

Higher National School of Hydraulic

The Library

Digital Repository of ENSH



المدرسة الوطنية العليا للري

المكتبة

المستودع الرقمي للمدرسة العليا للري



The title (العنوان):

Gestion du bassin versant du Haut Cheliff a l'aide de (SWAT) .

The paper document Shelf mark (الشفرة) : 6-0027-18

APA Citation (APA توثيق):

Mecheri, Fakhreddine (2019). Gestion du bassin versant du Haut Cheliff a l'aide de (SWAT)[Thèse de master, ENSH].

The digital repository of the Higher National School for Hydraulics "Digital Repository of ENSH" is a platform for valuing the scientific production of the school's teachers and researchers.

Digital Repository of ENSH aims to limit scientific production, whether published or unpublished (theses, pedagogical publications, periodical articles, books...) and broadcasting it online.

Digital Repository of ENSH is built on the open DSpace software platform and is managed by the Library of the National Higher School for Hydraulics. <http://dspace.ensh.dz/jspui/>

المستودع الرقمي للمدرسة الوطنية العليا للري هو منصة خاصة بتقييم الإنتاج العلمي لأساتذة و باحثي المدرسة.

يهدف المستودع الرقمي للمدرسة إلى حصر الإنتاج العلمي سواء كان منشورا أو غير منشور (أطروحات، مطبوعات بيداغوجية، مقالات الدوريات، كتب....) و بنه على الخط.

المستودع الرقمي للمدرسة مبني على المنصة المفتوحة DSpace و يتم إدارته من طرف مديرية المكتبة للمدرسة العليا للري.

كل الحقوق محفوظة للمدرسة الوطنية العليا للري.

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية
الشعبية وزارة التعليم العالي و
البحث العلمي

NATIONAL HIGHER SCHOOL FOR
HYDRAULICS

"The Mujahid Abdellah
ARBAOUI"



المدرسة الوطنية العليا للري

"المجاهد عبد الله عرابوي"

ⵎⵓⵔ ⵏ ⵙⵉⵔ ⵏ ⵙⵉⵔ ⵏ ⵙⵉⵔ ⵏ ⵙⵉⵔ

MEMOIRE DE MASTER

Pour l'obtention du diplôme de Master en Hydraulique

Option: ALIMENTATION EN EAU POTABLE

THEME :

« GESTION DU BASSIN VERSANT DU HAUT CHELIFF
A L'AIDE DE (SWAT)
CAS : QUANTIFICATION DE LA QUANTITE DE
SEDIMENTS»

Présenté par :

MECHERI FAKHREDDINE

Devant les membres du jury

Nom et Prénoms	Grade	Qualité
MEDDI Hind	MCA	Présidente
RASSOUL Abdelaziz	MCA	Examineur
ZAROUAL Ayoub	MCA	Examineur
BOUFEKANE Abdelmajid	MCB	Examineur
KHALED/HOULI Samia	MAA	Examinatrice
SADOUNE Samra	MCB	Promotrice

Dédicace

Je tien tout d'abord à dédier ce modeste travail à mes

Très chers parent

*Ma chère mère Hassina qui m'a protégé pendant toute ma
vie, et qui a fait tout pour que je deviens ce que je suis.*

Mon père Youcef qui m'a tant aidé et encouragé.

Tous mes amis à l'E.N.S.H

*Et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ma
formation*

REMERCIEMENT

En ce préambule à ce mémoire, mes remerciements s'adressent à dieu qui m'a donné le courage, la patience et la volonté d'étudier et de terminer ce modeste travail.

Je veux rendre hommage particulier à mon encadrant Mme Sadoune Samra pour son soutien, son encouragement, sa disponibilité, ses conseils précieuse et fructueuse, tout au long de l'élaboration de ce projet de master, ainsi que pour l'aide et le temps qu'il a bien voulu me consacrer et sans lesquels ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

J'exprime de même ma gratitude aux membres du jury qui ont bien voulu m'honorer de leur présence d'évaluer mon travail.

Un grand merci à toutes les personnes qui m'ont soutenue de près ou de loin au cours de la réalisation de ce modeste travail.

J'adresse aussi mes remerciements à tous les professeurs qui m'ont accompagné durant toutes ces cinq années.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	2
CHAPITRE II : ZONE D'ETUDE ET TRAITEMENT DES DONNEE...	13
1 Présentation de la zone d'étude.....	13
2 Matériels et méthodes.....	15
-Données cartographiques.....	15
-Images satellitaires.....	15
-Autres données.....	16
-Facteur climatique.....	18
-Facteur topographique.....	18
-Facteur d'exposition au vent.....	20
-Facteur lithologique.....	21
-Facteur occupation du sol.....	22
CHAPITRE III : DESCRIPTION DU MODELE.....	25
1 Introduction.....	25
2 Processus modélisés.....	27
-Phase terrestre.....	27
-Phase aquatique.....	35
CHAPITRE IV APPLICATIONS DE SWAT ET ANALYSE DE SENSIBILITE DU MODELE.....	38
1 Principales catégories d'applications.....	38
2 Évaluation de la performance du modèle	45
CHAPITRE V INTERPRETATION DES RESULTATS.....	38
CONCLUSION GENERALE	
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE	

ملخص

الهدف من هذا العمل، هو تحديد كمية الرواسب في حوض الشلف العلوي، باستخدام نموذج تراكب خريطة Arcswat على ArcMapTM. يتعرض هذا الحوض لمشكلة خطيرة تتمثل في تدهور التربة ، مما يؤدي إلى ترسب غالبية السدود الموزعة على العموم. في الواقع ، تم التمييز بين أربع فئات للقابلية للتآكل (منخفضة ومتوسطة وعالية وعالية جدا) حيث تغطي المناطق شديدة التأثير معظم الحوض. توفر الخريطة التي تم استخراجها أداة ممتازة لاتخاذ القرارات للمديرين بهدف تحسين استراتيجيات التدخل الوقائي الخاصة بهم.

الكلمات الدالة: سد، شحن الحوض المائي، النمذجة المائية، الترسيب، التعرية، حوض الشلف العلوي.

RESUME

L'objectif de ce travail est de quantifier la quantité de sédiments dans le bassin supérieur du Cheliff, en utilisant le modèle de superposition de cartes Arcswat sur ArcMapTM. Ce bassin est exposé à un grave problème de dégradation des sols, qui provoque l'envasement de la majorité des barrages répartis dans l'ensemble. En effet, quatre classes de vulnérabilité à l'érosion ont été distinguées (faible, moyenne, élevée et très élevée) lorsque les zones hautement vulnérables couvrent la majeure partie du bassin. La carte produite fournit aux gestionnaires un excellent outil de prise de décision pour mieux cibler leurs stratégies d'intervention préventive (Benkaci et al, 2018).

Mot clés : Barrage, Recharge de la nappe, Modélisation environnementale, Sédimentation, Erosion, Bassin du Haut Cheliff.

ABSTRACT

The objective of this present work is to make the quantification of the quantity of sediments on the level of the high basin Cheliff, by calling upon the model of superposition of the charts "Arcswat" on ArcMapTM. This basin is exposed to a serious problem of impoverishment of the soil, which causes the silting of the majority of the stoppings distributed on her unit. Indeed, four classes of vulnerability to the erosion were distinguished (weak, average, strong and very strong) where the strongly vulnerable zones cover major the part of the basin. The produced chart provides an excellent tool of assistance to the decision-making for the managers, in order to better target their strategies of preventive interventions.

Key words: Dam, Rechrge water table, Environmental modeling, Sedimentation, Erosion, Upper Cheliff bassin.

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE II **Zone d'étude et traitement des données**

Tableau n°II. 1 Caractéristiques physiographiques du bassin haut et moyen Cheliff.....	9
Tableau n°II. 2 Classes de pluviosité et leurs indices de poids	12
Tableau n°II. 3 Classes des pentes avec leur surface et leur degré de sensibilité à l'érosion...	13
Tableau n°II. 4 Classes d'exposition au vent et leur degré de sensibilité à l'érosion.....	15
Tableau n°II. 5 Type de roche et leur sensibilité à l'érosion	16
Tableau n°II. 6 Sensibilité à l'érosion en fonction de l'occupation du sol.....	18

CHAPITRE IV **Applications de SWAT et Analyse de sensibilité du modèle**

Tableau n°IV 1 Vue d'ensemble des principales catégories d'application de SWAT rapportées dans la littérature.	33
---	----

CHAPITRE V **Interprétation des résultats**

Tableau n°V. 1 les caractéristiques du sous bassin.....	47
---	----

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE II **Zone d'étude et traitement des données**

Figure n° II.1 Situation géographique du bassin haut et moyen Cheliff.....	7
Figure n° II. 2 Carte des sous bassin du haut et du moyen Cheliff.....	8
Figure n° II. 3 Réseau hydrographique du bassin haut et moyen Cheliff.....	8
Figure n° II. 4 Combinaison des Bandes spectrales des deux régions Médéa et Cheliff	10
Figure n° II. 5 Diagramme méthodologique pour la réalisation de la carte de sensibilité à l'érosion	11
Figure n° II. 6 Carte des isohyètes du bassin haut et moyen Cheliff.....	12
Figure n° II. 7 Modèle numérique de terrain du bassin haut et moyen Cheliff	13
Figure n° II. 8 Carte des pentes de la zone d'étude.....	14
Figure n° II. 9 Carte d'exposition des versants au vent.....	15
Figure n° II. 10 Carte des formations lithologiques de la zone d'étude.....	16
Figure n° II. 11 Carte d'occupation du sol au niveau du bassin haut et moyen Cheliff.....	17
Figure n° II. 12 Superposition des cartes par l'application Arcswat.....	18

CHAPITRE III **Description du modèle**

Figure n°III 1 Les différents thèmes de cartes requis en entrée de SWAT.....	19
Figure n°III 2 Délimitation en sous-bassins du bassin versant Ruisseau du Portage	20
Figure n°III 3 Principe de délimitation des Unités des Réponse Hydrologique (URH).....	21
Figure n°III 4 Représentation schématique du cycle hydrologique dans SWAT	23
Figure n°III 5 Simulation des sédiments dans SWAT	30
Figure n°III 6 Processus dans le cours d'eau	31

CHAPITRE IV **Applications de SWAT et Analyse de sensibilité du modèle**

Figure n°IV 1 Carte DEM.....	43
Figure n°IV 2 Carte des données sur le sol.....	44
Figure n°IV 3 Carte d'utilisation des terres.....	44
Figure n°IV 4 Carte des pentes	45
Figure n°IV 5 boîte de dialogue pour la configuration du bassin du haut Cheliff et ses sous bassins par le modèle SWAT	46
Figure n°IV 6 configuration du bassin du haut Cheliff et ses sous bassins par le modèle SWAT	46
Figure n°IV 7 Création du HRU du haut Cheliff.....	47
Figure n°IV 8 HRU du haut Cheliff.....	47

CHAPITRE V **Interprétation des résultats**

Figure V. 1 moyennes Interannuelles entre (a) les précipitations 1979 et 2014, (<i>de millimètre</i> année - 1); les eaux de surface simulées chargent (<i>de millimètre</i> année - 1); rendement simulé de dépôt (<i>t - ha - 1</i> · année de t -1)	48
---	----

Introduction générale

Le Maghreb est l'une des régions les plus érodées au monde en raison de son climat semi-aride, de son sol rugueux et de sa végétation médiocre. Au Maroc, par exemple, ce phénomène est intense, avec une aggravation spécifique de plus de 2 000 t / km² par an dans le nord des montagnes du Rif et de 500 à 1 000 t / km² par an dans les atlas moyen et élevé. En Tunisie, les terres arables sont dégradées par l'érosion hydrique. Au total, 1,2 million d'hectares sont gravement touchés par l'érosion dans le nord et le centre et représentent 25% de la superficie totale des terres. L'Algérie n'est pas en reste, c'est l'un des pays les plus érodés du sol. Les conséquences continuent d'augmenter et conduisent à l'épuisement des ressources en eau et en terres. L'ouest du pays est la plus érodée, l'érosion affectant 47% des terres, suivi du centre (27%) et de l'est (26%). L'érosion spécifique varie de 2000 à 4000 t / km² / an et le taux d'envasement dépasse 15%. Au niveau du nord-ouest, l'érosion et son évolution sur les pentes ainsi que sur les facteurs de causalité sont mal connues. Dans les zones touchées par l'érosion et les pics de crues, il reste encore beaucoup à faire pour comprendre et appréhender ce phénomène. Pour évaluer le risque érosif, plusieurs modèles empiriques (qualitatifs et quantitatifs) ont été conçus. Parmi les "équations universelles de perte de sol" les plus utilisées (USLE) établies par Wischmeier et Smith en 1978. Ce modèle fournit une estimation des particules de sol susceptibles d'être déchirées et spatialise les zones les plus sensibles à l'érosion. Bien qu'il soit toujours d'actualité dans de nombreux pays, en raison de sa simplicité et de sa fiabilité, ce modèle prédit uniquement l'importance des pertes de sol dues aux érosions dans les lits ou les canaux, sans prendre en compte les autres formes d'érosion. associé au ravinement, au vent, etc., sa portée est limitée aux pentes inférieures à 20%. Il est établi pour les conditions des environnements existants aux États-Unis, ce qui signifie qu'il ne peut pas être appliqué comme dans les pays méditerranéens. Ce modèle ne respecte pas les critères de notre zone d'étude caractérisés par des pentes abruptes et des ravins dominants. Dans les grandes zones où la vulnérabilité à l'érosion est importante, l'étude à l'aide de modèles numériques est lente et fastidieuse. L'intégration des systèmes d'information géographique (SIG) minimise les efforts, améliore l'efficacité et prédit le potentiel érosif sur une base d'un pixel. Cela présente des avantages distincts lorsque l'on essaie d'identifier les schémas spatiaux de perte de sol. Notre travail s'inscrit dans l'objectif de quantifier la quantité de sédiments dans le bassin supérieur du Cheliff, depuis l'intégration des données issues du traitement des images satellitaires dans un système d'information géographique. Le principe consiste à adopter une approche qualitative de l'érosion hydrique en tenant compte à la fois des caractéristiques physiques (relief, nature géologique du sol et couverture végétale) et des caractéristiques hydrologiques liées aux facteurs climatiques (précipitations et vent). Chacun de ces facteurs a reçu des poids différents. Par la suite, des cartes thématiques ont été développées, reclassées et superposées avec l'application Arcswat Model Arcswat (Benkaci et al, 2018).

Chapitre I : Etude Bibliographique

I.1 Introduction

La gestion des bassins hydrographiques, définie comme toute action humaine visant à assurer l'utilisation durable des ressources naturelles qu'elles contiennent, tente d'atténuer ces menaces. L'origine de la gestion des bassins versants est étroitement liée à la foresterie; Par exemple, la destruction incontrôlée de forêts en Europe et en Amérique du Nord avant les années 50 a entraîné de profonds changements dans les régimes hydrologiques des principaux bassins versants, entraînant une érosion accélérée et des risques en aval. La prise de conscience de cette relation entre l'utilisation des terres en amont et les flux d'eau et la qualité a favorisé le concept de gestion des bassins versants. Il présente une vision holistique de la gestion et de la conservation de toutes les ressources naturelles disponibles. Il fournit un cadre pour l'intégration de différents modes d'utilisation des terres et de moyens de subsistance (par exemple, la foresterie, les pâturages et l'agriculture) en considérant l'eau comme le "point d'entrée" pour les interventions de planification. La gestion des bassins hydrographiques vise à maintenir toute la gamme des services environnementaux fournis par un bassin hydrographique, en particulier les services hydrologiques, et à réduire ou éviter les effets néfastes en aval, tout en augmentant la productivité des ressources et en améliorant la capacité des bassins hydrographiques.

I.2 La gestion des sous bassins à l'aide de SWAT

Dans cette partie on va présenter des différents travaux fait par l'ARCSWAT ainsi leur buts et résultats.

***La modélisation à l'aide du modèle SWAT des flux hydriques et du transport en suspension sur le bassin versant de la vallée de l'oued EL- Hachem (hauteurs :Nassima Tadriss, Olivier Debauche ,Remini Boualem , Aurore Degre) :**

Après comparaison des quantités simulées de sédiments transportées jusqu'au barrage et de la bathymétrie de ce dernier. On peut affirmer que le modèle SWAT permet de simuler correctement l'envasement des barrages. Par ailleurs les volumes et simulés sont corrélés très fortement avec le bilan d'exploitation du barrage. Le modèle est donc également un bon outil en matière de prévision des volumes entrants dans le barrage.

Modeler hydrologique ligne de partage des de Mikke (Maroc) employant le modele d'ARCSWAT : (Chadli Khalid) :

L'interface d'ArcSWAT du modèle de COUP a été employée avec succès pour modeler hydrologique simulé secteur de ligne de partage de s de Mikke '. Le calibrage à l'aide de la TASSE de COUP avec le procédé SUFI-2 a donné de bons résultats en minute imizing les différences entre observé et mesuré données ($R^2 = 0,74$), pendant la période 1979 –2007. L'efficacité modèle a été analysée en utilisant trois indicateurs statistiques avec à résultats proportionnés (NSE = 0,67, PBIAS = 6,78,

RSR = 0,56). L'équilibre de l'eau prouve que la majeure partie de la précipitation (65%) revient à l'atmosphère pendant que la vapeur d'eau évaporée du sol et transpirée par l'usine, 15% de précipitation contribue à l'écoulement extérieur et au 20% contribue à toute la recharge de couche aquifère.

Les rendements de dépôt sont les plus grands dans le secteur méridional du bassin ayant pour résultat la pente élevée, précipitations élevées, l'utilisation de la terre et sols érodible, et diminution comme nous nous déplaçons au nord du bassin.

Evolution du bilan hydrique à l'échelle de bassins-versants en contexte de changement climatique (Olivier LEGRAS) C'est également le travail proposé pour la thèse qui étudiera les aspects hydrologiques des 13 bassins hydrographiques sélectionnés par le projet HYCCARE. Ensuite, un autre angle serait d'analyser les données dans la sortie de la simulation après avoir exécuté le modèle SWAT via le logiciel ArcSWAT. Cela permettra de vérifier la conformité des résultats avec la valeur de référence et de recalibrer le modèle si nécessaire en modifiant la précision des données d'entrée. Cette phase opérationnelle du modèle SWAT sera l'occasion de confirmer la pertinence des méthodes développées dans ce travail et d'identifier les changements possibles pour améliorer la fiabilité des prévisions obtenues (Legras et al, 2014).

