la modélisation est, en grande partie, fonction de la disponibilité d'une représentation adéquate de la variabilité spatiale des précipitations à l'échelle du bassin. Cependant le réseau des stations de mesure est souvent restreint en altitude, voire absent. L'élévation est considérée comme l'une des variables importantes liées aux paramètres météorologiques (Zhang *et al.*, 2008) et contribue positivement à la genèse des pluies intenses. Dans le bassin versant de Nakhla, les deux stations disponibles se situent à une altitude de 210 m pour la station Nakhla et 290 m pour la station de Timezouk, attendu que 40% de la superficie du bassin est caractérisée par des altitudes entre 400 et 1800 m. Alors pour une prise en compte convenable des précipitations au niveau des sous-bassins en altitude, nous avons utilisé des stations virtuelles et les bandes d'altitude SWAT suivant les recommandations de Neitsch (2005).

$$R_{band} = R_{day} + (EL_{band} - EL_{gauge}) \cdot \left(\frac{ptaps}{days_{pcp, yr} \cdot 1000} \right) \quad \text{Quand } R_{day} > 0.01$$

Où R_{band} est la précipitation dans la bande d'élévation (mm), R_{day} est la précipitation enregistrée au pluviomètre (mm), EL_{band} est l'élévation moyenne à la bande d'élévation (m), EL_{gauge} est l'élévation à la jauge d'enregistrement (m), $ptaps$ est le taux de déchéance des précipitations (mm/km) et $days_{pcp, yr}$ est le nombre moyen de jours de précipitations dans le sous bassin en une année. Une fois que les valeurs

de précipitations sont déterminées pour chaque bande, une nouvelle précipitation moyenne du sous-bassin est calculée:

$$R_{day} = \sum_{band=1}^b R_{band} \cdot fr_{band}$$

Où R_{day} est la moyenne quotidienne des précipitations ajustée pour effets (mm), R_{band} est la précipitation tombant à chaque bande d'altitude, fr_{band} est la fraction de la surface du sous-bassin dans la bande d'élévation et b est le nombre total de bandes d'élévation dans le sous-bassin.

Calibration du facteur C

Le facteur d'occupation du sol C, reflétant l'action de la végétation sur le processus d'érosion, est le paramètre le plus déterminant et le plus dynamique dans les bassins versants marocains (Renard et Freimund, 1994). Une attention particulière est donc attribuée à l'adaptation de la base d'occupation du sol de SWAT aux conditions marocaines et plus particulièrement aux conditions du bassin versant Nakhla. Afin d'estimer les valeurs du facteur C pour les différentes occupations du sol présentent au niveau du bassin versant Nakhla on a opté pour l'utilisation de l'Indice de végétation TSAVI (Transform Soil Adjusted Vegetation Index). Chikhaoui (2005), a adopté cet indice pour l'étude du taux de recouvrement de la végétation dans le nord du Maroc et a obtenu des résultats satisfaisants, aussi Astaty (2013) a appliqué et validé cet indice au niveau de trois bassins du nord (Tlata, Nakhla et Saboun).

Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité adoptée est basée sur deux étapes. La première est une application de la méthode Latin Hypercube-One factor At a Time (LH-OAT) (Van Griensven *et al.*, 2006) permettant de déterminer les paramètres hydrologiques dominants et de réduire le nombre de paramètres à calibrer. C'est une méthode d'analyse de sensibilité globale avec une combinaison de la méthode d'échantillonnage LH (McKay *et al.*, 2000) et la méthode d'analyse de sensibilité OAT (Morris, 1991). Elle intègre les avantages de la méthode d'échantillonnage de LH et de l'analyse de sensibilité OAT, qui garantit que tous les paramètres soient échantillonnés dans les plages spécifiées. De plus, il pourrait clairement identifier les paramètres qui conduisent à des changements dans les résultats du modèle. La méthode fonctionne par boucle et chaque boucle commence par un point d'hypercube latin j autour duquel, la moyenne de l'indice de sensibilité pour chaque paramètre e_i , est calculée (en pourcentage) comme suit:

$$S_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N 100 \left(\frac{M[e_{1j}, \dots, e_{ij}(1+f_i), \dots, e_{pj}] - [e_{1j}, \dots, e_{ij}, \dots, e_{pj}]}{M[e_{1j}, \dots, e_{ij}(1+f_i), \dots, e_{pj}] + [e_{1j}, \dots, e_{ij}, \dots, e_{pj}]} \right) / f_i$$

Où $M()$ fait référence aux fonctions objectifs du modèle, f_i est la fraction par laquelle le paramètre e_i est changé (constante prédéfinie), et j est un point LH ($j \in [1, N]$).

La deuxième étape de l'analyse de sensibilité est effectuée à l'aide de SWAT_CUP (SWAT Calibration and Uncertainty Procedures) et de SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting ver. 2) SWAT-CUP permet de combiner les données spatiales et de processus avec la compréhension de l'utilisateur du bassin versant dans le processus de calibration.

Simultanément à l'analyse de sensibilité avec SWAT_Cup, nous avons également effectué une analyse d'incertitude. Les incertitudes du modèle conceptuel et de ses paramètres, ainsi que celles des données mesurées utilisées pour la calibration, affectent la qualité et la pertinence de la simulation. L'incertitude totale est estimée par le facteur P et le facteur R. Une valeur du facteur P proche de 1, signifie que toutes les observations sont incluses dans l'incertitude de prédiction. Une valeur $<1,5$ du facteur R est généralement souhaitable (Abbaspour *et al.*, 2007). Ces valeurs ont été calculées pour chacune des stations en utilisant les gammes finales des paramètres calibrés.

Calibration-validation

La calibration sous SWAT est une opération d'optimisation de sa capacité prédictive à travers la confrontation des prédictions aux mesures réelles. La validation permet en outre d'évaluer la robustesse du modèle à travers l'évaluation de sa performance avec les paramètres choisis lors du calage et sur une période avec des caractéristiques différentes de celles utilisées lors de la phase de calage (Tolson and Shoemaker, 2004).

Suite à l'analyse de sensibilité, les paramètres de classement ont été sélectionnés comme points de départ pour la calibration du modèle sur une base journalière, d'abord pour le débit des cours d'eau et ensuite pour la charge sédimentaire, comme suggéré par Neitsch *et al.* (2011). La charge de sédiments sortant de chaque URH et sous bassin est principalement régie par le débit et la vitesse. La calibration des sédiments crée un déséquilibre de la simulation des écoulements, raison pour laquelle nous avons opté pour une calibration simultanée d'écoulement et de sédiments.