MODÉLISATION DES PETITS BASSINS VERSANTS EN MILIEU RURAL :

Problématique des modèles fortement paramétrés :(Rasolomanana Santatriniana Denise)

Une optimisation multi-objective en utilisant un algorithme modifié de SCE-ua, est incorporée dans SWAT2005. Deux approches de calibrage sont possibles: optimisation simple-objective et multi-objective. L'exécution modèle obtenue dépend du choix de l'approche de calibrage, mais essentiellement des paramètres influençants choisis. En effet, chacun variable est sensible à différents paramètres et en cas de beaucoup de variables, quelques paramètres apparaissent dans les sous-ensembles multiples: écoulement et SOLIDES SOLUBLES TOTAUX, écoulement et TP, écoulement et SOLIDES SOLUBLES TOTAUX et TP Les considérer tous pour le calibrage ont amélioré l'exécution convenable obtenue de qualité de l'eau beaucoup. Basé sur les résultats obtenus en cette étude, même si le choix défini pour l'utilisateur des poids avec SCE dans SWAT2005 n'est pas opérationnel, le calibrage multi-objectif demeure la meilleure approche pour modeler des SOLIDES SOLUBLES TOTAUX et le TP, avec une exécution quotidienne d'évaluation dans la petite ligne de partage agricole de Ruisseau du Portage. Les conclusions suivantes peuvent être tirées:

1. L'optimisation multi-objective considérant tous les paramètres liés aux variables est la meilleure approche pour augmenter la simulation quotidienne de qualité de l'eau avec SWAT2005. L'exécution de décrire des données d'écoulement est maintenue et l'exécution de prévision de qualité de l'eau, particulièrement celle du TP, est tout d'abord améliorée.

2. Les excellents résultats sur la ligne de partage entière peuvent cacher les bilans de

matière peu réalistes pour Q, des SOLIDES SOLUBLES TOTAUX et TP pour chaque HRU. Forcing que un bilan de matière correct pour chaque HRU mène à une plus mauvaise exécution quotidienne, et certains paramètres de fixing pour imposer le bilan de matière gêne la recherche d'un ensemble de paramètre qui donne à exécution modèle proportionnée.

3. En dépit de la normalisation des fonctions objectives, l'algorithme de SCE incorporé dans SWAT2005 donne la priorité aux données les plus nombreuses parmi les variables considérées. Pour surmonter ce problème, le choix d'autres poids assignés aux fonctions objectives peut être une solution mais ce n'est pas opérationnel dans SWAT2005. La tentative de changer les poids manuellement n'a pas amélioré l'exécution pour décrire des données de TP.

Avec l'optimisation simple-objective, l'excellente exécution de qualité de l'eau qui peut être réalisée peut cacher une perte d'exécution convenable d'écoulement et de composants hydrologiques internes déséquilibrés.

Modeler hydrologique du transport de dépôt dans la région semi-aride, cas de ligne de partage de Soubella en Algérie :(Mahmoud Hasbaia, André Paquier and Toufik Herizi) :

Le transport suspendu de dépôt est un défi pour les régions semi-arides, non seulement en raison des quantités élevées de rendement de dépôt, mais également en raison de la variabilité spatio- temporelle du phénomène. Par plusieurs études de beaucoup de lignes de partage en Algérie, le transport de dépôt change quantitativement et qualitativement d'une région à l'autre. La ligne de partage de Soubella est un secondaire-bassin de bassin de Hodna. Avec une aire de 183,50 kilomètres² le dépôt moyen la vent-vers le bas est 239 $\text{asso- de T/km}^2 / \text{année}$ ciated avec une variabilité élevée (coef interannual cient de la variation de 135%). À la balance saisonnière, plus que 70% du rendement de dépôt se produit en automne pour le wadi Soubella; mais, pour la plupart des bassins algériens, le transport suspendu de dépôt est intensif en automne tôt et ressort en retard.

Le rendement d'écoulement et de dépôt modelant en utilisant le COUP modèlent: caisse de bassin de Wadi Hatab, Tunisie centrale : (Narjes Chaâbane, Ben Salah, Habib Abida)

Dans cette étude, le modèle de COUP a été appliqué au bassin de Wadi Hatab, Tunisie centrale, pour simuler des flux d'iment de l'eau et de sed-. L'exécution du modèle a été examinée en utilisant les indicateurs statistiques et graphiques, basés sur l'accord entre les débits observés et simulés. En effet, pour l'application quotidienne d'étape de temps, les valeurs — de l'efficacité de Nash Sutcliffe (NSE) étaient 0,52 et 0,61, et le coefficient de la détermination (R^2) s'est étendu de 0,54 à 0,61 pour le calibrage et la validation respectivement. Quant à l'application mensuelle d'étape de temps, les valeurs obtenues de NSE étaient 0,67 et 0,89 tandis que les valeurs de R^2 étaient 0,83 et 0,87 pour le calibrage et la validation respectivement. Ceci montre clairement la concordance raisonnablement bonne entre des débits simulés et observés.

Les résultats obtenus sont satisfaisants et reflètent une bonne capacité du modèle de reproduire les

écoulements et les rendements observés de dépôt. En effet, le modèle de COUP s'est avéré un outil fiable pour modéliser l'écoulement et le transport de dépôt du bassin de Wadi Hatab. Le modèle de COUP peut maintenant être employé pour évaluer les impacts hydrologiques de l'eau et les travaux de conservation de sol mis en application dans le bassin depuis les années 90 et examiner également la praticabilité de mettre en application l'autre conservation fonctionnelle dans la région. Les simulations sous différents scénarios de gestion auront comme conséquence le choix de la solution appropriée, qui est plus adaptée aux conditions environnementales locales.

Modélisation hydrologique des ressources de l'eau et de sol dans le bassin d'amont du barrage de EL Fassi d'Allal (ligne de partage supérieure de Sebou, Maroc) : M'hamed Boufala · Abdellah El Hmaidi · Khalid Chadli · Ali Essahlaoui · Abdelhadi El Ouali · Soufiane Taia
Spatialized modelant l'approche (COUP) comme un outil de gestion pour la simulation des ressources d'eau à la balance de ligne de partage a été avec succès calibré dans le hangar de l'eau de Sebou de haut. Il a, donc, reproduit l'équilibre et l'érosion hydrologiques dans différentes entités du secteur d'étude et également le modèle a évalué les entrées de l'eau et de dépôt au barrage de EL Fassi d'Allal. Ces résultats ont été obtenus après un long processus de préparation et de structurer de données sur une échelle spatiotemporelle en utilisant la télédétection et le système d'information géographique (GIS) techniques.

La dégradation spécifique du sol peut atteindre une valeur maximum plus de 12 t/ha/year d'amont du bassin, particulièrement dans les secondaires-bassins commandés par les stations hydrométriques du char de M'dez, de Dar Lhamra et d'Ain Timedrine affectés par le sol nu et les altitudes élevées. La présence d'une forêt dense peut réduire ce taux. En effet, les résultats obtenus à partir de cette exposition modélisée que la terre couverte par des forêts et des matorrals moins sont affectés par érosion. Ainsi, la fiabilité du COUP modélisant pour les hangars marocains de l'eau peut être considérée comme outil intéressant pour des études de changement de climat, des pratiques agricoles, et l'allocation de ressources de l'eau.

Transfert des nitrates du bassin versant de la Tafna (Nord-Ouest de l'Algérie) vers la mer Méditerranée. Approche couplant mesures, modélisation et changement d'échelle vers les grands bassins versants Nord africains. M. AMIN ZETTAM :

Cette étude a développé une approche expérimentale in situ avec de la modélisation hydro-agro-environnementale à différentes échelles spatiales, pour quantifier les mécanismes de transfert des nitrates et des sédiments dans le bassin versant de la Tafna (Nord-Ouest de l'Afrique du Nord) et des plus grands fleuves de l'Afrique du Nord.

A l'échelle du bassin versant de référence, l'étude in situ a permis de montrer la grande variabilité des concentrations en nitrate dans les différents exutoires des sous bassins de la Tafna. Le sous bassin d'Isser contribue le plus à l'eutrophisation de la Tafna et donc de la Méditerranée.

Les résultats ont permis de déterminer les facteurs qui influent sur le flux et les concentrations en nitrates. L'occupation du sol a une grande influence sur les flux de nitrates dans la Tafna.

L'application du modèle SWAT a aidé à reproduire le flux d'eau, des sédiments et des nitrates. SWAT a permis d'évaluer la contribution des différents compartiments du bassin aux eaux de surface. Il a montré aussi qu'une grande proportion d'eau de surface provient du ruissellement et du flux latéral, alors que la contribution des eaux souterraines est insignifiante.

L'application du modèle a mis en évidence l'impact de la construction de barrage sur le bilan hydrique et les sédiments dans le bassin versant semi-aride. En effet, une grande quantité d'eau (49%) est stockée dans les cinq réservoirs du bassin versant, diminuant ainsi le débit d'eau dans la partie aval du bassin et pourrait affecter la zone agricole irriguée, d'autant plus que la plupart de ces terres dépendent de l'eau de la Tafna. Ces barrages ont été construits pour l'approvisionnement en eau potable et pour l'irrigation. Cependant, selon les statistiques de l'Agence nationale du bassin et du transfert (ANBT) de janvier 2003 à juillet 2011, le plus grand barrage du bassin (Hammame Boughrara) est exclusivement consacré à l'eau potable.

La modélisation a permis de mettre en évidence sa capacité à prédire et évaluer les conséquences de la pression anthropique sur les ressources en eau à grande échelle. Bien que le manque de données récentes et fiables (la carte récente des sols, les mesures journalières des nitrates et l'incertitude des inputs du modèle) nous ait empêchés d'avoir de meilleurs résultats, nous avons pu établir des projets de modélisation cohérents.

Cependant, un problème général dans la modélisation des bassins versants qui doit être abordé est la disponibilité limitée des données. L'absence d'une longue série de données observées avec un pas de temps quotidien et une résolution spatiale élevée ont limité la capacité de cette étude à évaluer les simulations comme il se doit.

Le manque et la qualité des données observées dans la région de l'Afrique du Nord est un sérieux problème qui touche le secteur de l'eau. Les chercheurs qui travaillent dans ce domaine trouvent beaucoup de difficultés pour interpréter les résultats des différents travaux réalisés. Il est à noter aussi qu'aujourd'hui une collaboration entre les pays de la région ainsi que les institutions de recherches et les agences de l'eau de l'Afrique du Nord est indispensable pour mieux protéger la ressource hydrique.

En termes de perspectives scientifiques, en plus de l'acquisition des données nécessaires pour une meilleure évaluation du modèle à large échelle, nous pouvons utiliser la modélisation pour faire des simulations à l'horizon 2030-2050. Aussi au vue des résultats de simulation, on pourrait envisager de travailler avec les organismes de gestion des ressources en eau pour tester diverses simulations dans un contexte de changement environnemental (climatique et occupation du sol, démographie, agriculture)

Enfin, les résultats obtenus ont été très encourageants. On a pu représenter la dynamique de l'eau, des sédiments et des nitrates dans la Tafna et à l'échelle des plus grands fleuves de l'Afrique du

Nord (A.Zettam, 2018).

Chapitre II : Zone d'étude et traitement des données

1 Présentation de la zone d'étude

Notre zone d'étude fait partie du bassin versant Cheliff-Zahrez, qui représente plus de 22% de la superficie du nord de l'Algérie. Cette région hydrographique est divisée en trois grands sous-bassins versants, le Cheliff, qui est le plus vaste en termes de superficie en Algérie, à Zahrez et sur la côte de Dahra. Le bassin de Cheliff représente plus de 77% de la superficie totale du bassin de Cheliff-Zahrez. Il est naturellement divisé en trois sous-bassins hydrographiques, comme le montre la Figure 1: Bassin de Cheliff en amont du barrage Boughzoul, Bassin inférieur de Cheliff et Bassin de Mina, et Bassin supérieur et moyen de Cheliff. Géographiquement, notre zone d'étude est située entre les longitudes 1 ° et 3 ° 90 'à l'est et les latitudes 35 ° et 36 ° 50' au nord, sa superficie est d'environ 10701 Km².

Les bassins supérieur et central de la rivière Cheliff comprennent 11 sous-bassins. Chaque sous-bassin hydrographique peut être décrit par un code explicitement attribué, comme illustré à la figure 2. Le bassin a une coiffure hydrologique très dense (Figure 3) et son réseau comprend environ 2 200 km d'oueds permanents et 5 600 km d'oueds temporaires. Cheliff est la principale rivière couvrant la zone d'étude, avec une longueur totale de 349 kilomètres. La densité de drainage varie entre 0,57 et 1,54 km / km². Les faibles valeurs sont caractérisées par de faibles pentes, principalement dans les hautes plaines, entraînant une diminution des précipitations et une perméabilité importante des structures lithologiques (Benkaci et al, 2018).

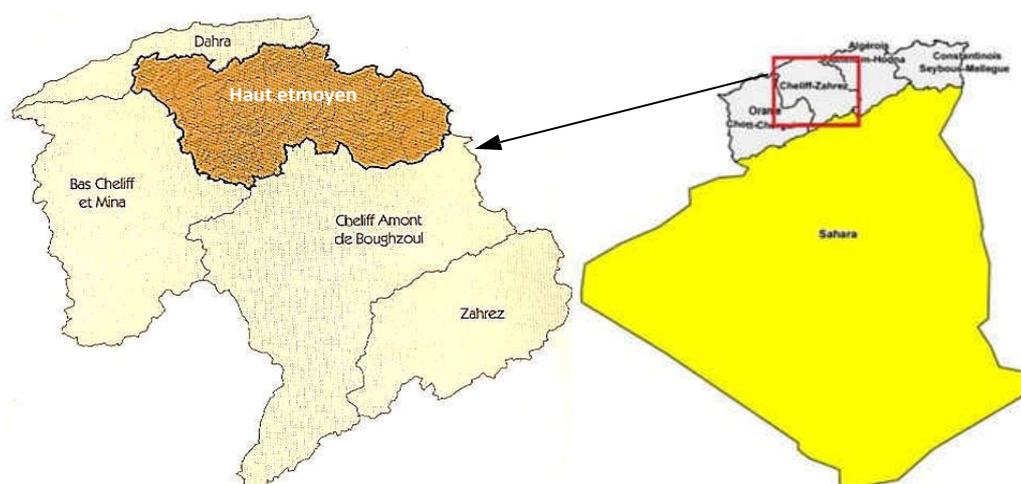


Fig. 1 - Situation géographique du bassin haut et moyen Cheliff (Benkaci et al, 2018).

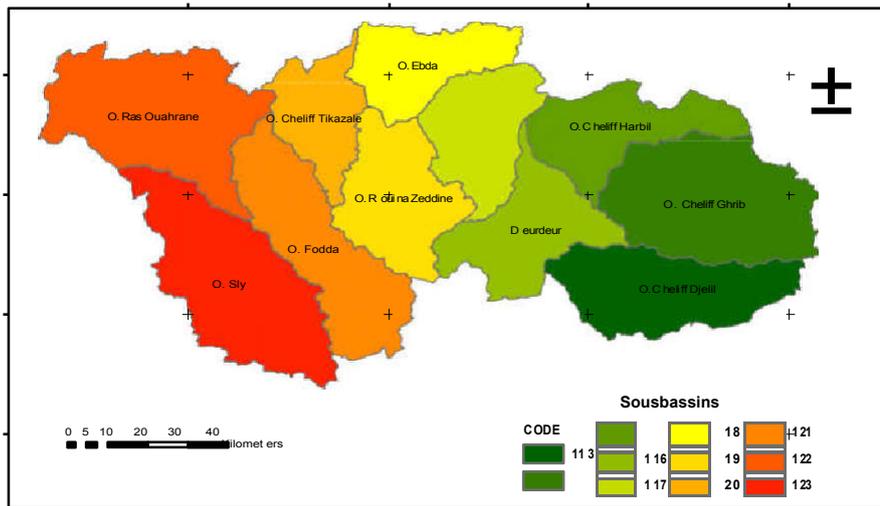


Fig. 2 - Carte des sous bassin du haut et du moyen Cheliff (Benkaci et al, 2018).

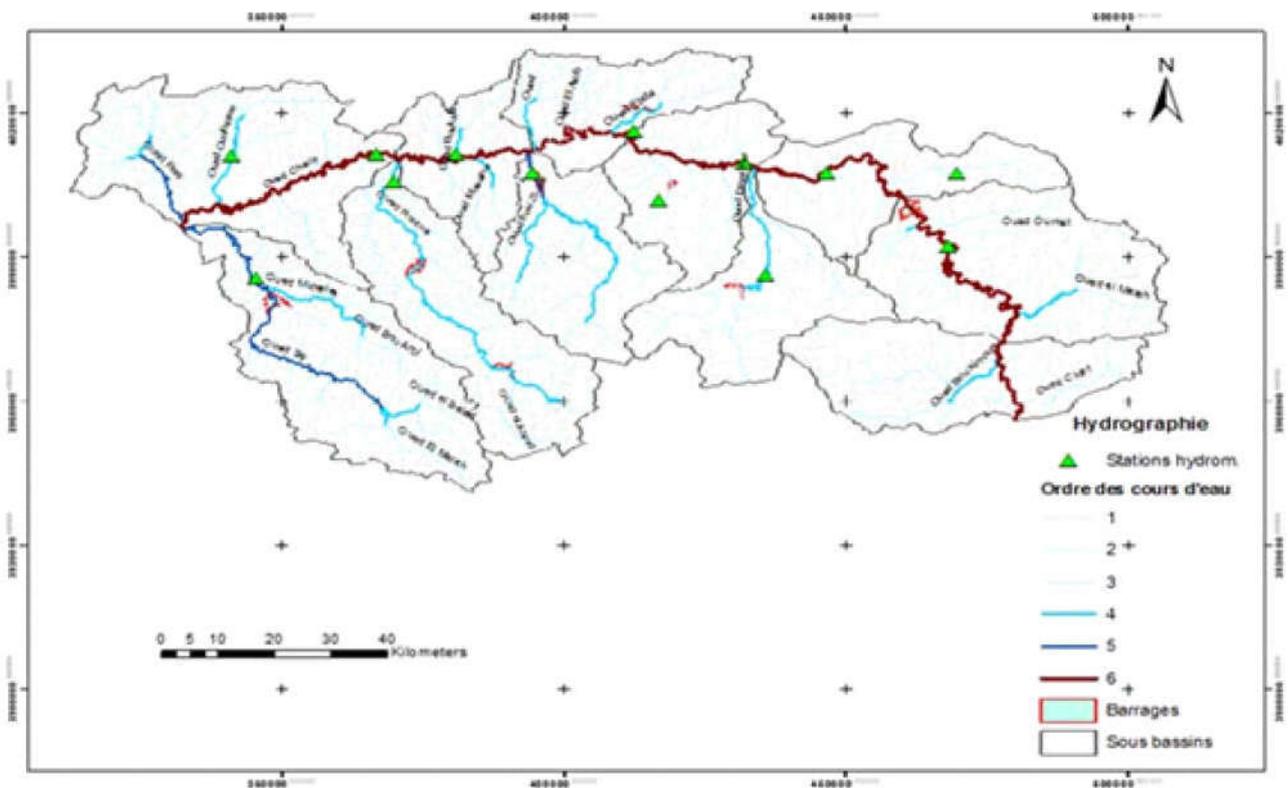


Fig. 3 - Réseau hydrographique du bassin haut et moyen Cheliff (Benkaci et al, 2018).

• Les caractéristiques physiographiques du bassin versant influencent fortement sa réponse hydrologique, y compris le régime d'écoulement en période de crue et de crue. Ces facteurs morphométriques, présentés dans le tableau 1, ont été estimés à l'aide des logiciels ArcGisTM et Global mapper (Benkaci et al, 2018).

Tableau 1 – Caractéristiques physiographiques du bassin haut et moyen Cheliff

Superficie (km ²)	10701	-
Périmètre (km)	658,7	-
Indice de compacité Kc	1,783	le bassin est de forme allongée favorisant un écoulement lent des eaux de ruissellement.
Altitude maximale (m)	1946.9	Point culminant du bassin.
Altitude moyenne (m)	628,9	Déterminée après génération des courbes de niveau sur Global Mapper et extraction des différentes surfaces correspondantes.
Altitude minimale (m)	66	Exutoire du bassin versant.

3 Matériels et méthodes

a- Données cartographiques

Elles concernent essentiellement :

• Carte du réseau hydro-climatique et suivi de la qualité de l'eau dans le nord de l'Algérie, réalisée en 2004 à l'Institut national de cartographie et de télédétection d'Alger, le rapport est de 1/500000. La carte a été numérisée et géolocalisée conformément à la projection conique conforme de Lambert du nord de l'Algérie, notamment pour délimiter la zone d'étude. • Carte géologique africaine à l'échelle 1/1 500 000 (disponible au téléchargement sur le serveur USGS de la US Geological Survey sur les eaux), dédiée à l'extraction de formations lithologiques des bassins. • et des cartes topographiques et topographiques de Cheliff (téléchargées à partir de la base de données d'images satellite USGS Terra) (Benkaci et al, 2018).

b- Images satellitaires

Il existe deux types d'images satellitaires: • Les images SRTM (mission radar terrain de la navette spatiale) obtenues au moyen d'un logiciel de cartographie globale. Son traitement sur ArcMap TM nous a permis de construire un modèle numérique d'élévation (DEM) (Figure 4), à partir duquel nous avons développé deux cartes thématiques, à savoir une carte des pentes et une carte de la direction du vent. • Deux images satellites Landsat 8 de régions Medea et Cherif sous forme de bandes spectrales (rouge et proche infrarouge) avec une résolution de 30 m. Les deux images ont été fusionnées (Figure 5) pour couvrir l'ensemble de la zone d'étude.

Leur traitement nous a permis de calculer l'indice normalisé de végétation NDVI, à partir duquel nous pouvons extraire la couverture végétale du bassin pour obtenir une carte de couverture terrestre (Benkaci et al, 2018).

Fig. 4 - Modèle Numérique d'Altitude du bassin haut et moyen Cheliff.
(Benkaci et al, 2018).

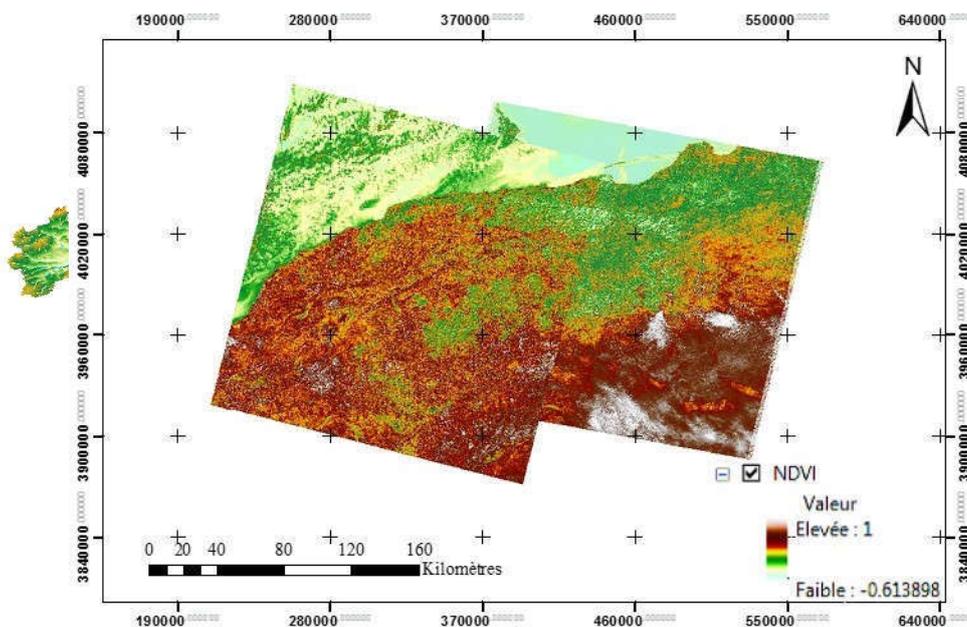


Fig. 5 – Combinaison des Bandes spectrales des deux régions Médéa et Cheliff (Benkaci et al, 2018).

c- Autres données

Ils se rapportent en particulier aux données pluviométriques annuelles obtenues par l'Agence nationale des ressources en eau. Une fois traitées et complétées, ces données permettent de développer la carte isométrique de la zone d'étude à l'aide du logiciel ArcGisTM. La méthode initiale utilisée consistait à intégrer et à analyser les données satellitaires, de terrain, géologiques et climatiques dans un environnement SIG avant de les développer. Cette approche nous permet de créer des cartes thématiques et de les reclassifier à l'aide du logiciel ArcGisTM. Par la suite, nous donnons la priorité au rôle de chaque facteur en attribuant des poids, avec l'indice de poids relatif au degré de sensibilité à la corrosion de chaque catégorie obtenue: effet faible = 1, moyenne = 2, fort = 3 et très fort = 4. Pour obtenir la carte finale de

la vulnérabilité à l'érosion des sols de notre bassin, nous avons utilisé la méthode de superposition pondérée du fabricant sur ArcMapTM. Le degré de vulnérabilité sera exprimé sous la forme suivante: Sensibilité à l'érosion = indice de pente + indice de lithologie + indice de couverture du sol + indice de précipitation + indice d'exposition au vent. L'attribution d'un indice pondéré à chaque facteur est l'un des plus gros problèmes rencontrés. Sur la base de notre connaissance du terrain et de toutes les études réalisées sur chaque sous-bassin de la zone d'étude, nous avons utilisé les indicateurs suivants: les facteurs lithologiques sont attribués à l'indice faible (10%) et les indices moyens (20%) sont attribués aux facteurs isotoniques, respectivement Et des pentes exposées au vent. Cependant, les effets combinés de l'utilisation des sols et de la lutte contre l'érosion hydrique nous ont permis de maintenir des indicateurs plus ou moins importants (25%) sur les deux facteurs, la couverture végétale et la pente (Benkaci et al, 2018). La plupart des travaux sont effectués conformément au diagramme de la méthode illustré à la figure 6:

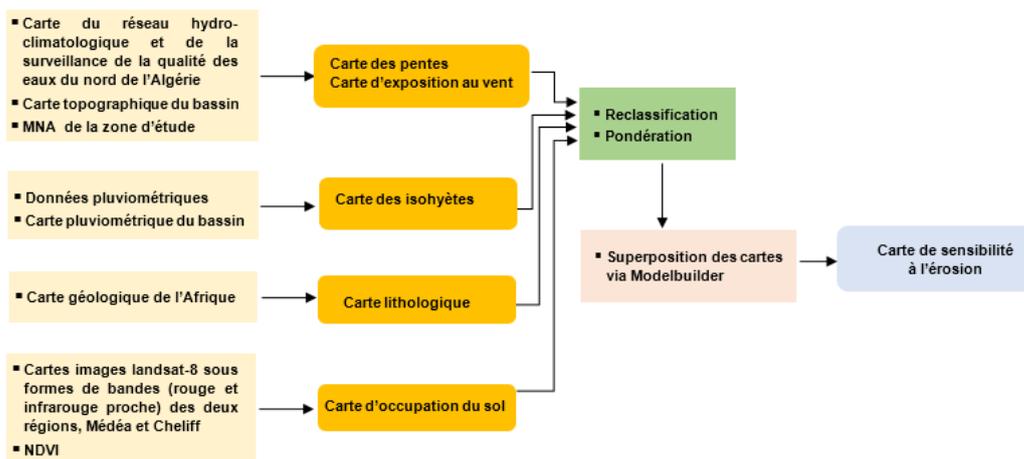


Fig. 6 - Diagramme méthodologique pour la réalisation de la carte de sensibilité à l'érosion (Benkaci et al, 2018).

d- Facteur climatique

La pluie est considérée comme un moteur de l'érosion. En raison de l'effet de battement, ses effets apparaissent directement à la surface du sol, où les agrégats sont détruits, les particules séparées, puis transportées vers les eaux de ruissellement. Les cartes de contour ont été complétées en interpolant différentes données météorologiques à l'aide du logiciel ArcGisTM (Benkaci et al, 2018) (Figure 7).

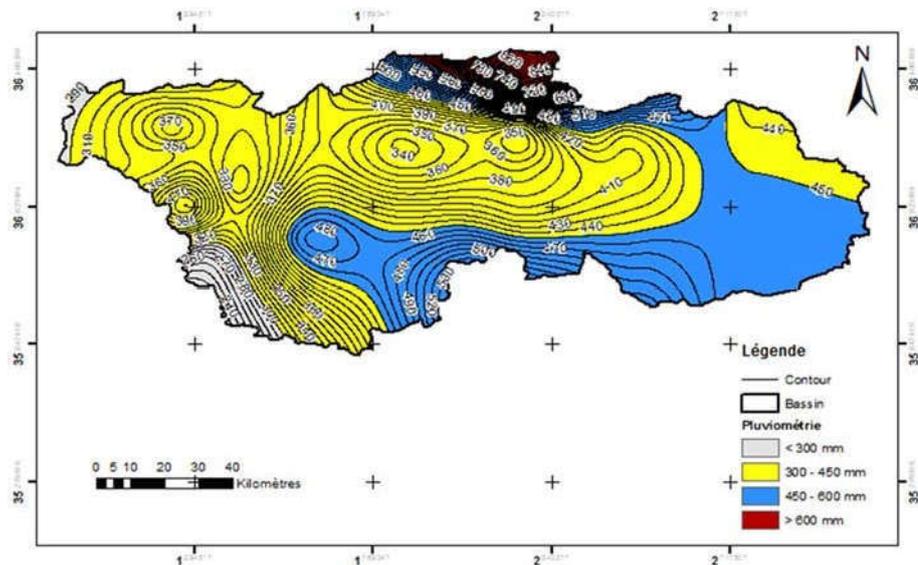


Fig. 7– Carte des isohyètes du bassin haut et moyen cheliff (Benkaci et al, 2018).

À la fin, nous avons obtenu quatre types de précipitations. Dans la majeure partie du bassin, les précipitations varient de moyennes à élevées (300 à 600 mm). Évidemment, plus l'intensité est élevée, plus l'effet du battage médiatique sur le sol est évident, puis, pour chaque catégorie, nous attribuons un indice de poids relatif au degré de sensibilité à l'érosion (tableau 2) (Benkaci et al, 2018).

Tableau 2– Classes de pluviosité et leurs indices de poids (Benkaci et al, 2018)

Pluviométrie annuelle	en	Sensibilité	à	Indice de poids
< 300		Faible		1
300 à 450		Moyenne		2
450 à 600		Forte		3
> 600		Très forte		4

Facteur topographique

La pente joue un rôle très important vis-à-vis du phénomène érosif. Son inclinaison affecte de manière significative la vitesse de ruissellement, ce qui accélère le processus de transport des sédiments. Ce dernier accentue la force de traction des particules et augmente ainsi l'effet de la dégradation du sol (Benkaci et al, 2018).

L'image SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), téléchargée avec le logiciel Global mapper, à partir de la zone d'étude (Fig. 8), nous a permis de définir quatre classes de

pentés (Tableau 3). Les pentés fortes à très fortes sont identifiées principalement dans la partie amont du bassin versant. Celles-ci sont caractérisées par un terrain accidenté où le risque érosif peut être très élevé. Les pentés moyennes sont réparties beaucoup plus loin en aval du bassin. Cependant, les faibles pentés se concentrent au niveau de la plaine et occupent donc une surface plus faible (Benkaci et al, 2018).

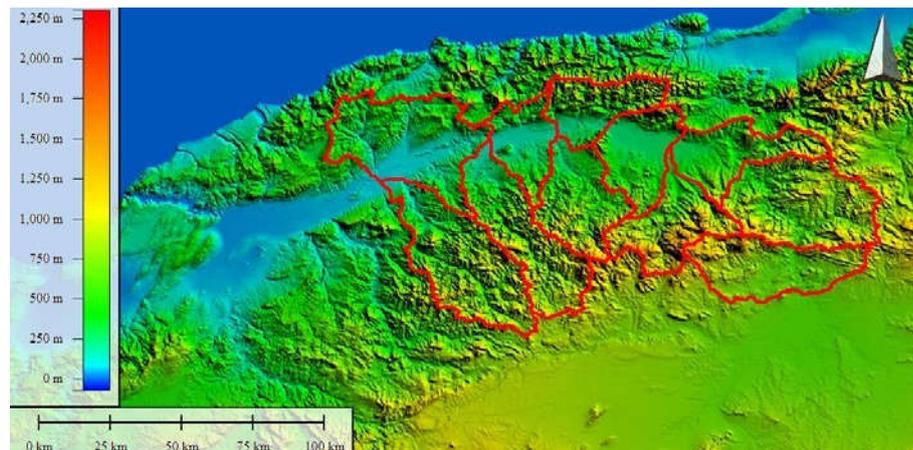


Fig. 8 – Modèle numérique de terrain du bassin haut et moyen Cheliff (Benkaci et al, 2018).

Une carte de pente de la zone d'étude a ensuite été développée à l'aide du logiciel ArcGisTM (Figure 9). Il convient de noter que plus la pente du terrain est importante, plus il est vulnérable à l'érosion. Par conséquent, pour ces quatre catégories, leur surface habitable et leur indice de pondération sont attribués en fonction de la vulnérabilité à l'érosion (tableau 3) (Benkaci et al, 2018).

Tableau 3– Classes des pentés avec leur surface et leur degré de sensibilité à l'érosion (Benkaci et al, 2018).

Classe des pentés	Surface occupée	Sensibilité	Indice de
< 6%	2249	Faible	1
6% à 13%	2722	Moyenne	2
13% à 25%	3764	Forte	3
> 25%	2044	Très forte	4

En vous référant aux cartes de la figure 9 et du tableau 3 ci-dessus, nous remarquons que les pentés faibles à moyennes représentent environ 46% de la superficie totale du bassin. Cette

zone contribue à l'apparition du canal. Cependant, considérez que plus de la moitié (54%) de la région a des pentes raides à très raides. Sur cette partie du sol, les rivières sont devenues plus larges et plus profondes, des ravines sont apparues et l'érosion est devenue plus importante.

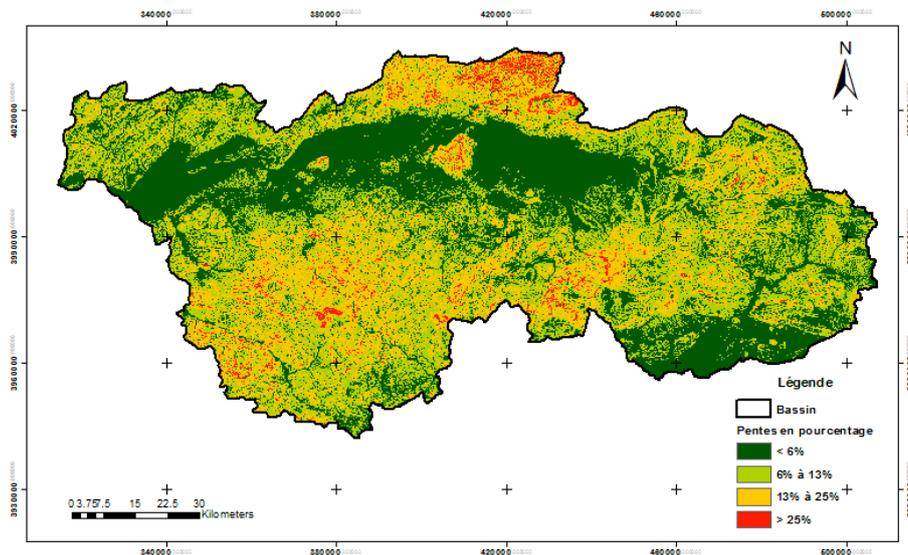


Fig. 9 - Carte des pentes de la zone d'étude (Benkaci et al, 2018).