La calibration du modèle est effectuée en modifiant la valeur d'un paramètre jusqu'à ce que la valeur prédite soit raisonnablement conforme à celle observée. La précision a été évaluée par le coefficient de Nash-Sutcliffe (NSE) et le coefficient de détermination (R^2) qui offrent une évaluation plus précise de l'efficacité du modèle quant au respect des volumes écoulés et des écarts absolus (Bioteau *et al.*, 2002).

Le coefficient de NSE (Eq.5) représente la partie de la variance expliquée par le modèle, le résidu étant la différence entre la valeur observée et la valeur simulée (Patoul, 2008). Il peut varier de $-\infty$ (ajustement très mauvais) à 1 (forte liaison entre les valeurs observées et simulées). Pour donner un ordre de grandeur, des valeurs dépassant 0,65 sont considérées comme admissibles et une valeur de 0,75 est satisfaisante (Thiebault, 2010). Le coefficient de détermination R^2 (Eq.6) détermine l'intensité ou la netteté de la relation qui existe entre deux séries d'observations. Son intervalle de prédiction s'étend de 0 à 1 pour un modèle parfait. Une valeur de R^2 supérieure à 0,5 traduirait une bonne concordance des données observées et simulées (Santhi *et al.*, 2001).

Une fois le modèle calibré à l'aide des données de débit et de charge sédimentaire pour la période 1980-1988, la précision a été évaluée pendant le processus de validation à l'aide d'une autre série de données couvrant la période 1989-1993 en appliquant les paramètres utilisés pour la calibration. Ainsi, à cette fin, le débit et la charge de sédiments mensuels simulés pour 1984-1989 ont été comparés aux données mensuelles de débit et de charge de sédiments observées pour la même période.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_s)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_m - \bar{Q}_m)^2} \quad (\text{Eq. 5})$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_m - \bar{Q}_m)(Q_s - \bar{Q}_s)]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_m - \bar{Q}_m)^2 \sum_{i=1}^n (Q_s - \bar{Q}_s)^2} \quad (\text{Eq. 6})$$

Où Q_m est le débit observé, est le débit simulé, est la moyenne des débits mesurés et est la moyenne des débits simulés.

Protocole expérimental proposée

Un seuil de discrétisation de 200 ha est adopté pour définir l'origine du réseau hydrographique. Un exutoire est imposé au niveau de la station de mesure Timezouk et un second au niveau de la retenue du barrage qui contrôle la rivière de Nakhla. Le bassin versant est subdivisé en 25 sous bassins (Figure 5). Ce niveau de discrétisation à l'échelle du sous bassin n'a pas d'effet significatif sur les débits et les taux de sédiments simulés, cependant la discrétisation à l'échelle de l'URH a un impact significatif surtout sur le taux de production de sédiment qui se traduit par une sous-estimation suite à l'agrégation des unités de pente et d'occupation du sol, d'où l'utilisation de l'ensemble des unités.

Afin d'optimiser la capacité prédictive du modèle SWAT au niveau du bassin versant Nakhla, plusieurs essais de calibration ont été engagés pour aboutir à la procédure de calibration de la figure 6, qui résume les étapes suivies et qui sont basées sur les recommandations du manuel d'utilisation SWAT (Neitsch *et al.*, 2011). La pluie, notamment, qui est la base de toutes les simulations doit être corrigée préalablement à l'étape de calibration afin d'éviter le forçage du modèle. Ainsi une étape de pré-calibration est proposée, celle-ci permet de minimiser l'incertitude des entrées et de s'assurer de leurs capacités à reproduire la réalité du terrain à travers la calibration du bilan hydrique qui prend en charge le volume d'écoulement global et sa distribution entre les composants hydrologiques. L'analyse du bilan hydrique et les performances de simulation annuelle et mensuelle acceptable ($NS > 0.5$ et $R^2 > 0.5$) permettent de valider la pré-calibration et d'entamer la calibration qui prend en charge les paramètres contrôlant le décalage dans le temps d'écoulement et la forme de l'hydrogramme de

crue. La calibration a concerné dans une première étape le débit et dans une deuxième étape le débit et les sédiments à un pas de temps journalier.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Résultats de la pré-calibration

Afin d'approuver la reproduction du gradient, nous nous sommes basés d'une part, sur la qualité de reproduction du bilan hydrique au niveau des stations de Nakhla et Timezouk, et d'autre part, sur la comparaison des séries pluvio-

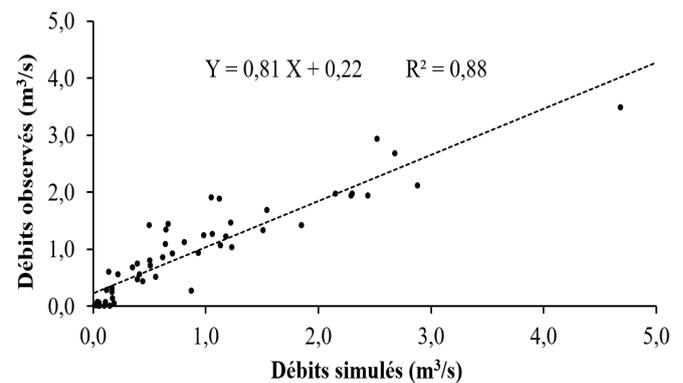


Figure 7: Comparaison du débit mensuel moyen simulé et mesuré au niveau de la station Timezouk (pré-calibration)

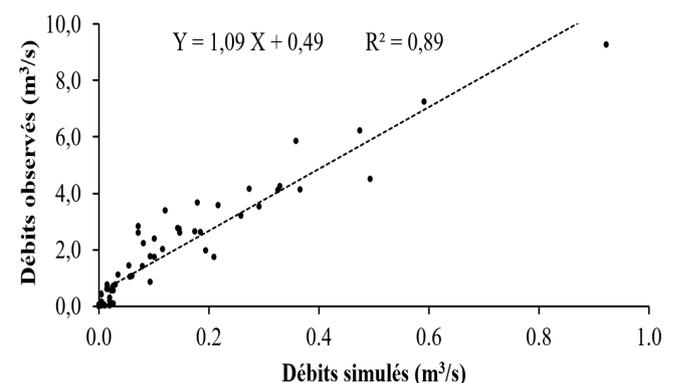


Figure 8: Comparaison du débit mensuel moyen simulé et mesuré au niveau de la station Nakhla (pré-calibration)