Facteur d'exposition auvent

La carte d'exposition au vent (Fig. 10) localise les pentes qui posent le plus grand risque d'érosion, qui attaque les roches en déchirant les particules ou en polissant la surface. Ce processus entraîne une grave dégradation de l'environnement par l'épuisement des sols et le déplacement de grands volumes de particules par le vent (Benkaci et al, 2018).

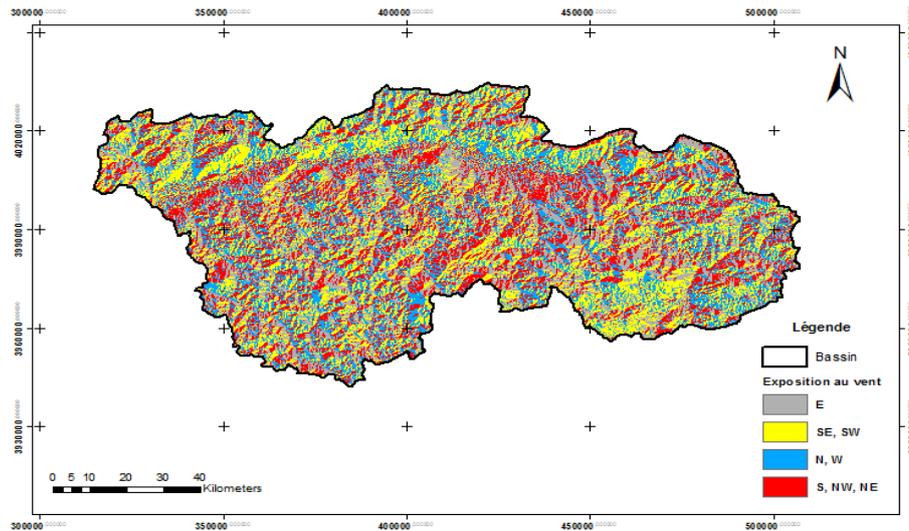


Fig. 10 - Carte d'exposition des versants au vent (Benkaci et al, 2018).

En été, notre région est exposée aux vents du sud qui sont chargés de particules de sable. Ces vents exercent une action corrosive donnant l'effet d'un mitraillage. Il est également exposé aux vents du nord-est qui contribuent au balayage des particules fines et à leur déracinement du sol. En hiver, notre région est exposée aux vents du nord-ouest avec des précipitations.

La carte ci-dessus a été réalisée sous ArcMap™ puis reclassifiée. Les différentes classes retenues sont pondérées et réparties comme suit (Tableau 4):

Tableau 4– Classes d'exposition au vent et leur degré de sensibilité à l'érosion (Benkaci et al, 2018).

Exposition au vent	Sensibilité	Indice de poids
E	Faible	1
SE, SW	Moyenne	2
N, W	Forte	3
S, NW, NE	Très forte	4

Facteur lithologique

La carte des formations lithologiques dans notre zone d'étude (Fig. 11) a été développée à l'aide du logiciel ArcGis™, extrapolé à partir de la carte géologique de l'Afrique. Chaque type de roche est lié à une période géologique bien définie.

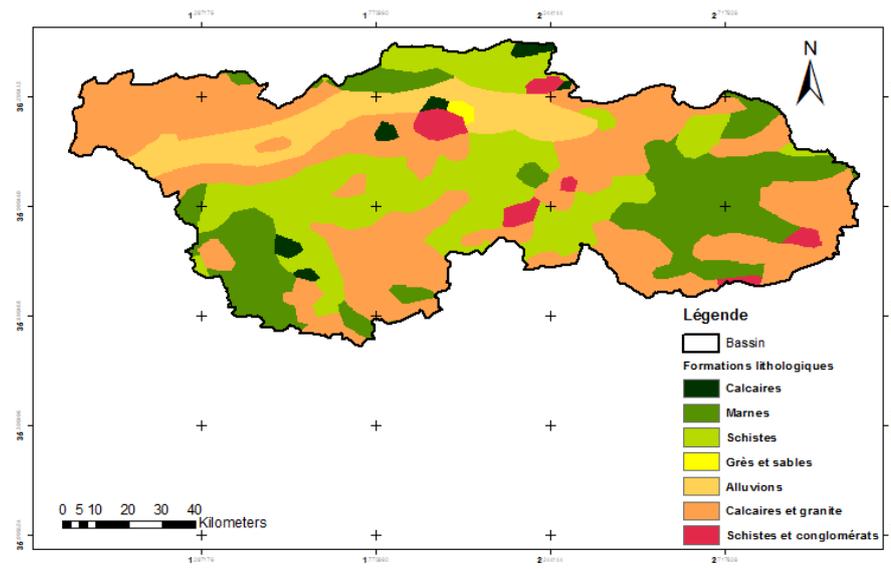


Fig.11. Carte des formations lithologiques de la zone d'étude
(Benkaci et al, 2018).

Sur la carte ci-dessus, nous trouvons une diversité géologique dans tout le bassin. Différents types de roches ont été caractérisés, chacun ayant une résistance différente à l'érosion. Leur classification (Tableau 5) a été validée sur la base de l'examen des deux cartes géologiques respectives, la carte du bassin de CHELIF-HABRA à l'échelle 1/200 000 et la carte OUED FODDA à l'échelle 1: 50 000. E (Benkaci et al, 2018).

Tableau 5– Type de roche et leur sensibilité à l'érosion
(Benkaci et al, 2018).

Périodes	Types des	Sensibilité	Indice de poids
Crétacé	marne	très forte	4
Crétacé inférieur	schiste	moyenne	2
Jurassique	calcaire	faible	1
Quaternaire	alluvion	moyenne	2
Trias	schiste	moyenne	2
Paléozoïque	grès et sable	forte	3
Tertiaire	calcaire et	faible	1
Crétacé	marne	très forte	4

Facteur occupation du sol

La couverture végétale est l'élément essentiel qui renseigne sur le degré de protection contre l'érosion. En effet, la couverture végétale protège le sol de l'impact des gouttes de pluie et des éclaboussures, et tend à ralentir la vitesse de ruissellement, favorisant ainsi l'infiltration. Par conséquent, une faible couverture végétale augmente le risque d'érosion. La carte de couverture terrestre de la zone d'étude (Fig. 12) a été élaborée à partir du calcul de l'indice de

végétation standardisé différencié, NDVI. Son principe repose sur le fait qu'une couverture végétale absorbe de l'énergie dans la bande rouge et se reflète au maximum dans le proche infrarouge (Benkaci et al, 2018).

Il est donné par :
 $NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R}$

où, PIR représente la bande spectrale correspondante au proche infrarouge et R, celle correspondante au rouge.

Les valeurs théoriques du NDVI varient entre (-1, 0) et (0, +1) où, les valeurs les plus élevées concernent la végétation verte active ; les faibles valeurs pour d'autres matériaux de surface communs. Les masses d'eau et les zones humides sont représentées avec un NDVI négatif et les sols nus par les valeurs NDVI les plus proches de zéro [20]. Les bandes spectrales 4 et 5 des deux images satellitaires (type Landsat 8) des régions Médéa et Cheliff ont été combinées et utilisées pour le calcul du NDVI (Benkaci et al, 2018).

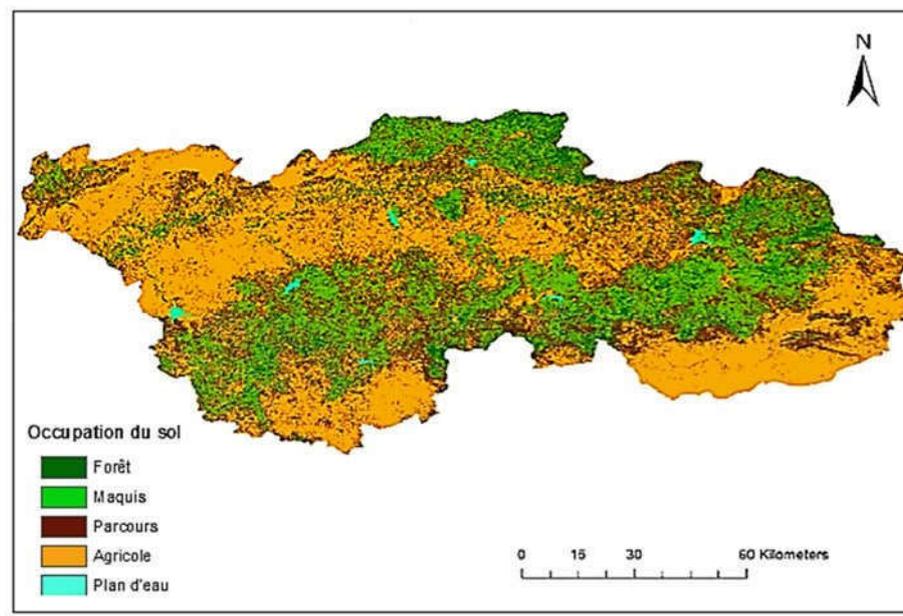


Fig. 12 - Carte d'occupation du sol au niveau du bassin haut et moyen cheliff (Benkaci et al, 2018).

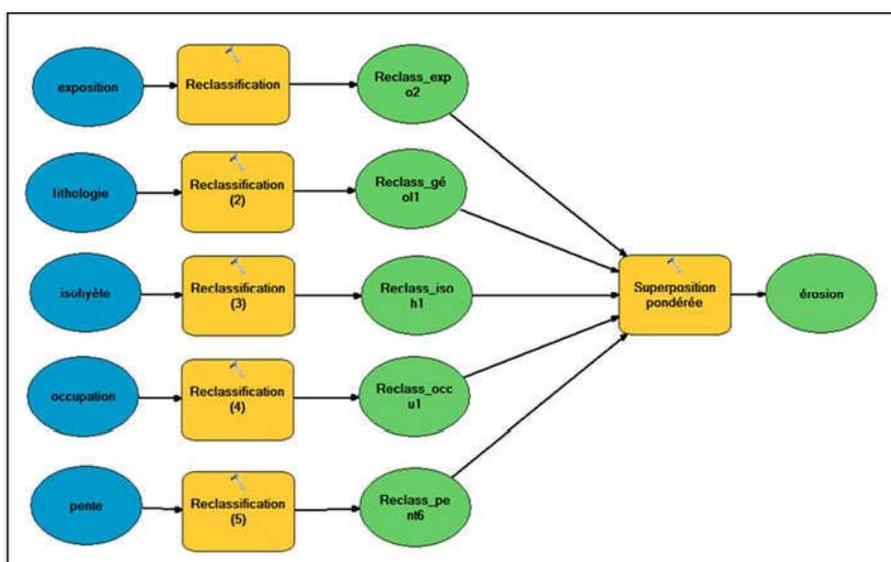
Après traitement sur ArcgisTM, nous avons affecté pour chacune des classes obtenues, un indice de poids selon sa sensibilité à l'érosion (Tableau 6). La classification a été validée en se basant d'une part, sur l'analyse visuelle de l'indice calculé, NDVI et d'autre part, en utilisant les échantillons des sols décrits dans les notices des cartes des sols de l'Algérie (Plaines du CHELIF) à une échelle 1/50.000 ème (Benkaci et al, 2018).

Tableau 6– Sensibilité à l'érosion en fonction de l'occupation du sol (Benkaci et al, 2018).

Occupation	Sensibilité	Indice de poids
Forêt	Faible	1
Maquis	Moyenne	2
Humide et parcours	Forte	3
Agricole	Très forte	4

Superposition des cartes par l'application Arcswat

Cette méthode consiste à superposer plusieurs rasters en utilisant une échelle de mesure commune et une pondération en fonction de leurs importances. Les cinq rasters en entrée ont été reclassés selon une échelle de mesure commune de 1 à Chaque raster est affecté par un pourcentage d'influence (pondération), puis les résultats sont cumulés pour créer le raster en sortie(Fig.13) (Benkaci et al, 2018).



Chapitre III : Description du modèle

Introduction

Le modèle SWAT est le fruit de près de 20 ans d'efforts de développement du Département de l'agriculture des États-Unis (Arnold et Fohrer, 2005), visant à simuler l'eau, les éléments nutritifs et le transport de l'eau, pesticides à l'échelle des bassins versants. C'est un modèle distribué semi-physique et semi-empirique, fonctionnant à un pas de temps quotidien. Étant un modèle continu, il ne convient pas de simuler des événements particuliers. Il est issu des modèles SWRBB (Simulator for Water Resources in Rural Basins) (Williams et al. 1985; Arnold et al. 1990), CREAMS (Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems) (Knisel 1980), GLEAMS (Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems) (Leonard et al. 1987), EPIC (Erosion-Productivity Impact Calculator) (Williams et al. 1984).

Le modèle a évolué au fil du temps. SWAT2005 est la version SWAT disponible en ligne. Cette version possède une interface ArcView (AVSWAT-X) qui utilise un modèle numérique de terrain (DTM), les coordonnées des stations climatiques et de jaugeage, le réseau hydrographique, les revêtements de sol et les occupations en grille ou au sol. polygone, en tant qu'entrées dans le modèle (Figure 2-2). De plus, cela facilite l'extraction des paramètres d'entrée et visualise les résultats (Di Luzio et al, 2002).

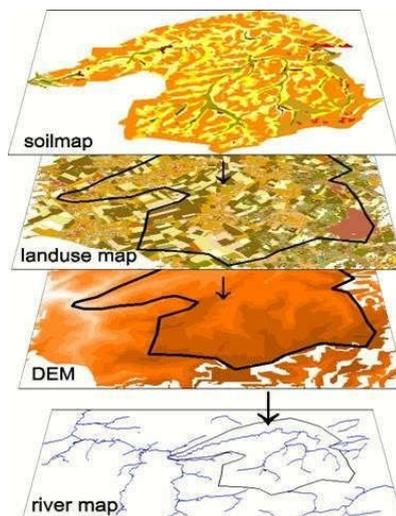
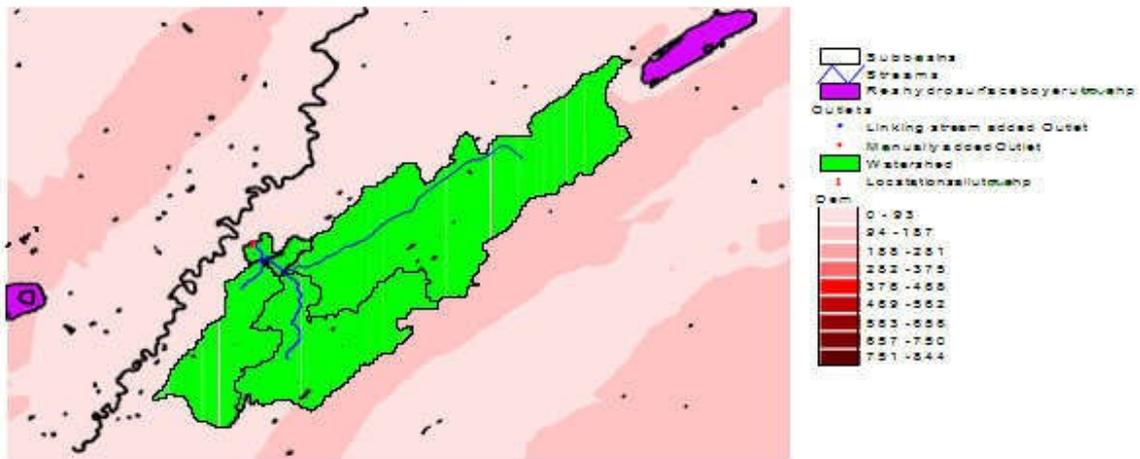


Figure 3-1: Les différents thèmes de cartes requis en entrée de SWAT (Holvoet et al. 2005)

Les bassins versants sont séparés en sous-bassins, dont chacun contient une partie majeure. Par exemple, la figure 2-3 illustre la délimitation dans le sous-bassin du site de Portage Creek.

Figure 3-2 : Délimitation en sous-bassins du bassin versant Ruisseau du Portage
(Rasolomanana, 2012)



Dans les sous-bassins, une combinaison unique d'utilisations du sol, de pratiques culturales et de types de sol forment des unités de calcul homogènes appelées unités de réponse hydrologique (UHR) (Figure 2-4).

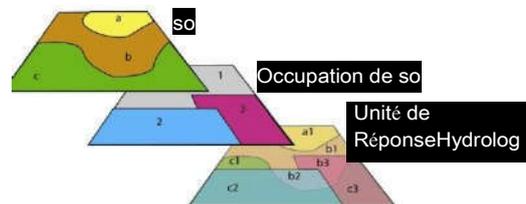


Figure 3-3 : Principe de délimitation des Unités des Réponse Hydrologique (URH)
(Rasolomanana, 2012)

Les informations sont classées en fonction de l'échelle spatiale ou de la nature des données: bassins, sous-bassins, URH, climat, propriétés physiques et chimiques du sol, gestion des sols, écoulement souterrain, qualité de l'eau, réservoirs / marais / dépressions, principaux chenaux, affluents et sources ponctuelles. La modélisation des processus terrestres conduisant à des bilans hydriques, sédimentaires et nutritifs a été réalisée à l'échelle URH. La contribution de chaque unité est ensuite transmise au client. Par la suite, des processus fluviaux sont entrés en jeu, acheminant ces entrées vers les principaux points de vente du bassin (Rasolomanana, 2012).

1 Processus modélisés

SWAT modélise deux phases: La première phase est la phase terrestre du cycle hydrologique et

contrôle la quantité de charges d'eau, de sédiments, de nutriments et de pesticides rejetées dans le canal principal de chaque sous-bassin. Le second est le transport aquatique, c'est-à-dire le mouvement de l'eau, des sédiments, des nutriments et d'autres éléments à travers le réseau hydrographique, du bassin au débouché. Une brève description de la modélisation de ces processus terrestres et fluviaux par SWAT sera présentée dans les paragraphes suivants (Rasolomanana, 2012) :

1.1 Phase terrestre

Selon la littérature théorique (Neitsch et al, 2005), le processus d'évaluation du volume d'eau SWAT comprend les précipitations, l'évapotranspiration, le ruissellement de surface, l'écoulement sous la surface ou latéral et le ruissellement sous la surface. Après le pas de temps de chaque jour, la simulation de cette phase terrestre repose sur le bilan hydrique suivant: où SW_t représente la teneur en humidité finale (mmH₂O), SW_0 représente la teneur en humidité initiale (mmH₂O) le jour i , t) et R_{day} est indiqué le jour i . De précipitations (mmH₂O), ruissellement de surface (mmH₂O) le jour i de Q_{surf} , évapotranspiration (mmH₂O) le jour i de E_a , pour observer la quantité d'eau entrant dans la zone d'infiltration du profil du sol le jour i (mmH₂O) et Q_{gw} Débit de retour du jour (mmH₂O). Cette section décrit également les processus les plus importants des sédiments et du phosphore. Mentionnez uniquement le processus du site étudié.

Quand il pleut, vous pouvez le garder sur la canopée ou à la surface du sol. L'eau à la surface du sol s'infiltré dans la couche de sol et l'excès d'eau s'écoule à travers. Les eaux de ruissellement se déversent dans les chenaux des rivières, tandis que les infiltrations peuvent être retenues dans le sol puis évaporées ou contribuer au ruissellement de surface des eaux souterraines. Le mouvement de l'eau sous-jacent est illustré à la figure 2-5.

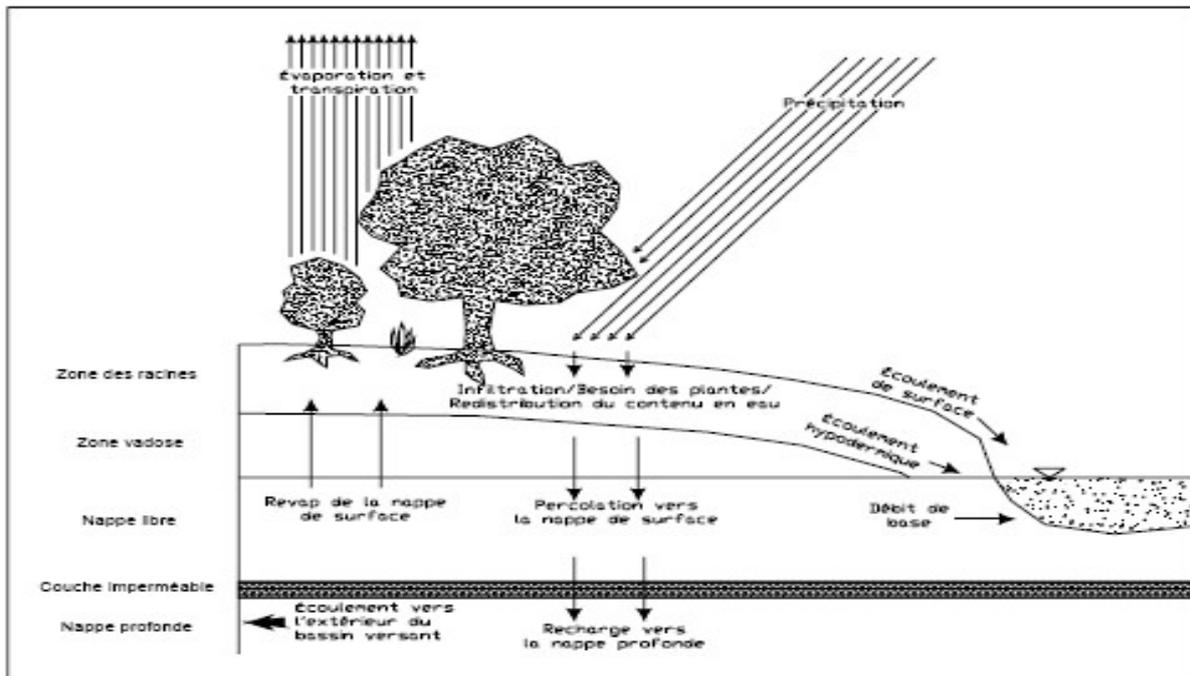


Figure 2-5: Représentation schématique du cycle hydrologique dans SWAT (Rasolomanana, 2012)

La région racinaire, également connue sous le nom de profil de sol ou de réservoir de sol, est l'endroit où se produisent la plupart des processus d'échange verticaux. La zone racinaire est divisée plus finement en couches de sol pour permettre l'inclusion d'une hétérogénéité entre les différentes couches de sol. Ces couches sont caractérisées par certaines propriétés de base telles que le pourcentage de sable, d'argile et de limon, leur texture, le pourcentage de carbone, la conductivité hydraulique (K_{sat}) et la teneur en humidité effective (AWC). La zone d'infiltration est la transition entre le profil du sol et le système d'eau souterrain. Le système d'écoulement des eaux souterraines est constitué d'eaux souterraines libres (également appelées eaux de surface), qui facilitent l'écoulement dans la rivière, tandis que les eaux profondes ne facilitent pas l'écoulement dans la rivière. L'aquifère profond peut être considéré comme une extension du niveau des eaux de surface, mais ces quantités d'eau ne peuvent alimenter la rivière. Les feuilles profondes et libres sont séparées par une couche imperméable. Dans la version 2005 de SWAT, la profondeur de la couche imperméable a été fixée à 6 m (Rasolomanana, 2012).

L'eau stockée par canopie

L'eau stockée par la canopée est définie comme étant l'eau interceptée et retenue par les feuilles des plantes (canopée) et ensuite disponible pour l'évaporation (Rasolomanana, 2012).

1.2 Infiltration

L'infiltration est définie comme le processus par lequel l'eau pénètre dans le profil du sol à partir de la surface du sol. À mesure que l'eau pénètre, le sol devient humide jusqu'à ce qu'il atteigne un état stable appelé saturation. La perméabilité initiale du sol dépend de sa teneur en humidité (Rasolomanana, 2012).

1.3 Redistribution

La redistribution est le mouvement continu de l'eau à travers le profil du sol après que l'eau ait cessé (par les précipitations ou l'irrigation) de pénétrer dans la surface du sol. Cela est dû à la différence de teneur en eau dans le profil. Une fois que l'eau est uniformément distribuée selon un profil donné, la redistribution s'arrête. Lorsque la capacité de champ électrique de la couche de sol et de la couche non saturée inférieure est dépassée, une infiltration ou un écoulement vers la partie inférieure se produit. La vitesse dépend de la conductivité saturée de la couche de sol. La redistribution est également affectée par la température du sol. La redistribution n'est pas autorisée à 0 ° C ou moins (Rasolomanana, 2012).

1.4 Évapotranspiration

L'évapotranspiration désigne les processus par lesquels l'eau à l'état liquide et solide devient de la vapeur d'eau atmosphérique à la surface du sol. Cela inclut l'évaporation des lacs, des rivières, des sols nus, à travers les feuilles des plantes (transpiration) et la sublimation des surfaces glacées et enneigées. Le modèle calcule séparément l'évapotranspiration des sols et des plantes, comme spécifié par Ritchie (1972). L'évaporation potentielle du sol est estimée sur la base de l'évapotranspiration potentielle et de l'indice de surface foliaire (surface du feuillage de la plante par rapport à la surface de l'URH). L'évapotranspiration potentielle est la vitesse à laquelle l'évapotranspiration se produirait dans une vaste zone complètement et uniformément recouverte de végétation et disposant d'un accès illimité à une source d'approvisionnement en eau. Le modèle offre trois options pour estimer l'évapotranspiration potentielle : Hargreaves (Hargreaves et al. 1985), Priestley-Taylor (Priestley et Taylor 1972) et Penman- Monteith (Monteith 1965).

1.5 Écoulement latéral

Le flux latéral est la contribution au flux de la rivière allant de la surface au-dessus des eaux saturées. Calculez le flux latéral (0-2m) dans le profil du sol lors de la redistribution. Les modèles de stockage cinématiques permettent de prédire les écoulements latéraux dans chaque

couche de sol et de prendre en compte les changements de conductivité, de pente et de teneur en eau. Ruissellement de Le ruissellement de surface est défini comme l'écoulement qui se produit le long d'une surface inclinée. Cela commence lorsque le taux d'alimentation en eau du sol dépasse le taux d'infiltration, c'est-à-dire lorsque le sol est saturé d'eau. . Utiliser la précipitation SWAT pour simuler le volume et le débit de chaque unité HRU Tous les jours ou tous les jours. Swat a proposé la méthode de numérotation des courbes SCS (SCS 1972) pour évaluer le ruissellement en surface. Préparé comme suit (SCS 1972):

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0.2S)^2}{(R_{day} + 0.8S)} \quad (\text{Équation 2-3})$$

Où Qsurf est le ruissellement cumulatif ou les précipitations excédentaires (mmH₂O), Rday est le niveau de précipitations du jour en cours (mmH₂O), Ia représente le stockage de surface initial, l'interception et l'infiltration avant le ruissellement, et S le paramètre de rétention qui change spatialement en raison des modifications du sol. Les modifications de la teneur en eau du sol ont entraîné des modifications du sol, de l'utilisation des sols, de la gestion des sols, de la pente et du temps. Le ruissellement ne se produit que lorsque Rday > Ia. Approximativement 0.2S, l'équation SCS devient:

Dans SWAT2005, l'utilisateur peut choisir deux méthodes pour calculer les paramètres de rétention S. La méthode traditionnelle consiste à modifier les paramètres de rétention en fonction de la teneur en humidité du profil de sol. Une méthode alternative ajoutée dans SWAT2005 permet aux paramètres de rétention de varier en fonction de l'évapotranspiration cumulative de la plante. La deuxième méthode a été ajoutée parce que la méthode d'humidité du sol prédit un ruissellement excessif dans des sols très superficiels. En calculant le nombre de courbes de variation journalières en fonction de l'évapotranspiration de la plante, cette valeur dépend moins de la rétention d'humidité dans le sol que du climat. Lorsque les paramètres de rétention varient en fonction de la teneur en humidité du sol, l'équation suivante est utilisée (Rasolomanana, 2012):

Où S est le paramètre de rétention (mmH₂O) pour une date donnée, Smax est la valeur maximale (mmH₂O) que le paramètre de rétention peut être pour une date donnée et SW est la teneur en humidité du sol le long du profil, à l'exclusion de la courbe de profil flétri (MmH₂O), w1 et w2 sont les dimensions. Le SCS définit trois conditions d'humidité: I-sec (point humide), II-humidité moyenne et III-humidité (capacité en eau de champ). La détermination de w1 et w2 est la suivante (Rasolomanana, 2012):

$$w_1 = \ln\left[\frac{FC}{1 - S_3 \cdot S_{\max}^{-1}} - FC\right] + w_2 \cdot FC \quad (\text{Equation 2-5})$$

$$w = \frac{(\ln\left[\frac{FC}{1 - S_3 \cdot S_{\max}^{-1}} - FC\right] - \ln\left[\frac{SAT}{1 - 2.54 \cdot S_{\max}^{-1}} - SAT\right])}{(SAT - FC)} \quad (\text{Equation 2-6})$$

$$S = S_{prec} + E_0^* \exp\left(\frac{-cncoef - S}{S_{\max}} - R_{day} - Q_{surf}\right) \quad (\text{Équation 2-7})$$

Où w_1 est le premier facteur de forme, w_2 est le deuxième facteur de forme, FC correspond à la quantité d'eau dans la capacité du champ électrique (mmH₂O), les paramètres de rétention S_3 correspondent au nombre de courbes dans la condition d'humidité III et les paramètres de rétention S_{\max} correspondent aux paramètres dans la condition d'humidité I et SAT Le nombre de courbes est la teneur en humidité (mm H₂O) dans le sol lorsque celui-ci est complètement saturé. Lorsque les paramètres de rétention changent avec l'évapotranspiration d'une plante, ils peuvent être mis à jour à la fin de la journée à l'aide de la formule suivante (Rasolomanana, 2012):

Définissez le paramètre de rétention (mmH₂O) pour une date donnée, définissez le paramètre de rétention (mmH₂O) pour le jour précédent et E_0 correspond à l'évapotranspiration potentielle (mmH₂O.j-1) pour une date donnée, le poids utilisé pour calculer le coefficient de rétention de la courbe d'évapotranspiration de chaque jour. Le S_{\max} maximum pouvant être atteint dans une journée donnée (mmH₂O), le ruissellement cumulé de Q_{surf} ou les précipitations excessives (mmH₂O) et la hauteur de précipitation (mmH₂O) le jour de la journée. La valeur initiale du paramètre de rétention est $S = 0.9 \cdot S_{\max}$. Dans les fichiers d'entrée et de sortie SWAT, le numéro de la courbe CN est utilisé à la place du paramètre S réservé. Ces deux paramètres sont liés par l'équation suivante (Rasolomanana, 2012):

$$CN = \frac{25400}{S + 254} \quad (\text{Équation 2-8})$$

S est le paramètre de rétention journalière (mmH₂O) et CN le nombre de courbes journalières (-). SWAT utilise une version modifiée d'une méthode raisonnable pour la prévision SWAT. Le ruissellement maximal est utilisé pour prévoir les rejets de sédiments et repose sur l'hypothèse selon laquelle, si la précipitation d'intensité i commence instantanément et se poursuit indéfiniment, le ruissellement augmentera jusqu'au moment de la concentration $t = t$,

moment auquel l'ensemble du bassin de la zone contribue Débit d'eau à la sortie. Écrire des formules rationnelles (Rasolomanana, 2012):

$$q_{pointe} = \frac{C_{ruiss} f \times i \times Aire}{3.6} \quad (\text{Équation 2-9})$$

$$q_{pointe} = \frac{\alpha_{tc} \times Q_{surf} \times Aire}{3.6 \times t_{conc}} \quad (\text{Équation 2-11})$$

Parmi eux, le taux de ruissellement le plus élevé (m³.s⁻¹), le coefficient de ruissellement de croisière (-), l'intensité des précipitations (mm / h), la superficie du bassin versant (km²) et le facteur de conversion de 3,6. La formule de calcul de Cruiss est la suivante: Dans la formule rationnelle modifiée, le débit de pointe est fonction de la proportion de diminution des précipitations quotidiennes pendant le temps de concentration, le débit quotidien et le temps de concentration du sous-bassin. La formule de Manning est utilisée pour estimer le temps de concentration du sous-bassin en prenant en compte l'écoulement en surface et dans le chenal. Par conséquent, la formule rationnelle modifiée devient (Rasolomanana, 2012):

Avec c

la fraction de précipitation journalière tombant durant le temps de concentration

(-), t_{conc} le temps de concentration du sous-bassin (h).

1.6 Érosion

Dans le bassin, les sédiments sont entraînés par l'érosion causée par les précipitations et le ruissellement. Estimation de l'érosion pour chaque URH au moyen de l'équation de perte d'équation universelle (équation modifiée UniversalSoilLoss ou MUSLE) (Williams 1975)

$$sed = 11.8(Q_{surf} \cdot q_p \cdot aire_{urh})^{0.56} \cdot K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot LS_{USLE} \cdot CFRG \quad (\text{Équation 2-12})$$

Débit de sédiments diurne (tonne / jour), ruissellement de surface Q_{surf} (mm H₂O / ha), écoulement de ruissellement q_p (m³ / s), zone URH dans la zone urh (ha), érodibilité K_{USLE} (0,013 tonne.m². h / m³.tonne.cm), facteur de culture C_{USLE} (végétation) et gestion (-), facteur de protection P_{USLE} (-), facteur de longueur et de pente LS_{USLE} (-) et CFRG, facteur de fragmentation totale (-) (Rasolomanana, 2012).

L'équation prédit le taux d'érosion annuel moyen à long terme de la pente d'un champ en fonction des régimes de précipitations, des types de sol, de la topographie, de la rotation des cultures et des pratiques de gestion des cultures. Chaque facteur est décrit à l'annexe 1.9. Couverture de neige La couverture de neige réduit l'érosion du ruissellement et des précipitations. Lors de la présence de neige dans URH, SWAT a modifié le calcul des sédiments avec la relation suivante (Rasolomanana, 2012):

$$\underline{sed} = \frac{sed'}{\left[\frac{3.SNO}{25.4} \right]} \quad (\text{Équation 2-13})$$

avec \underline{sed} le flux de sédiments d'un jour donné (tonne/jour), sed' le flux de sédiments calculé avec MUSLE (tonne /jour) et SNO la teneur en eau de la neige (mmH2O).

1.7 Influence du temps de réponse du ruissellement de surface dans le calcul des sédiments

Dans les sous-ruisseaux où le temps de concentration est supérieur à un jour, seule une partie du ruissellement atteint le débit de l'eau le jour où elle se produit. Par conséquent, étant donné que les sédiments dépendent du ruissellement en surface, SWAT prend en compte ce temps de réponse lors du calcul des flux de sédiments (Rasolomanana, 2012):

$$\underline{sed} = \left(\underline{sed}' + \frac{Se_{stort-1}}{d} \right) \left(1 - \exp \left[-\frac{surlag}{t_{conc}} \right] \right) \quad (\text{Équation 2-14})$$

\underline{sed} désigne la quantité de sédiment (tonne / jour) rejetée dans le circuit principal ce jour-là, la quantité de sédiment (tonne / jour) produite par \underline{sed}' SSU au cours d'une journée donnée, se_{stort} , le sédiment (tonne / jour) stocké la veille , Le facteur de récupération (-) du temps de réponse au ruissellement et le temps de concentration (h) de URH. Pour les petits bassins versants avec moins d'un jour de concentration, la quantité de sédiment libérée dans le courant principal un jour donné est la quantité de sédiment (tonnes / jour) produite par REU un jour donné. . Les sédiments sont entraînés non seulement par les eaux de ruissellement, mais également par les écoulements latéraux et souterrains (Rasolomanana, 2012).

\underline{sed} désigne la quantité de sédiment (tonne / jour) rejetée dans le circuit principal ce jour-là, la quantité de sédiment (tonne / jour) produite par \underline{sed}' SSU au cours d'une journée donnée, se_{stort} , le sédiment (tonne / jour) stocké la veille , Le facteur de récupération (-) du temps de

réponse au ruissellement et le temps de concentration (h) de URH. Pour les petits bassins versants avec moins d'un jour de concentration, la quantité de sédiment libérée dans le courant principal un jour donné est la quantité de sédiment (tonnes / jour) produite par REU un jour donné. Les sédiments sont entraînés non seulement par les eaux de ruissellement, mais également par les écoulements latéraux et souterrains (Rasolomanana, 2012).