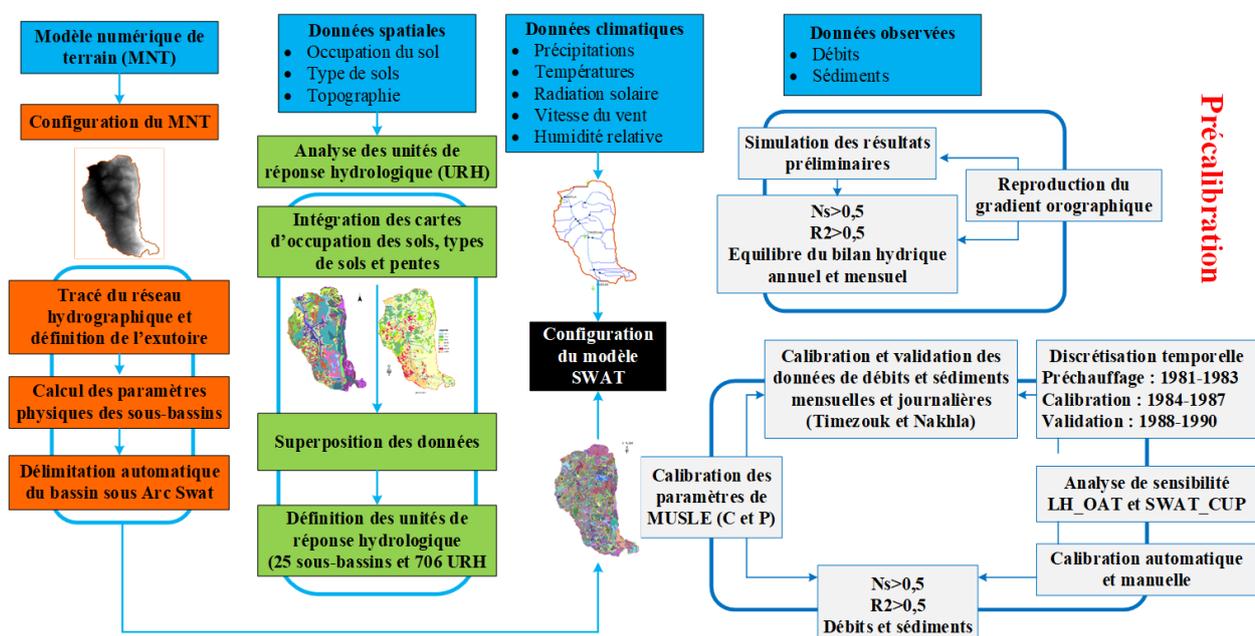


Figure 6: Méthodologie de calibration adoptée

métriques reproduites par SWAT au niveau des sous-bassins de haute altitude du bassin versant Nakhla avec celles au sein de la zone climatique homogène du bassin de Nakhla. L'analyse du bilan hydrique annuel (Tableau 1) sur les périodes (1984-1988) et (1989-1993) montre de faibles fluctuations d'une période à l'autre, liées principalement aux conditions climatiques. Ainsi, en moyenne 70 % des pluies reçues par le bassin versant Nakhla alimentent les cours d'eau, dont environ 30% d'écoulement direct et 40% d'infiltration et percolation transitent par les horizons du sol pour rejoindre les cours d'eau. Le reste des pluies (environ 30%) retournent à l'atmosphère par évapotranspiration.

L'analyse des débits simulés au pas de temps journalier montre que l'utilisation des stations virtuelles combinée aux bandes d'altitude SWAT a permis une estimation adéquate du débit. En effet le débit moyen journalier mesuré au niveau de la station Timezouk au cours de la période de calibration est de 0.86 m³/s pour un débit moyen simulé de 0,85 m³/s. Les débits moyens mesurés et simulés sont respectivement de 1.13 et 1.11 m³/s pour la période de validation.

Résultats de l'analyse de sensibilité, de la calibration et de la validation

L'analyse de sensibilité par la méthode Latin Hypercube-One factor At a Time a mis en relief la sensibilité de 21 paramètres (GW_DELAY.gw, LAT_TTIME.hru, CH_K1.sub, CH_K2.rte, ALPHA_BNK.rte, RCHRG_DP.gw, ESCO.hru, CH_N2.rte, SURLAG.bsn, ALPHA_BF.gw, CH_N1.sub, GW_REVAP.gw, GWQMN.gw, REVAPMN.gw, EPCO.hru, CH_COV1.rte, CH_ERODMO.rte, SPCON.bsn, SPEXP.bsn, PRF-BSN, ADJ_PKR). L'ensemble des paramètres ont fait l'objet d'une analyse de sensibilité par l'outil SWAT_Cup. Après plusieurs tests, seuls 11 paramètres, dont huit contrôlent les délais de transfert des écoulements et trois agissent sur les taux de production de sédiments, ont été retenus pour la calibration du modèle SWAT à l'échelle du bassin versant Nakhla.

L'application des nouvelles valeurs des paramètres (Tableau 2) sensibles pour le débit et la charge sédimentaire au niveau du bassin versant de Nakhla, a permis d'aboutir à des simulations à une échelle de temps mensuelle et journalière (Tableau 3) de qualité «très bonne» (Moriassi

Tableau 1: Analyse des composantes hydrologiques générées par le modèle SWAT

Composantes du bilan hydrique	Période de calibration (1984-1988)	Période de calibration (1989-1993)
Précipitation (mm)	720	820
Ruissellement (mm)	180	240
Infiltration (mm)	161	179
Percolation (mm)	179	186
Evapotranspiration réelle (mm)	200	215
Evapotranspiration potentielle (mm)	685	708

Tableau 2: Analyse de sensibilité réalisée par SWAT_Cup

Paramètre	Définition	Intervalle ^a	Valeur adoptée ^b
V_LAT_TTIME.hru	Temps de parcours des écoulements latéraux (jours)	0-100	12,9
V_CH_K1.sub	Conductivité hydraulique effective dans l'alluvion du canal tributaire (mm/h)	130-300	287,93045
V_CH_K2.rte	Conductivité hydraulique effective dans l'alluvion du canal principal (mm/h)	71,53-120	97,236305
V_ALPHA_BNK.rte	Coefficient de tarissement dans les berges des cours d'eau	0,33-0,92	0,686766
V_CH_N2.rte	Coefficient de Manning « n » du canal principal	0,052-0,13	0,056201
V_SURLAG.bsn	Coefficient de délai de ruissellement	0-24	19,896
V_ALPHA_BF.gw	Constante de récession de l'écoulement de base souterrain	0,45-1	0,602973
V_CH_N1.sub	Coefficient de Manning des chenaux secondaires	11-30	28,900059
r_SPCON.bsn	Paramètre linéaire de réentraînement pour l'acheminement des sédiments dans le canal	0-1	0,004
r_SPEXP.bsn	Exposant de la formule de réentraînement pour le canal acheminement des sédiments	0,0001-0,01	1
PRF-BSN	Facteur d'ajustement de la vitesse de pointe pour l'acheminement des sédiments dans le canal principal	1-2	0,41

a: Intervalle adopté pour l'analyse de sensibilité, b: Valeur adoptée pour la calibration, (.rte): fichier qui englobe les paramètres représentant les caractéristiques physiques du cours d'eau, (.gw): fichier qui englobe les paramètres représentant les caractéristiques de la nappe, (.bsn): fichier qui définit les attributs généraux du bassin.