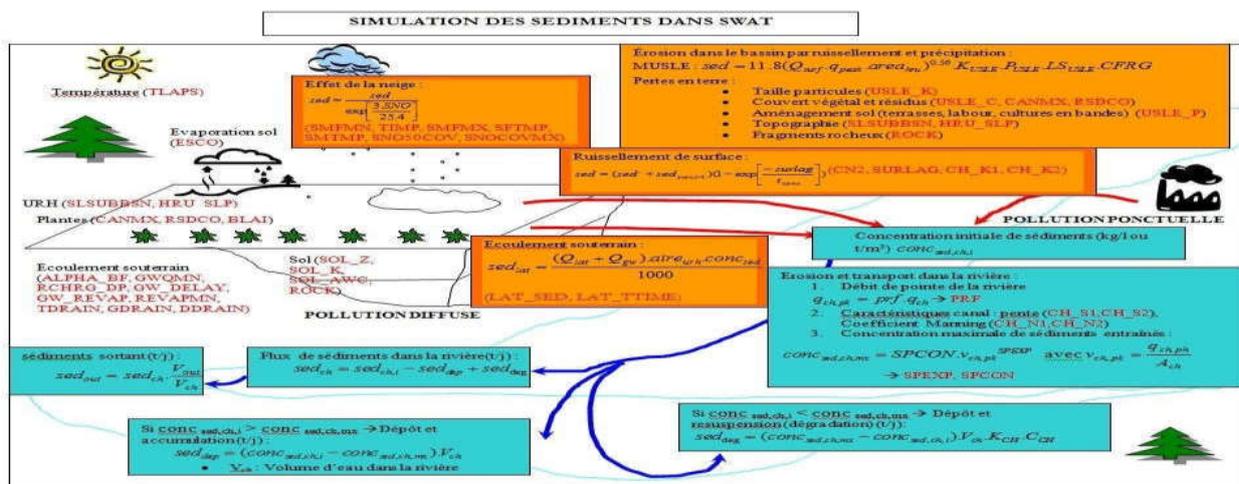
1.8 Sédiments dans les écoulements latéraux et souterrains

La quantité de sédiments apportée par les écoulements latéraux et souterrains est déterminée par :

$$sed_{lat} = \frac{(Q_{lat} + Q_{gw}) \cdot aire_{urh} \cdot conc_{sed}}{1000} \quad \text{(Equation 2-15)}$$

Où sed_{lat} est la quantité de sédiment (tonnes / jour) dans les flux latéraux et souterrains, Q_{lat} est le flux latéral (mmH20) un jour donné, Q_{gw} est le flux souterrain (mmH20) un jour donné et la surface de la HRS dans l'air (km2) Concentrations de sédiments dans les cours d'eau latéraux et souterrains (mg / l). Toutes les équations de ces sédiments sont résumées aux figures 2 à 6. Une description des paramètres impliqués dans chaque processus entre parenthèses est jointe à l'annexe 1 (Rasolomanana, 2012).

Figure 2-6: Simulation des sédiments dans SWAT



2 Phase aquatique

Une fois que les équipes SWAT ont déterminé le débit, les sédiments, les nutriments et les pesticides du chenal principal, la prochaine étape est le transport fluvial. L'équipe SWAT a non seulement maintenu le flux massique de ces éléments dans la rivière, mais a également simulé tous les processus de transformation lorsqu'ils se déplaçaient dans l'eau. La figure 2-9 illustre les différents processus impliqués dans un cours d'eau (Rasolomanana, 2012).

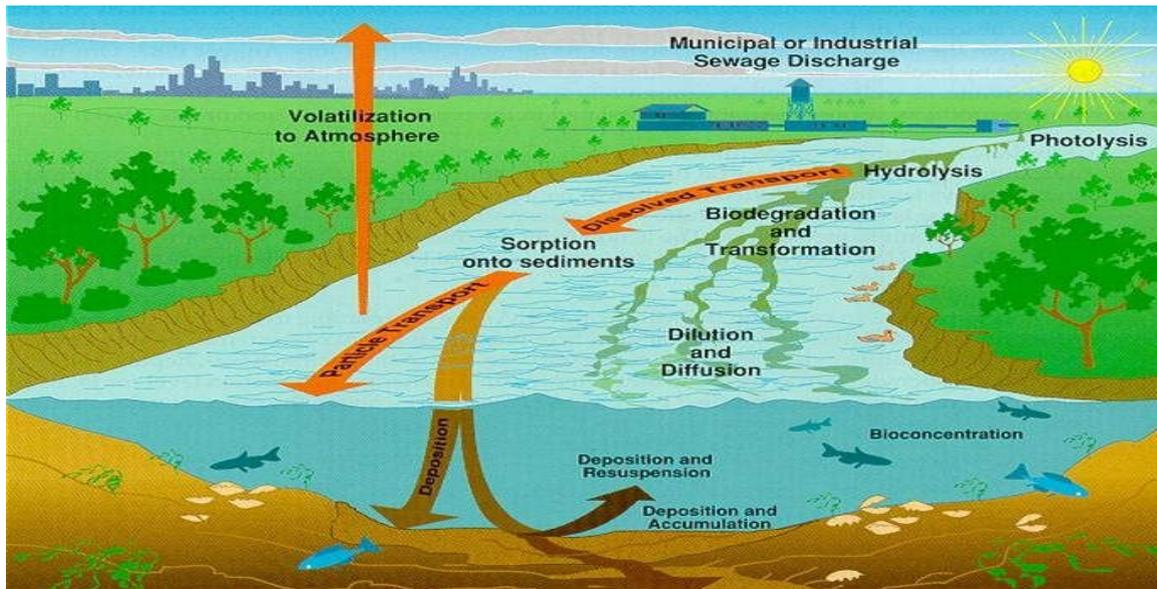


Figure 2-9 : Processus dans le cours d'eau (Neitsch et al, 2005)

2.1 Transport des sédiments dans le cours d'eau

SWAT a utilisé la même taille de canal pendant la simulation pour simuler deux processus dans le cours d'eau: la sédimentation et la dégradation des sédiments. Compte tenu du changement de la section de la rivière, SWAT peut également simuler ces deux processus le long de la rivière, mais cette option n'a pas été considérée dans l'étude. En fait, la modification de la taille du canal dans le temps est une nouvelle option testée dans SWAT, et l'option recommandée consiste à laisser la taille du canal inchangée. Estimation du transport des sédiments en utilisant l'équation de Bagnold (1977), qui détermine la relation entre la dégradation et la pente du canal et la vitesse du courant (Rasolomanana, 2012):

$$conc_{sed, ch, mx} = c_{csp} \cdot v_{ch, pk}^{csp} \quad (\text{Équation 2-21})$$

$$\text{avec } v_{ch, pk} = \frac{q_{ch, pk}}{A_{ch}} \quad (\text{Équation 2-22})$$

$$\text{et } q_{ch, pk} = prf \cdot q_{ch} \quad (\text{Équation 2-23})$$

Parmi eux, ch, mx est la concentration maximale de sédiment pouvant être transportée par le débit d'eau (t / m^3 ou kg / l), csp est un coefficient défini par l'utilisateur (-), $v_{ch, pk}$ est la vitesse maximale (m / s) dans le chenal, $q_{ch, pk}$ représente la vitesse de pointe du canal (m^3 / s), le coefficient de correction de pointe (-) est préférable et q_{ch} représente la vitesse moyenne du canal (m^3 / s) (Rasolomanana, 2012).

Déposition et suspensions des sédiments

Le bilan des sédiments dans le canal pour une période donnée est présenté comme

1. Si $conc_{sed, ch, i} > conc_{sed, ch, mx}$: Il y a déposition et elle est calculée par :

$$sed_{dep} = (conc_{sed, ch, i} - conc_{sed, ch, mx}) \cdot V_{ch} \quad (\text{Équation 2-25})$$

où sed_{dep} la quantité de sédiments déposée dans le canal (t/j) et V_{ch} le volume d'eau dans le canal (m^3 d' H_2O)

2. Si $conc_{sed, ch, i} < conc_{sed, ch, mx}$: Il y a resuspension et elle est déterminée par :

$$sed_{deg} = (conc_{sed, ch, mx} - conc_{sed, ch, i}) \cdot V_{ch} \cdot K_{CH} \cdot C_{CH} \quad (\text{Équation 2-26})$$

où K_{CH} est le facteur d'érodibilité du canal ($cm/h/Pa$) et C_{CH} le facteur de couverture du canal (-).

Finalement, la quantité de sédiments transportés en dehors du canal, sed_{out} , est calculée sed_{ch} est la quantité totale de sédiment en suspension dans le canal (t / m^3), sed_{ch} est la quantité de sédiment en suspension dans le canal au début du cycle (t / m^3), la quantité de sédiment dans le canal d'absorption (t / m^3), et de sed_{deg} La quantité de sédiment (t / m^3) dégradée ou en suspension dans la section du chenal. La sédimentation et la remise en suspension de la quantité de sédiment est basée sur une comparaison du ch sédiment initial ch, i dans le canal cassé et de la concentration maximale de sédiment que le fleuve peut transporter (voir Équation 2-6). (Rasolomanana, 2012).

$$sed_{out} = sed_{ch} \frac{V_{sort}}{V_{ch}}$$

(Équation 2-27)

Où V_{sort} est la quantité d'eau sortant dans le pas de temps ($m^3 H_2O$) et V_{ch} est la quantité d'eau dans la section du canal ($m^3 H_2O$). Ces processus sont résumés à la figure 2-6. Quant au phosphore, une fois déversé dans la rivière, il poursuivra son cycle de conversion.

2.4.2.2.1 Processus de transformation du phosphore dans l'eau

Le modèle de transformation des éléments nutritifs dans les cours d'eau utilise l'équation QUAL2E (Brown et Barnwell, 1987). Facultatif en SWAT. Les équations correspondantes sont données en annexe 1. Notre étude ne modélise pas le cycle du phosphore dans les rivières, car le processus de conversion des rivières est négligeable par rapport aux processus terrestres dans les petits bassins versants (Rasolomanana, 2012).

Chapitre IV Applications de SWAT et Analyse de sensibilité du modèle

4.1 Principales catégories d'applications

- □ Depuis dix ans, les applications SWAT se sont répandues dans le monde entier. Plusieurs de ces mesures ont été prises pour répondre aux besoins de diverses agences gouvernementales, notamment des États-Unis et de l'Union européenne. Ils veulent évaluer l'impact de l'activité humaine, du changement climatique et de nombreux autres impacts sur les ressources en eau, ou tester le fonctionnement du modèle pour de futures applications potentielles. Parmi ces projets, on peut dire (Arnold et Fohrer, 2005): Aux États-Unis: -EPA TMDL: Grâce à BASINS (meilleure évaluation des sources scientifiques intégrées et non ponctuelles), le SWAT est utilisé Identifier les meilleures pratiques agricoles pour chaque TMDL définie par l'EPA (Environmental Protection Agency). BASINS est un système d'évaluation environnementale polyvalent qui intègre des systèmes d'information géographique (SIG), des bases de données nationales sur les bassins fluviaux, ainsi que les derniers outils de recherche et de modélisation en matière d'environnement dans un seul logiciel (Rasolomanana, 2012).

Projet HUMUS (projet de services hydrologiques américains): le Service de conservation des ressources naturelles (NRCS) utilise le SWAT pour les évaluations de la conservation des ressources basées aux États-Unis. -NOAA (Inventaire national des émissions de polluants côtiers) applique SWAT aux comtés côtiers pour simuler le ruissellement, les réservoirs et les sources de pollution dans les bassins côtiers. -Les scientifiques du NRCS et du Texas A & M utilisent SWAT pour déterminer l'impact du contrôle du «bush» sur l'approvisionnement en eau de huit bassins du Texas (Bednarz et al, 2002).

Au niveau mondial: - Dans 17 bassins hydrographiques en Europe, le projet EUROHARP (Schoumans et Silgram, 2003) a évalué 9 outils de modélisation, dont SWAT, afin de simuler la perte d'éléments nutritifs dans les eaux de surface et côtières. -Le projet BMW (modèle de référence de la directive-cadre sur l'eau) de 2002 à 2004 teste SWAT pour mettre en œuvre les directives européennes dans le secteur de l'eau. - De 1998 à 2000, dans le cadre du projet CHES (climat, chimie de l'eau et économie des systèmes d'eau de surface) 11, SWAT a exploré l'impact du changement climatique sur la qualité des eaux de rivières en Europe.

-En Allemagne, SWAT analyse l'impact du changement d'affectation des sols sur l'eau des montagnes et le cycle des éléments nutritifs dans le cadre d'un projet de recherche conjoint du SFB depuis 1997 (Fohrer et al., 2002). Dans différentes situations à travers le monde, d'autres

applications SWAT plus spéciales ont également été développées et validées. Gassman et al. (2007) Divisez-les en 8 catégories selon le tableau 2-2, qui répertorie les études utilisant SWAT dans chaque catégorie.

Tableau 2-2 : Vue d'ensemble des principales catégories d'application de SWAT rapportées dans la littérature

Catégorie principale d'application	Hydrologie seulement	Hydrologie et exportations de polluants	Exportations de polluants seulement
Calibration et/ou analyse de	15	20	2
Impacts des	22	8	--
Descriptions de l'interface SIG	3	3	2
Évaluations hydrologiques	42	--	--
Effets des variations de configuration ou des entrées	21	15	--
Comparaison avec d'autres modèles ou techniques	5	7	1
Interface avec d'autres modèles	13	15	6
Évaluations des polluants	--	57	6

4.1.1 Facteurs déterminants de la performance du modèle

Ces applications, réalisées sur différents types de bassins, à différentes échelles et à différents pas de temps, ont permis de mettre en évidence les facteurs influençant la performance du modèle (de la taille du bassin versant, l'incertitude des données, le pas de temps de la simulation, la simulation périodes et conditions climatiques, les processus internes du modèle) ainsi que les approches de calibration considérées, les performances obtenues et enfin l'évolution du modèle.

Taille des bassins versants

Le modèle a été conçu à l'origine pour simuler l'impact des pratiques agricoles sur des bassins vastes et complexes (Neitsch et al., 2002). Comme Gassman et al. (2007), les statistiques confirment que 65% des applications SWAT dans des zones de captage comprises entre 6,5 et 11 700 km² ont été effectuées dans de vastes zones de captage (plus de 100 km²). Pour les petites piscines, telles que la capacité du SWAT2005 à simuler le ruissellement, les nutriments provenant de six petits bassins hydrographiques au Texas ont été évalués à des intervalles mensuels et quotidiens (Green et van Griensven, 2008). Ainsi, un très bon débit journalier et mensuel a été obtenu (NS à environ 0,8), avec une surestimation du ruissellement sec et une sous-estimation pendant la période humide. Pour les sédiments et les nutriments évalués mensuellement, la performance est bonne (NS > 0,4) à l'exception de N-NO₃. Ils ont conclu que SWAT2005 est applicable dans une

mesure limitée. D'autres études ont été menées dans le monde entier pour évaluer la capacité de SWAT à simuler des rivières et des sédiments et à concevoir des scénarios de gestion de l'eau à petite échelle (Rasolomanana, 2012).

Incertitude des données

L'obtention de bonnes performances de simulation dépend principalement d'une bonne qualité des données, ce qui réduit les sources d'incertitude. En effet, faute de stations pluviométriques, les performances sont médiocres lorsque les précipitations sont insuffisantes (Cao et al., 2006; Conan et al., 2003; Bouraoui et al., 2002; Bouraoui et al., 2005). . . Variabilité d'autres données climatiques, telles que la température et le rayonnement solaire (Shirmohammadi et al, 2006) et des données inexactes (Rasolomanana, 2012).

L'incertitude de mesure des données sur la qualité de l'eau est provoquée par quatre types de procédures: mesure du débit, échantillonnage, conservation des échantillons et analyse en laboratoire. Dans le pire des cas, l'échantillonnage et les tests de laboratoire génèrent plus d'incertitude que la mesure du débit et la rétention de l'échantillon. La plus grande incertitude est la très faible concentration. Dans des cas typiques, l'échantillonnage est la plus grande source d'incertitude en raison de l'effet cumulatif des erreurs potentielles associées à un seul seuil d'échantillonnage et à un flux automatique. Dans le meilleur des cas, les estimations de l'incertitude pour chaque catégorie sont inférieures à 5% (Rasolomanana, 2012).

Si l'incertitude est accumulée à partir des quatre sources d'erreur potentielles d'écoulement, de charge en éléments nutritifs et de sédiments, dans des conditions typiques, la plage d'erreur pour les éléments nutritifs solubles est comprise entre 8% et 104%, et la valeur d'erreur pour les solides entre 7% et 53%. %, Et 117% à 421.%. Dans le pire des cas. L'erreur estimée du débit est faible, généralement de 6% à 19% et, dans le pire des cas, de 42% seulement. Les erreurs de mesure des sédiments sont généralement inférieures aux erreurs de mesure des éléments nutritifs car la qualité des sédiments n'est pas affectée par les changements post-récolte. Dans le pire des cas, la précision de la mesure de la faible concentration est difficile (Rasolomanana, 2012), de sorte que la concentration du composant dissous est la plus incertaine dans le pire des cas. En raison du manque de données, du manque d'hypothèses d'estimation des données et des erreurs de saisie et de gestion des données, le traitement des données peut également générer une incertitude dans les données de mesure.

Pas de temps d'évaluation de la performance du modèle

Nécessaire pour minimiser les incertitudes dans la mesure du débit, en particulier pour les

courants irréguliers et les berges instables (Harmel et al., 2006). Dans cet esprit, Abbaspour et al. (2007) ont démontré que la fonction objectif fournit de meilleurs résultats en mesurant quotidiennement et en continu le débit, les sédiments et les éléments nutritifs. Dans la plupart des applications utilisant le SWAT, une série d'écoulements quotidiens peut être utilisée, mais malheureusement, ce n'est pas le cas pour les variables de qualité de l'eau. En fait, les données sur la qualité de l'eau sont discontinues et largement espacées, avec peu de mesures quotidiennes. Des mesures ne peuvent même pas être prises dans certains cas (Heuvelmans et al, 2005; Migliaccio et Chaubey, 2008) (Rasolomanana, 2012).

Pour remédier au manque de données sur la qualité de l'eau, certains utilisateurs ont comblé le vide en interpolant linéairement les données et en supposant que les débits et les concentrations de qualité de l'eau antérieurs étaient présents (Benaman et al., 2005).). Ou une analyse de régression basée sur logiciel basée sur la relation concentration / flux d'expression. Par exemple, Michaud et ses collaborateurs ont utilisé le logiciel FLUX 5.0 (Walker 1998). Jha et autres (2005) et le logiciel LOADEST (Runkel et autres, 2004; Cohn et autres, 1989; Crawford, 1991; Crawford, 1996). (2006), Migliaccio et Chaubey (2008) et Capel et al. (2008) (Rasolomanana, 2012).

L'avantage de ces méthodes est qu'elles fournissent des résultats rapides avec un minimum d'effort et de données (Mihalik 2007). Cependant, il ne s'agit que d'une estimation approximative des charges en sédiments et en éléments nutritifs, mais son pouvoir prédictif est limité (Shoemaker et al, 1997). Par exemple, le processus d'estimation de la charge du modèle LOADEST est compliqué par la conversion de biais, la révision des données et la non-normalité. Il existe également une incertitude et la charge transitoire est sous-estimée de près de 50% (Jha et al, 2006) (Rasolomanana, 2012).

Selon l'étude SWAT identifiée par Gassman et al. (2007), l'évaluation de la performance la plus couramment utilisée est mensuelle et quotidienne (par exemple Saleh et al., 2000; Santhi et al., 2001; Yuan et al., 2001; Sands et al., 2003; Van Liew et Garbrecht, 2003; Chu et al., 2004, Saleh et Du 2004, Bracmort et al 2006, Singh et al 2005 et Van Liew et al 2007). Dans certaines évaluations annuelles (Gupta et al, 1999; Shirmohammadi et al., 2001; Reyes et al., 2004), une seule étude utilisait des évaluations hebdomadaires (Narasimhan et al., 2005). Pour référence, une liste d'études de Gassman et al. (2007), pour les sédiments, 30% par jour, 63% par mois, 7% par an et 27% par jour pour le phosphore, 68% par mois et 5% par an (Rasolomanana, 2012).

En règle générale, les performances du modèle seront plus faibles sur des intervalles de

temps plus courts (par exemple, tous les jours, tous les mois ou tous les ans) (Engel et al, 2007). Cette situation peut s'expliquer par l'incertitude des données (Bouraoui et al, 2002) et la simulation de la dynamique des polluants (Bärlund et al, 2007). Les bonnes performances quotidiennes des SS et des nutriments sont particulièrement rares en raison du manque de données (Muleta et Nicklow, 2005) et lorsqu'il est difficile d'obtenir des résultats quotidiens à des intervalles de temps quotidiens en raison du temps de réponse du patient. Pond (Benaman et al, 2005) (Rasolomanana, 2012).

Par exemple, Saleh et al. (2000) Après avoir évalué le SWAT dans le nord du bassin de Bosque, à une distance de 932,5 km² dans le nord du Texas, il s'est avéré que le volume mensuel des exportations de sédiments était très approprié pour les données mesurées, mais simulé quotidiennement. La valeur n'est pas idéale. En outre, la plupart des études ont conclu que le SWAT était un bon candidat pour le phosphore (Veith et al., 2005; Behera et Panda, 2006; Grizzetti et al., 2003; Bouraoui et al., 2004; Francos et al., 2001), et la performance a diminué. Si on y va. Chu et al. (2004) L'application du SWAT à Warner Creek, dans le Maryland, donne des résultats annuels satisfaisants, mais des résultats mensuels. Les niveaux de phosphore sont modérés. Bracmort attendit. (2006) et Arabi et al. (2006) ont constaté que le SWAT pouvait expliquer l'impact des meilleures pratiques de gestion sur les exportations de phosphore des deux bassins de l'Indiana et qu'il se comportait bien tous les mois. Par conséquent, les résultats des simulations SS et des nutriments satisfaisants sont généralement obtenus tous les mois ou tous les ans (Srinivasan et al., 1998; Santhi et al., 2001; Arnold et al., 1999; Jha et al., 2007; Arabi et al., 2006, White et Chaubey, 2005, Kirsch Et al., 2002, Behera et al., Panda 2006, Cheng et al., 2006, Bouaoui et al., 2005). Il convient de noter que l'évaluation de la performance du modèle (bonne, satisfaisante, etc.) est basée sur des critères de performance définis par Moriasi et al. (2007), décrit plus loin dans la section 2.5.3 (Rasolomanana, 2012).

4.1.1.1 Périodes de simulation et conditions climatiques

La performance du modèle dépend de la durée du cycle de simulation, des conditions climatiques et de la saison considérée. En fait, une performance plus médiocre est obtenue pendant une période d'étalonnage et de vérification relativement courte (Muleta et Nicklow, 2005). Gollamudi (2006) a modélisé le ruissellement, les sédiments, les nitrates et le phosphore dans deux bassins versants agricoles drainés artificiellement dans le bassin de Pike River, en montrant que les résultats sont plus fiables sur une base saisonnière et que les simulations quotidiennes sont plus fiables. . Et peut s'améliorer chaque Plusieurs mois en

utilisant des périodes d'étalonnage plus longues. En outre, SWAT a tendance à sous-estimer la valeur mensuelle du phosphore inorganique et total pendant les mois au cours desquels une grande quantité de phosphore est exportée, mais surestime le phosphore au cours des mois au cours desquels les exportations de phosphore sont faibles (Rasolomanana, 2012).

Van Liew et Garbrecht (2003) ont également évalué la capacité du SWAT à prévoir le ruissellement sous différentes conditions climatiques dans le bassin de la rivière Little Wahita, dans l'Oklahoma, sur 610 km². Ils ont constaté que le SWAT peut simuler un écoulement dans des zones sèches, complètement ou très humides. Cependant, Govender et Everson (2005) ont simulé les écoulements dans un petit bassin d'une superficie de 0,68 km² en Afrique du Sud, avec de meilleurs résultats les années sèches que les saisons des pluies. En revanche, Chu et Shirmohammadi (2004) ont constaté que le SWAT ne pouvait pas simuler des années de pluies extrêmes dans le bassin de 3,46 km² du Maryland. Lévesque (2007) a également conclu qu'en simulant de petits bassins versants agricoles au Québec, Portage Creek (21,41 km²) et Boyer Sud, il est difficile pour le modèle SWAT de coordonner les deux saisons. (20,62 km²), les îles Burnt (23,14 km²) et Bras d'Henri (49,13 km²). En effet, des performances hivernales satisfaisantes mènent à des surestimations drastiques des débits estivaux simulés (Rasolomanana, 2012).

4.1.1.2 Processus internes du modèle

Les processus modélisés par SWAT peuvent également limiter les bonnes performances car ils représentent toujours une représentation simplifiée de la réalité ou manquent de compréhension scientifique du processus (Gassman et al., 2007). Par exemple, SWAT utilise la méthode de numérotation des courbes SCS-CN (Services de protection des sols) pour évaluer le ruissellement. Dans de nombreux cas, cela a été prouvé avec succès. Cependant, ces événements ont été sous-estimés en raison de leur plus faible capacité à estimer le ruissellement de surface (Rasolomanana, 2012).

Les processus modélisés par SWAT peuvent également limiter les bonnes performances car ils représentent toujours une représentation simplifiée de la réalité ou manquent de compréhension scientifique du processus (Gassman et al., 2007). Par exemple, SWAT utilise la méthode de numérotation des courbes SCS-CN (Services de protection des sols) pour évaluer le ruissellement. Dans de nombreux cas, cela a été prouvé avec succès. Cependant, en raison de la faible capacité des événements extrêmes à estimer le ruissellement, l'incidence des événements est sous-estimée (Fohrer et al., 2002; Chanasyk et al., 2003; Bosch et al., 2004; Chu et al., 2005). Sous-estime de manière significative la quantité d'eau dans le drain

(Rasolomanana, 2012).

En outre, la méthode URH ignore également le flux et la trajectoire des polluants dans les petits bassins versants, ce qui constitue un vide dans la modélisation des polluants et traite ainsi l'impact de la même manière. Perte de polluants à n'importe quel endroit du sous-bassin versant. Par conséquent, comme indiqué par Bryant et al., L'atténuation de la pollution entre les sources d'eau et les cours d'eau n'est pas prise en compte. (2006) Sur le chemin du phosphore. Cette limitation de l'échelle URH affecte également la modélisation des pratiques agricoles, telles que la modélisation de certaines pratiques de conservation des sols et de l'eau, telles que les chenaux de gazon, les zones tampons. Mais Arabi, etc. (2008) ont prouvé que cette méthode était réalisable dans de petits bassins. Pour le transport des sédiments dans les cours d'eau, le programme correspondant utilise une équation relativement simple pour calculer la charge maximale pouvant être transportée en fonction du débit. Ces équations ne prennent pas en compte les caractéristiques du transport des sédiments, telles que le cisaillement du fond qui détermine l'érosion ou la sédimentation (Rasolomanana, 2012).

Approches de calage

Les statistiques montrent que le trafic est la variable de modélisation SWAT la plus couramment utilisée (Gassman et al., 2007; Moriasi et al., 2007). Cependant, lorsque plusieurs variables doivent être simulées, telles que le débit, les sédiments, les éléments nutritifs et les pesticides, des ajustements multivariés sont nécessaires (Cotter et al., 2003; Grizzetti et al., 2003; Kirsch et al., 2001a). Les publications SWAT fournissent rarement des informations détaillées sur les procédures d'étalonnage. En règle générale, les utilisateurs de SWAT pré-étalonnent la séparation du flux de surface et du flux de base, telle qu'observée par Eckart, Nathan et McMahon 1990, filtres de Arnold et Allen (par exemple, indice de référence BFI, Wahl et Wahl 2003, HYSEP, Sloto et Crouse 1996). . 1999). Ensuite, le débit est d'abord calibré, puis les sédiments et les nutriments sont calibrés (Rasolomanana, 2012).

La différence entre les méthodes d'étalonnage réside dans l'utilisation d'étalons de performance (Santhi et al., 2001; Moriasi et al., 2007), les priorités de simulation de l'azote et du phosphore (étalonnage des ingrédients biologiques avant les ingrédients minéraux, Santh et al. (2001), total Le phosphore était auparavant défini sur N-NO₃ (Cotter et al., 2003) ou une fonction objectif, indicateur de la différence entre les valeurs observées et simulées, pouvant être unique ou multiple. S'il existe plusieurs sites et / ou simultanément Plusieurs variables de simulation ou plusieurs fonctions objectives. Par exemple, White : l'erreur relative, le coefficient de Nash-Sutcliffe et le coefficient de détermination. Cette

fonction nécessite un équilibre entre les variables, les sites et le pas de temps considéré. L'ordre d'optimisation de cette fonction objectif est le suivant: : 1) flux totaux; 2) ruissellement de surface et écoulement de base; 3) les sédiments; 4) le total P; 5) N-NO₃ et N-NO₂. Le processus est répété afin que l'optimisation d'une variable n'influence pas les autres variables. Van Griensven et Bauwens (2003) ont intégré plusieurs fonctions objectives (une pour chaque variable) dans un critère d'optimisation global permettant de calibrer simultanément plusieurs variables hydrologiques et de qualité de l'eau. La pondération attribuée à chaque fonction objectif est égale au nombre d'observations divisé par la fonction objectif minimale, qui est mise à jour à chaque cycle. Par conséquent, dans le cas de cibles fonctionnelles, le grément peut être mono-cible, dans le cas de cibles fonctionnelles, le grément peut être multi-cible et dans le cas de multiples cibles fonctionnelles, le grément peut être multi-cible. Différents algorithmes d'optimisation font appel à Monte Carlo ou à d'autres systèmes d'estimation de paramètres, qui déterminent automatiquement le meilleur choix de paramètres sur une vaste gamme de simulations. Govender et Everson (2005) ont utilisé le programme ParameterESTimation (PEST) (Doherty 2004) pour conclure que l'étalonnage manuel est meilleur que PEST. Van Griensven et Bauwens (2003, 2005) ont utilisé l'algorithme SCE-UA (ShuffledComplex Evolutionary Uncertainty Analysis) pour inclure une procédure d'étalonnage automatique à cibles multiples dans SWAT2005. Abbaspour et al. (2008) ont également développé un algorithme d'optimisation appelé SUFI2 (SequentialUncertaintyFitting) et un programme iSWAT reliant SWAT et SUFI2.

L'étalonnage peut être manuel ou automatique. Van Liew et al. (2005) Les avantages et les inconvénients de l'étalonnage SWAT manuel et automatique ont été évalués en modifiant le nombre de paramètres à étalonner, la fonction objectif et les normes de performance utilisées. Le premier étalonnage est effectué mensuellement, puis quotidiennement. Sur les sites étudiés, les résultats montrent généralement que (i) un plus grand nombre de paramètres peut offrir de meilleures performances, (ii) le calibrage manuel est meilleur que le calibrage automatique basé sur le système PBIAS, et l'inverse est vrai si des coefficients de Nash-Sutcliffe sont utilisés; (iii)) Si les deux méthodes d'étalonnage sont combinées, les résultats seront prometteurs. Doit être ajusté manuellement pour maintenir l'équilibre après le nivellement automatique Qualité et meilleur réalisme des valeurs analogiques. La fonction «Somme des carrés résiduels» (SSQ ou somme des carrés résiduelle) est également meilleure que la somme des carrés résiduelle après classification (SSQR ou moins). Mais les résultats dépendent de l'emplacement, de l'humidité et de la période de l'année considérées (Rasolomanana, 2012).

4.2 Évaluation de la performance du modèle

Une évaluation statistique et graphique de la performance du modèle est recommandée (Moriasi et al., 2007). Les techniques graphiques comprennent des comparaisons visuelles entre les valeurs observées et simulées. Les diagrammes de niveau d'eau, les histogrammes et les courbes de distribution de probabilité sont des exemples de techniques graphiques. En ce qui concerne les normes statistiques, Kofi et autres. (2004) Réalisation de 20 tests statistiques pour évaluer les performances de l'étalonnage manuel du débit. Pour évaluer la production mensuelle, ils ont suggéré d'utiliser des coefficients de Nash-Satcliff et des coefficients déterministes. Pour la production quotidienne, les fonctions objectives médianes, l'autocorrélation et la corrélation croisée sont plus appropriées (Rasolomanana, 2012).

Récemment, Moriasi et al. (2007) ont également examiné la pertinence de plusieurs critères statistiques, en fonction des circonstances rencontrées. Bien que le coefficient de détermination soit largement utilisé dans la recherche hydrologique, il est très sensible aux valeurs extrêmes. Il n'est donc pas recommandé pour les ensembles de données bruyants. Le coefficient de Nash-Sutcliffe (NS) et le pourcentage de déviation (PBIAS) sont les critères de performance les plus recommandés (Rasolomanana, 2012).

Critères de performance

La performance du modèle en calage est évaluée par le biais de deux critères :

4.2.1.1.1 le coefficient de Nash-Sutcliffe (NS)

4.2.1.1.2 le pourcentage de biais (PBIAS)

2.5.3.1.1 Coefficient de Nash-Sutcliffe (NS)

Le coefficient de Nash-Sutcliffe (NS) est déterminé comme suit :

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (\text{Équation 2-28})$$

Les observations O_i , les simulations de S_i , les moyennes des observations et le nombre d'observations n ont été utilisés. Les valeurs NS vont de -1 à 1, 1 étant la meilleure valeur. Les valeurs négatives indiquent que la moyenne des valeurs observées est un meilleur modèle que les valeurs simulées. Il y a deux raisons principales pour recommander cette norme: 1) la norme proposée par l'ASCE en 1993; 2) une norme très commune pour faciliter

la comparaison. Et d'autres recherches. De plus, Sevat et Dezetter (1991) estiment que ce critère est la meilleure fonction objective que les hydrologues puissent s'ajuster à l'échelle mondiale. Toutefois, en raison de la variation non constante des erreurs de modèle, la norme a tendance à mettre l'accent sur les erreurs plus importantes, c'est-à-dire les erreurs qui se produisent généralement lors d'inondations. Pour surmonter ce problème (Rasolomanana, 2012). Une version modifiée de NS qui prend en compte la racine carrée de la valeur est suggérée pour réduire la sensibilité de la valeur extrême en raison du carré de la différence. Cependant, notre étude n'a pas retenu cette formule modifiée et notre objectif était de modéliser la cinétique moyenne des flux et des polluants (Rasolomanana, 2012).

2.5.3.1.1 Pourcentage de biais

Le pourcentage de biais (PBIAS) est déterminé comme suit :

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i) * 100}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (\text{Équation 2-29})$$

Où sont les valeurs observées et simulées? PBIAS estime que la tendance moyenne des données simulées est supérieure ou inférieure aux données observées. La valeur optimale de PBIAS est zéro, ce qui indique que le modèle est une simulation parfaite. Un PBIAS positif indique une sous-estimation du modèle, tandis qu'un PBIAS négatif indique une surestimation du modèle. Cette norme est recommandée car elle démontre clairement la mauvaise performance du modèle (Rasolomanana, 2012).

IV.4 Données nécessaires pour le model swat :

Les modèles nécessitent une base de données de données (morphologie, hydrographie, climatologie et pédologie).

1. DEM (modèle numérique du champ): Dans notre cas nous avons utilisé le DEM 1 degré de 90m de résolution pris du WEB USGS.