Tableau 3: Fonctions objectives pour la calibration et la validation hydrologique

Fonction objective	Calibration		Validation	
	Timezouk	Nakhla	Timezouk	Nakhla
NS Mensuel	0,92	0,73	0,91	0,81
NS Journalier	0,82	0,78	0,83	0,75
R ² Mensuel	0,80	0,80	0,80	0,70
R ² Journalier	0,80	0,80	0,80	0,70

et al., 2007). Les indicateurs de performance du modèle SWAT pour le bassin versant Nakhla affichent une valeur de 0,8 pour le coefficient de détermination au niveau des stations Timezouk et Nakhla pour la période de calibration (1984-1988). Ces indicateurs montrent des coefficients de détermination respectifs de 0,8 et 0,7 au niveau des stations Timezouk et Nakhla pour la période de validation (1989-1993). Les valeurs de l'indicateur NSE affichent successivement 0,82 et 0,78 au niveau des stations Timezouk et Nakhla pour la période de calibration (1984-1988) et 0,83 et 0,75 pour la période de validation (1989-1993).

DISCUSSION

Le but ultime de la calibration d'un modèle de bassin versant devrait être d'incorporer des processus spatiaux dans les techniques de calibration (Arnold et al., 2012). Le fait que SWAT soit fondé sur une approche à base physique à l'échelle de l'URH, permet d'évaluer spatialement les dynamiques de l'eau et des sédiments en fonction des caractéristiques des sols et du couvert végétal. Pour la période 1984-1988 (Figure 11), la moyenne des pertes en sol à l'échelle du bassin est de 11,25 t.ha⁻¹.an⁻¹ avec une

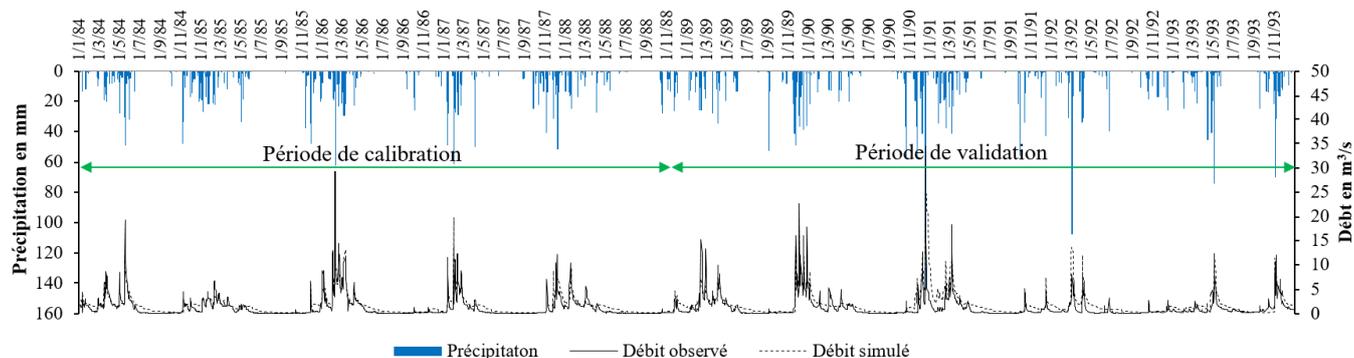


Figure 9: Comparaison des débits journaliers observés et simulés (station Nakhla)

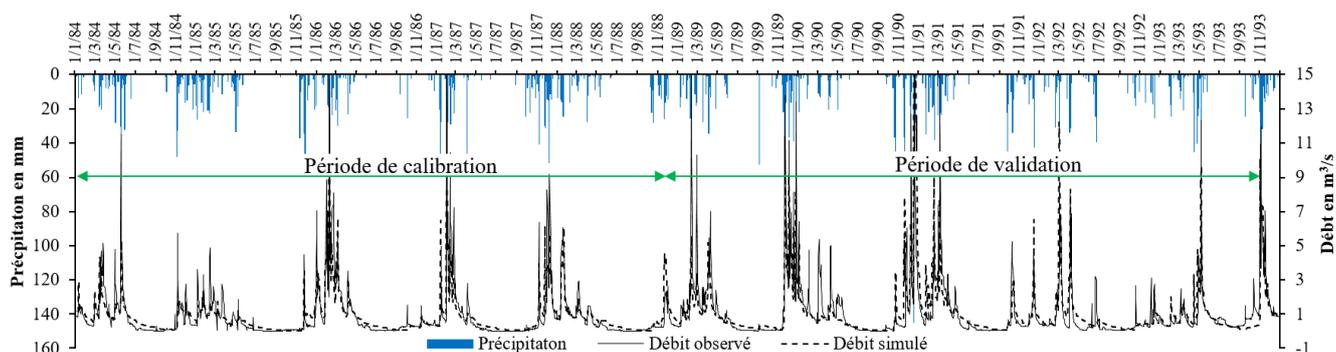


Figure 10: Comparaison des débits journaliers observés et simulés (station Timezouk)

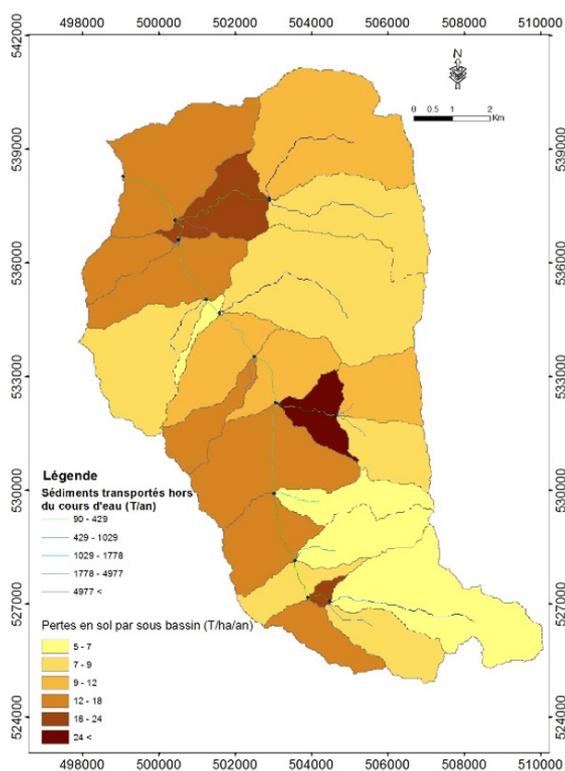


Figure 11: Estimation des pertes en sol (T/ha/an) par sous-bassin et des flux de sédiments transportés (T/an) hors des cours d'eau (1984-1988)

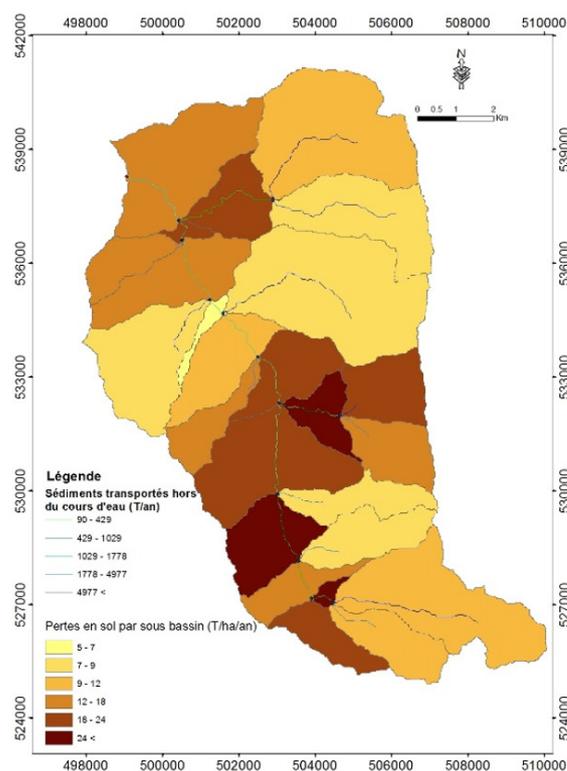


Figure 12: Estimation des pertes en sol (T/ha/an) par sous-bassin et des flux de sédiments transportés (T/an) hors des cours d'eau (1989-1993)

variation de 5 t/ha à 37 t.ha⁻¹.an⁻¹, contre 13,4 t.ha⁻¹.an⁻¹ pour la période 1989-1993 (Figure 12). Les relevés bathymétriques pour la période de 1979-1987 arrivent à une dégradation spécifique de 3,9 t.ha⁻¹.an⁻¹, alors que ceux pour la période de 1988-1993 donnent une dégradation spécifique de 28,3 t.ha⁻¹.an⁻¹. La variation des taux de pertes en sol entre les périodes 1984-1988 et 1989-1993 s'accorde avec les mesures des campagnes bathymétriques, mais avec des ordres de grandeur différents. Certes la bathymétrie demeure la meilleure méthode pour estimer la quantité réelle de sédiments au niveau d'un barrage à une date donnée. Cependant la quantité de sédiments qui arrive au réservoir dépend de plusieurs facteurs, notamment les averses et les lâchés, ce qui justifie en grande partie les différences de grandeur constatées.

L'analyse des résultats à l'échelle du sous-bassin montre une sous-estimation des pertes en sol. En effet, les pertes en sol oscillent de 0 t.ha⁻¹.an⁻¹ à 260 t.ha⁻¹.an⁻¹ pendant la période 1984-1988 (Figure 13). La moyenne de production de sédiments par URH est de 12,5 t.ha⁻¹.an⁻¹. Il faut noter qu'environ 12 % de la superficie du bassin produit plus que 30 t.ha⁻¹.an⁻¹ de sédiments. Alors que pour la période 1989-1993 (Figure 14), la moyenne de production de sédiments par URH est de 15,7 t.ha⁻¹.an⁻¹. Aussi environ 13,5 % de la superficie du bassin produit plus que 30 t.ha⁻¹.an⁻¹ de sédiments. Cette perte en sol peut atteindre 275 et 437 t.ha⁻¹.an⁻¹ au cours des périodes 1984-1993 et 1988-1993, au niveau des parcelles combinant une pente forte, un sol friable et une occupation avec les céréales ou même matorral. L'effet conjugué du couvert végétal faible et de la topographie accidentée rend les sols plus sensibles à l'érosion au niveau des parcelles à pente forte. En revanche l'augmentation des taux de pertes en sol remarqués entre les deux périodes (calibration et validation) met en relief l'effet du climat via le facteur de l'érosivité des pluies.

En raison de l'importance du barrage Nakhla dans l'approvisionnement en eau potable de la ville de Tétouan et de la vitesse de son envasement, plusieurs études ont essayé d'évaluer l'ampleur du phénomène (Aït Brahim *et al.*, 2003; Damnati *et al.*, 2013), les sources de sédiments (Moukhchane *et al.*, 1998) et la répartition spatiale de l'érosion (Naimi *et al.*, 2005). La perte en sol au niveau du champ atteint en moyenne 65 t.ha⁻¹.an⁻¹ selon Naimi *et al.* (2005) et 38,7 t.ha⁻¹.an⁻¹ d'après Ait Brahim *et al.* (2003).

L'utilisation de radioéléments présents dans le sol par Damnati *et al.* (2013), a permis de conclure que les taux d'érosion moyens obtenus en utilisant 137Cs avec les modèles MB1 et MB2 et 210Pbex sont respectivement de 33,1 t.ha⁻¹.an⁻¹, 41,3 t.ha⁻¹.an⁻¹ et 20 t.ha⁻¹.an⁻¹. Moustakim *et al.* (2019), en utilisant l'excès de plomb 210a, a indiqué un taux de 27 t.ha⁻¹.an⁻¹, alors qu'en utilisant le Césium 137, les taux de perte en sol ont variés de 36 t.ha⁻¹.an⁻¹ à 29 t.ha⁻¹.an⁻¹ pour les deux périodes (1954-2002 et 1954-2017)

Les résultats de l'application de radioéléments présents dans le sol varient selon le modèle, le traceur utilisé, le transect et la position des différents points du transect, considérés homogènes en conséquence de l'hétérogénéité intrinsèque de l'environnement, comme les propriétés du sol (densité, teneur en argile, macropores, etc.), végétation (agissant sur l'interception des pluies), micromorphologie du sol, racines des plantes, perturbations par les humains et les animaux (Damnati *et al.*, 2013).

De ce fait, la généralisation des résultats obtenus au niveau d'un transect aux caractéristiques spécifiques pour la totalité d'un bassin versant reste une des limites des méthodes de mesure directe de perte en sol, notamment avec les radioéléments, les parcelles expérimentales et la bathymétrie.

Ainsi pour faire face aux conditions limites de ces techniques, les modèles agro-hydrologiques demeurent un

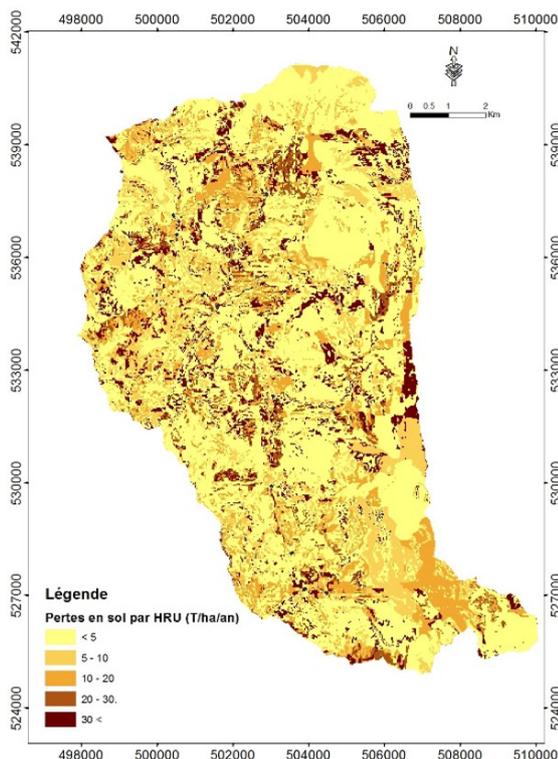


Figure 13: Estimation des pertes en sol (T/ha/an) par URH (1984-1988)

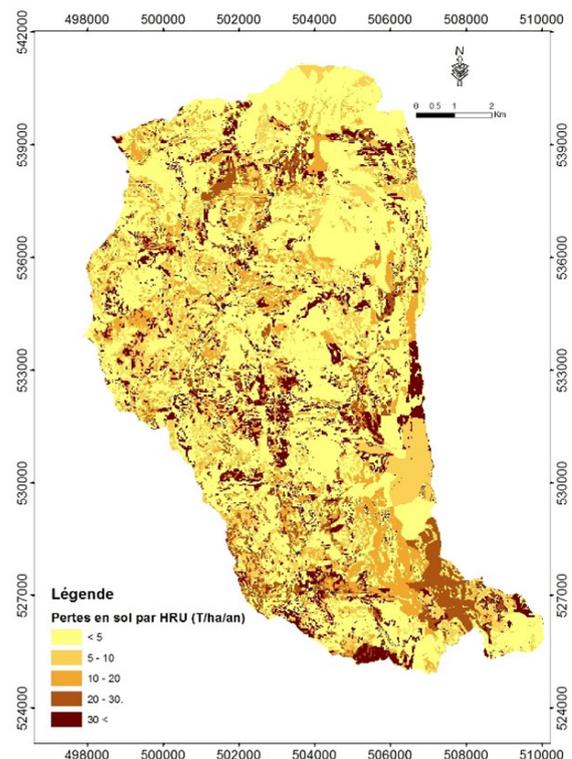


Figure 14: Estimation des pertes en sol (T/ha/an) par URH (1989-1993)

outil performant pour l'évaluation et la quantification spatiotemporelle de la variabilité des taux de perte en sol. Le modèle SWAT a prouvé sa robustesse en matière de reproduction du fonctionnement hydrologique et des taux de perte en sol en utilisant le modèle MUSLE (Williams, 1975). Certes s'investir davantage pour acquérir les mesures directes, permettra d'améliorer la qualité de la calibration et par la suite la qualité des résultats obtenus par modélisation.

CONCLUSION

Dans cette recherche, le modèle SWAT est mis en œuvre pour la période 1980-1993 à travers une pré-calibration annuelle, mensuelle et une calibration journalière au niveau des sites Timezouk et Nakhla dans le bassin versant Nakhla. La comparaison graphique des débits observés et simulés pendant la période de calage et de validation a permis de mettre en relief la capacité du modèle à reproduire de manière satisfaisante les séries de débits à l'échelle mensuelle et journalière grâce à l'application d'une procédure de calage qui a permis une meilleure reproduction de la relation pluie-altitude. La procédure de calibration s'est focalisée sur le choix judicieux du niveau de discrétisation à l'échelle du sous-bassin et surtout à l'échelle d'URH, des périodes de calibration et de validation, de la reproduction adéquate de la pluviométrie et du facteur C et une analyse de sensibilité performante. Le protocole adopté a permis d'adapter le modèle SWAT aux conditions du bassin pour une meilleure reproduction du fonctionnement hydrologique et une estimation des pertes en sol satisfaisante à travers le temps et l'espace permettant de concevoir des scénarios de préservation du bassin versant adaptés pour chaque HRU et par conséquent, une meilleure gestion et préservation de la capacité de stockage du barrage.

La technique de modélisation et de simulation des bassins versants est reconnue comme un outil essentiel à la planification de la gestion durable des bassins versants grâce à une allocation rapide et rentable des ressources et la mise en œuvre de pratiques de conservation du sol. La qualité et l'applicabilité de la modélisation dépendent de la représentation et de la description précise des processus physiques. Cela commence avec une caractérisation adéquate des propriétés du bassin versant et une procédure de calibration performante adaptée aux conditions du milieu étudié.

RÉFÉRENCES

- Abbaspour, K.C., Vejdani, M., Haghghat, S., Yang, J. (2007). SWAT-CUP: calibration and uncertainty programs for SWAT. In: Oxley, L. and Kulasiri, D. Eds., MODSIM 2007 International Congress on Modelling and Simulation, Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, 1596-1602.
- Abdelwahab, O.M.M., Ricci, G.F., De Girolamo, A.M., Gentile, F. (2018). Modelling soil erosion in a Mediterranean watershed: Comparison between SWAT and AnnAGNPS models. *Environ. Res.*, 166: 363-376.
- Ait Brahim, L., Sossey Alaoui, F., Siteri, H., El Hamdouni, I., Tahiri, M., Baghdad, B. (2002). Prise en compte des glissements de terrain dans la quantification des pertes en sols dans le bassin versant Nakhla. *Bulletin du Réseau d'Érosion*, 21: 50-64.
- Aït Brahim, L., Alaoui, F. S., Siteri, H., Tahri, M. (2003). Quantification des pertes en sols dans le bassin-versant Nakhla (Rif septentrional). *Science et changements planétaires / Sécheresse*, 14: 101-106.
- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., Williams, J. R. (1998). Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I: Model Development. JAWRA. *Journal of the American Water Resources Association*, 34: 73-89.
- Arnold, J.G., Moriasi, D.N., Gassman, P.W., Abbaspour, K.C., White, M.J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R. D., Van Griensven, A., Van Liew, M. W. (2012). SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55: 1491-1508.
- Arsenault, R. (2015). Équifinalité, incertitude et procédures multi-modèle en prévision hydrologique aux sites non-jaugés. Thèse de doctorat électronique, École de technologie supérieure, Montréal. <https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/1488/>
- Astati, S. (2013). Développement d'une approche d'extraction du facteur C-RUSLE de l'imagerie satellitaire. Projet de fin d'études, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc. 120p.
- Baffaut, C., Sadeghi, A. (2010). Bacteria Modeling with SWAT for Assessment and Remediation Studies: A Review. *Transactions of the ASABE*, 53: 1585-1594.
- Barril, P. (1988). Notes de cours choisies sur l'érosivité des pluies (à l'INAT) Lausanne: Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Institut du Génie Rural.
- Benzougagh, B., Meshram, S. G., Baamar, B., Dridri, A., Boudad, L., Sadkaoui, D., Mimich, K. (2020). Relationship between landslide and morpho-structural analysis: A case study in Northeast of Morocco. *Applied Water Science*, 10: 1-10.
- Beven, K. (2019). Validation and Equifinality, Chapter 32. In C. Beisbart, N. J. Saam (Eds.), Computer simulation validation - fundamental concepts, methodological frameworks, and philosophical perspectives (pp. 791-809). Cham: Springer.
- Bingner, R.L., Garbrecht, J., Arnold, J.G., Srinivasan, R. (1997). Effect of watershed subdivision on simulation runoff and fine sediment yield. *Transactions of the ASAE*, 40:1329-1335.
- Bioteau, T., Bordenave, P., Laurent, F., Ruelland, D. (2002). Evaluation des risques de pollution diffuse par l'azote d'origine agricole à l'échelle de bassins versants : Intérêts d'une approche par modélisation avec SWAT. *Ingénieries eau-agriculture-territoires*, 32: 3-12.
- Biru, Z., Kumar, D. (2018). Calibration and validation of SWAT model using stream flow and sediment load for Mojo watershed, Ethiopia. *Sustainable Water Resources Management*, 4: 937-949.
- Boyle, D.P., Gupta, H.V., Sorooshian, S. (2000). Toward improved calibration of hydrologic models: Combining the strengths of manual and automatic methods. *Water Resources Research*, 36: 3663-3674.
- Chiang, L.C., Yuan, Y. (2015). The NHDPlus dataset, watershed subdivision and SWAT model performance. *Hydrological Sciences Journal*, 60: 1690-1708.
- Crain, A.S., Martin, G.R. (2009). Concentrations, and Estimated Loads and Yields of Total Nitrogen and Total Phosphorus at Selected Stations in Kentucky, 1979-2004. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2009-5240, 48p.
- Damnati, B., Ibrahim, S., Radakovitch, O. (2013). Quantifying erosion using ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb in cultivated soils in three Mediterranean watershed: Synthesis study from El Hachef, Raouz and Nakhla (North West Morocco). *Journal of African Earth Sciences*, 79: 50-57.
- Demarty, J., Otlé, C., Braud, I., Olioso, A., Frangi, J.P., Gupta, H.V., Bastidas, L.A. (2005). Constraining a physically based soil-vegetation-atmosphere transfer model with surface water content and thermal infrared brightness temperature measurements using a multi-objective approach. *Water Resources Research, American Geophysical Union*, 41: 1-15.
- Duchemin, M., Lachance, M., Morin, G., Lagacé, R. (2001). Approche géomatique pour simuler l'érosion hydrique et le transport des sédiments à l'échelle des petits bassins versants. *Water Quality Research Journal*, 36: 435-473.
- El Boukhari, A., Chikhaoui, M., Mharzi-Alaoui, H., Naimi, M. (2020). Analysis of the Silting Rate in the "Hachef" Dam Situated in Northern Morocco in the Context of Global Change. *Journal of Geographic Information System*, 12: 112-124.

- FitzHugh, T.W., Mackay, D.S. (2000). Impacts of input parameter spatial aggregation on an agricultural nonpoint source pollution model. *Journal of Hydrology*, 236: 35-53.
- FitzHugh, T.W., Mackay, D.S. (2001). Impact of subwatershed partitioning on modeled source-and transport-limited sediment yields in an agricultural nonpoint source pollution model. *Journal of Soil and Water Conservation*, 56: 137-143.
- Gao, X., Chen, X., Biggs, T.W., Yao, H. (2018). Separating Wet and Dry Years to Improve Calibration of SWAT in Barrett Watershed, Southern California. *Water*, 10: 274.
- Gatien, P. (2014). Étude d'un ensemble multi-modèle multi-calibration pour la détermination de l'ensemble optimal pour la prévision hydrologique. Mémoire de maîtrise électronique, École de technologie supérieure, Montréal.
- Gupta, H.V., Sorooshian, S., Yapo, P.O. (1999). Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 4: 135-143.
- Jha, M., Gassman, P.W., Secchi, S., Gu, R., Arnold, J. (2004). Effect of Watershed Subdivision on Swat Flow, Sediment, and Nutrient Predictions. *Journal of the American Water Resources Association*, 40: 811-825.
- Kannan, N., White, S., Worrall, F., Whelan, M. (2007). Sensitivity analysis and identification of the best evapotranspiration and runoff options for hydrological modelling in SWAT-2000. *Journal of Hydrology*, 332: 456-466.
- Larabi, S. (2017). Nouvelles approches de calibration automatique appliquées à un modèle hydrologique conceptuel semi-distribué. Thèse de doctorat (PhD) en sciences de l'eau. Université du Québec, Canada.
- Laurent, F., Ruelland, D., 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*, 20: 395-408.
- Legates, D.R., McCabe Jr., G.J. (1999). Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water resources research*, 35: 233-241.
- Lobligeois, F. (2014). Mieux connaître la distribution spatiale des pluies améliore-t-elle la modélisation des crues. Diagnostic sur 181 bassins versants français. Thèse de doctorat, AgroParisTech. Unité de recherche Hydrosystèmes et Bioprocédés (Irstea). 312 pp.
- Mathevet, T., Perret, C., Garçon, R., Periers, P., Goutx, D., Gibey, J.M., Oudin, R., Xhaard, H., Roy, J.L. (2010). Modèles de prévision et prise de décision pour le soutien d'étiage de la Loire. *La Houille Blanche*, 5: 40-51.
- McKay, M.D., Beckman, R.J., Conover, W.J. (2000). A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. *Technometrics*, 42: 55-61.
- Momm, H.G., Bingner, R.L., Emilaire, R., Garbrecht, J., Wells, R.R., Kuhnle, R.A. (2017). Automated watershed subdivision for simulations using multi-objective optimization. *Hydrological Sciences Journal*, 62: 1564-1582.
- Morris, M.D. (1991). Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments. *Technometrics*, 33: 161-174.
- Moukhchane, M., Bouhlassa, S., Chalouan, A. (1998). Approche cartographique et magnétique pour l'identification des sources de sédiments: Cas du bassin versant Nakhla (Rif, Maroc). *Sécheresse*, 9: 227-232.
- Moustakim, M., Benmansour, M., Zouagui, A., Nouira, A., Benkaddad, A., Dammati, B. (2019). Use of caesium-137 re-sampling and excess lead-210 techniques to assess changes in soil redistribution rates within an agricultural field in Nakhla watershed. *Journal of African Earth Sciences*, 156: 158-167.
- Moriasi, N.D., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., Veith, T.L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50: 885-900.
- Naimi, M., Tayaa, M., Ouzizi, S. (2005). Cartographie des formes d'érosion dans le bassin-versant de Nakhla (Rif occidental, Maroc). *Sécheresse*, 16: 79-82.
- Naimi, M., Tayaa, M., Ouzizi, S., Choukra-Ilha, R., Kerby, M. (2003). Dynamique de l'érosion par ravinement dans un bassin-versant du Rif occidental au Maroc. *Science et changements planétaires / Sécheresse*, 14: 95-100.
- Neitsch, S.L. (2005). Differences between SWAT2000 and SWAT2005. Temple, Tex.: USDA-ARS Grassland, Soil and Water Research Laboratory.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R. (2011). Soil and water assessment tool. Theoretical documentation version 2009. Texas Water Resources Institute Report No. 406. Texas A&M University System, College Station, Texas.
- Patoul, C. (2008). Allocation, Modélisation et valorisation des ressources en eau du bassin versant de la rivière Tolomosa (Bolivie). Dissertation de docteur en sciences agronomiques et ingénierie biologique, 409p. <http://bictel-fusagx.ulg.ac.be>.
- Reckhow, K. (1994). Water Quality Simulation Modeling and Uncertainty Analysis for Risk Assessment and Decision Making. *Ecological Modelling*, 72: 1-20.
- Renard, K.G., Freimund, J.R. (1994). Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. *Journal of hydrology*, 157: 287-306.
- Rollo, N., Levesque, G., Chauveau, E., Robin, M. (2008). Mise en œuvre du modèle agro-hydrologique SWAT sur la partie amont du bassin versant du Loc'h: Vers une modélisation des transferts de nutriments. *Les Cahiers Nantais*, 1: 17-26.
- Rouhani, H., Feyen, J., Willems, P. (2006). Impact of watershed delineations on the SWAT runoff prediction: A case study in the Grote Nete catchment, Flanders, Belgium. Proceedings of the 2006 IASME/WSEAS Int. Conf. on Water Resources, Hydraulics & Hydrology, Chalkida, Greece, May 11-13, 2006 (pp 36-41).
- Runkel, R.L., Crawford, C.G., Cohn, T.A. (2004). Load Estimator (LOADEST): A FORTRAN program for estimating constituent loads in streams and rivers. U.S. Geological Survey Techniques and Methods Book 4, Chapter A5, 69 p.
- Santhi, C.J.G., Arnold, J.G., Williams, J.R., Dugas, W.A., Srinivasan, R., Hauck, L.M. (2001). Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint Sources. *Journal of the American Water Resources Association*, 37: 1169-1188.
- Schmidt-Lainé, C., Pave, A. (2002). Environnement: Modélisation et modèles pour comprendre, agir ou décider dans un contexte interdisciplinaire. *Nature Sciences Sociétés*, 10: 5-25.
- Seyler, F., Albergel, J., Bonnet, M.P., Cohard, J.M., Cretaux, J.F., Demarty, J., Descroix, L., Favreau, G., Frappart, B., Gosset, M. (2018). L'Hydrologie à l'IRD. Département DISCO «Dynamiques Interne et de Surface des Continents», IRD.
- Sun, Y. (2013). A heteroskedasticity and autocorrelation robust F test using an orthonormal series variance estimator. *Econometrics Journal, Royal Economic Society*, 16: 1-26.
- Thiebault, M. (2010). Modélisation hydrologique d'un scénario de changement climatique sur le bassin versant du Bani avec SWAT. Mémoire d'ingénieur, Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg, France.
- Tolson, B.A., Shoemaker, C.A. (2004). Watershed modeling of the Cannonsville basin using SWAT2000: Model development, calibration, and validation for the prediction of flow, sediment, and phosphorus transport to the Cannonsville Reservoir. Version 1.0. Technical Report, School of Civil and Environmental Engineering, Cornell University. 159 pp.
- Tripathi, M.P., Raghuvanshi, N.S., Rao, G.P. (2006). Effect of watershed subdivision on simulation of water balance components. *Hydrological Processes*, 20: 1137-1156.
- Van Griensven, A., Meixner, T., Grunwald, S., Bishop, T., Diluzio, M., Srinivasan, R. (2006). A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. *Journal of Hydrology*, 324: 10-23.
- Van Liew, M., Arnold, J.G., and Garbrecht, J.D. (2003). Hydrologic simulation on agricultural watersheds: Choosing between two models. *Transactions of the ASAE*, 46: 1539-1551.
- Van Liew, M.W., Arnold, J.G., Bosch, D. (2005). Problems and potential of autocalibrating a hydrologic model. *Transactions of the ASAE*, 48: 1025-1040.

- Wanders, N., Bierkens, M.F.P., de Jong, S.M., de Roo, A., Karsen-berg, D. (2014). The benefits of using remotely sensed soil moisture in parameter identification of large-scale hydrological models. *Water Resources Research*, 50: 6874-6891.
- Wang, Y., Jiang, R., Xie, J., Zhao, Y., Yan, D., Yang, S. (2019). Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Model: A Systemic Review. *Journal of Coastal Research*, 93: 22-30.
- Battaglin, W.A., Aulenbach B.T., Vecchia A., Buxton, H.T. (2010). Changes in streamflow and the flux of nutrients in the Mississippi-Atchafalaya River Basin, USA, 1980-2007. Scientific Investigations Report 2009-5164. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia. <https://pubs.usgs.gov/sir/2009/5164/pdf/SIR09-5164.pdf>
- Williams, J.R. (1975). Sediment Routing for Agricultural Watersheds. *Journal of the American Water Resources Association*, 11: 965-974.
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D. (1978). Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning. The USDA Agricultural Handbook No. 537, Maryland.
- Wösten, J.H.M., Lilly, A., Nemes, A., Le Bas, C. (1999). Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma*, 90: 169-185.
- Yang, J., Reichert, P., Abbaspour, K.C., Xia, J., Yang, H. (2008). Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China. *Journal of Hydrology*, 358: 1-23.
- Zhang, D., Lin, B., Wu, J., Lin, Q. (2021). GP-SWAT (v1.0): A two-layer graph-based parallel simulation framework for the SWAT model. *Geoscientific Model Development*, 14: 5915-5925.
- Zhang, X., Srinivasan, R., Debele, B., Hao, F. (2008). Runoff simulation of the headwaters of the yellow river using The SWAT model with three snowmelt algorithms 1. *Journal of the American Water Resources Association*, 44: 48-61.