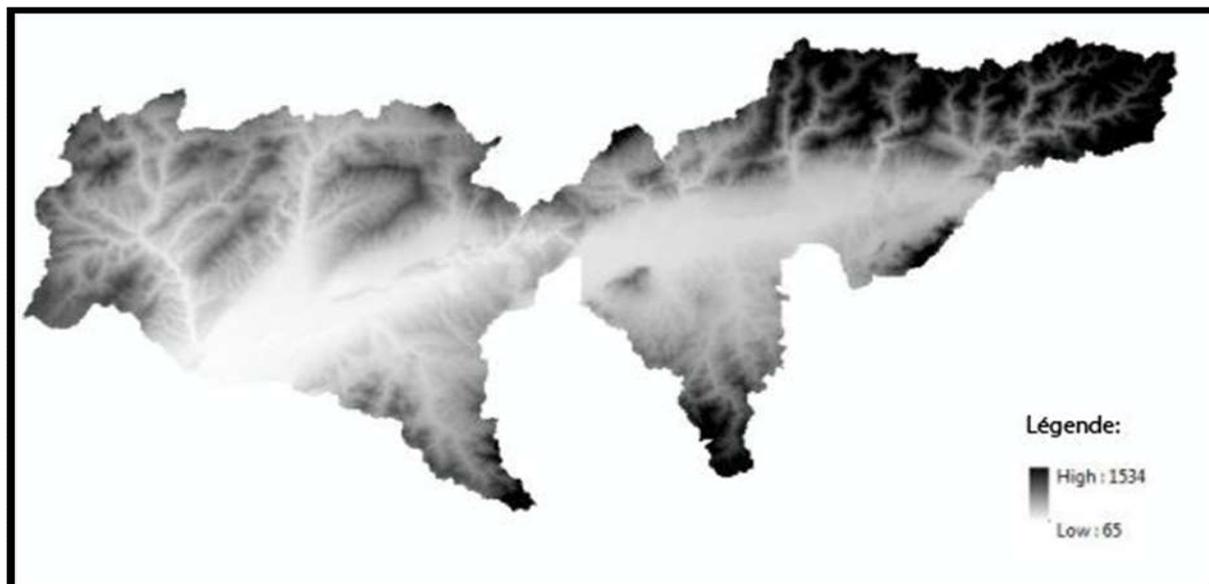


Figure IV.1 Carte DEM

2. **Données sur le sol** : la carte au-dessous est extraite de global soil qui représente les types de sol dans la zone

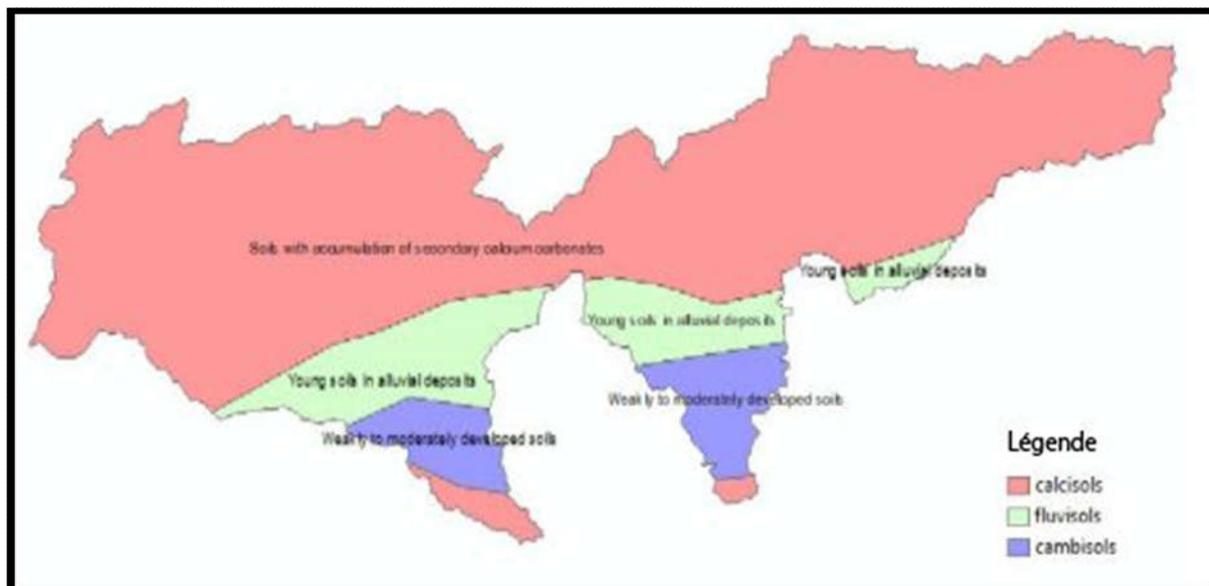


Figure IV.2 Carte des données sur le sol

3. **L'utilisation des terres** : la carte au-dessous est extraite de la carte grille mondiale qui représente l'utilisation des terres

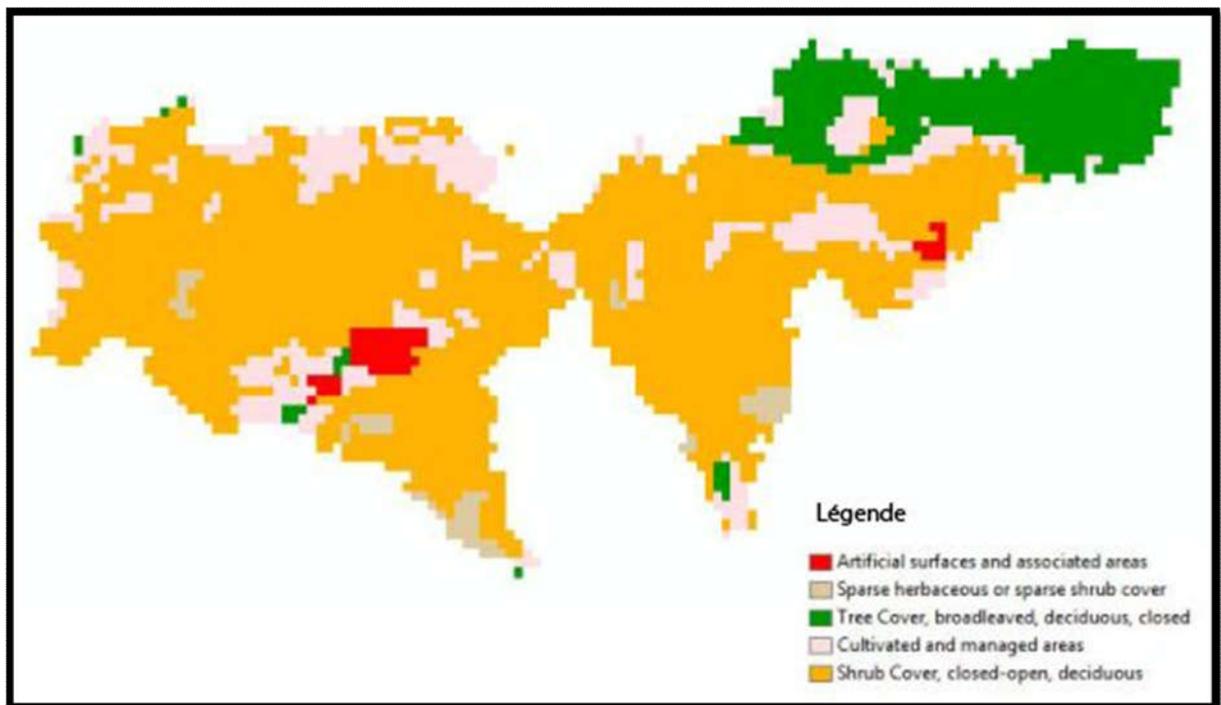


Figure IV.3 Carte d'utilisation des terres

4. **Carte des pentes** : la figure au-dessous montre les différentes pentes dans la zone d'étude.

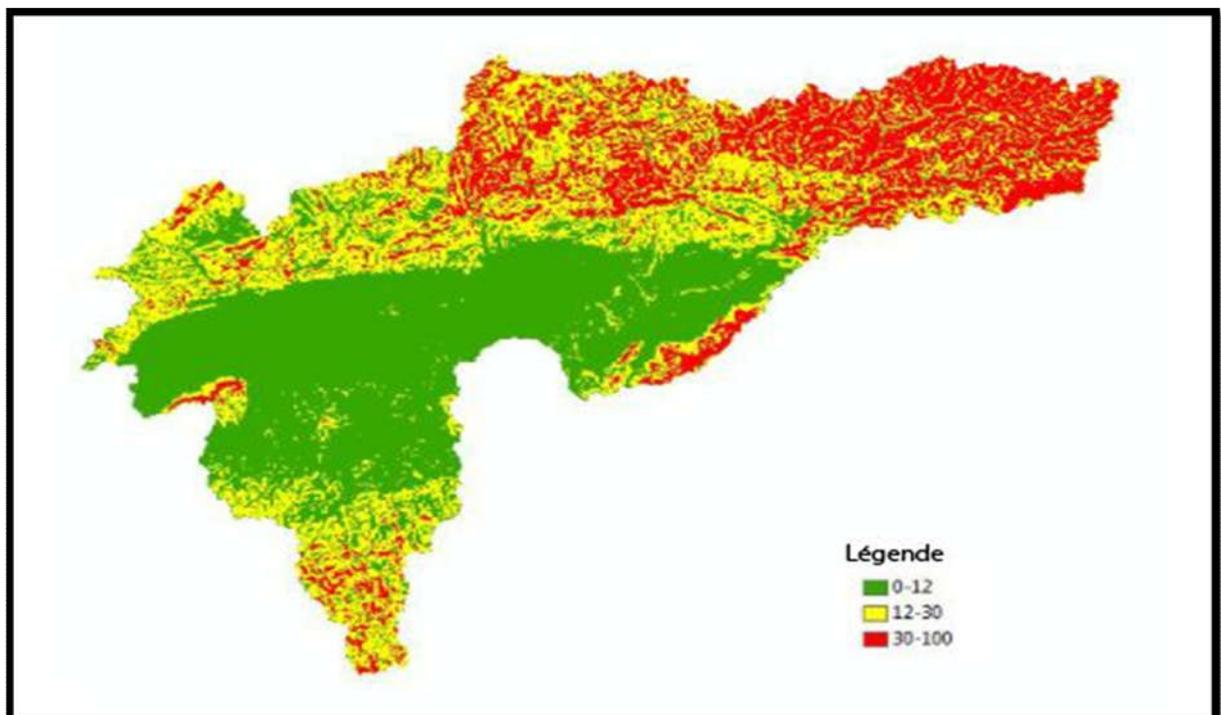


Figure IV.4 Carte des pentes

5. **Données climatique** : pour notre cas nous avons utilisé le cite CFSR <https://globalweather.tamu.edu/> qui fournit les données nécessaire, 15 stations ont été utilisées, les données ont été tirées de période de 1979 jusqu'à 2014.

IV.5 Insertion des données

1. La délimitation du bassin versant

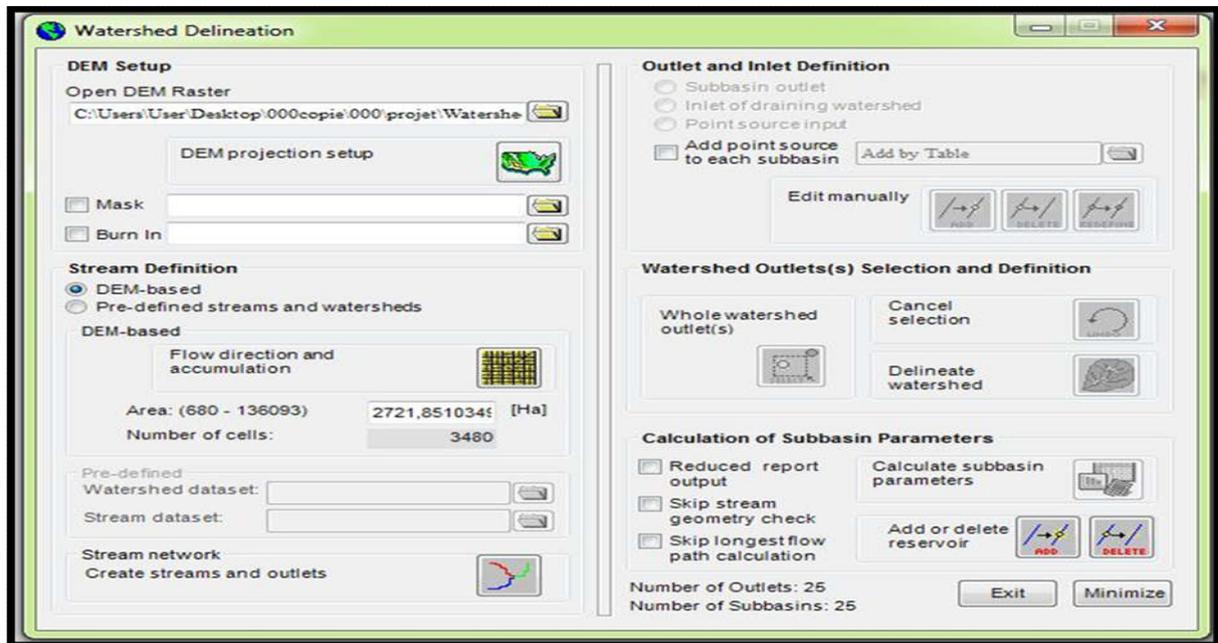


Figure IV.5 boîte de dialogue pour la configuration du bassin du haut Cheliff et ses sous bassins par le modèle SWAT

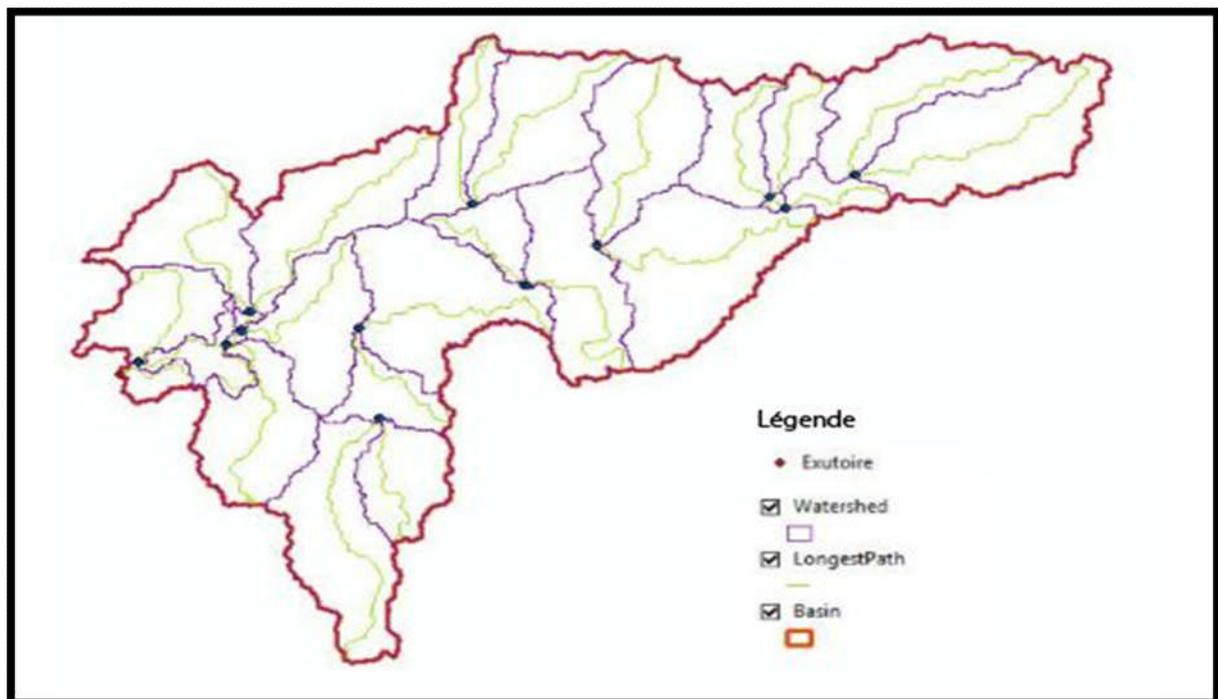


Figure IV.6 configuration du bassin du haut Cheliff et ses sous bassins par le modèle SWAT

1. La création du HRU

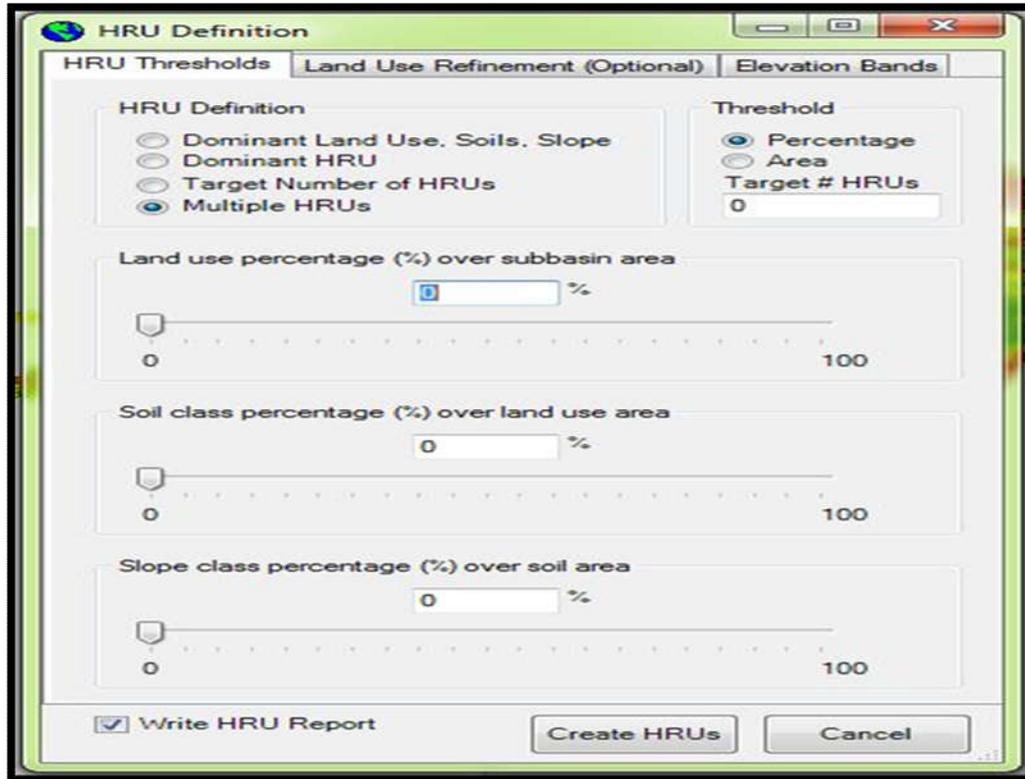


Figure IV.7 Création du HRU du haut Cheliff

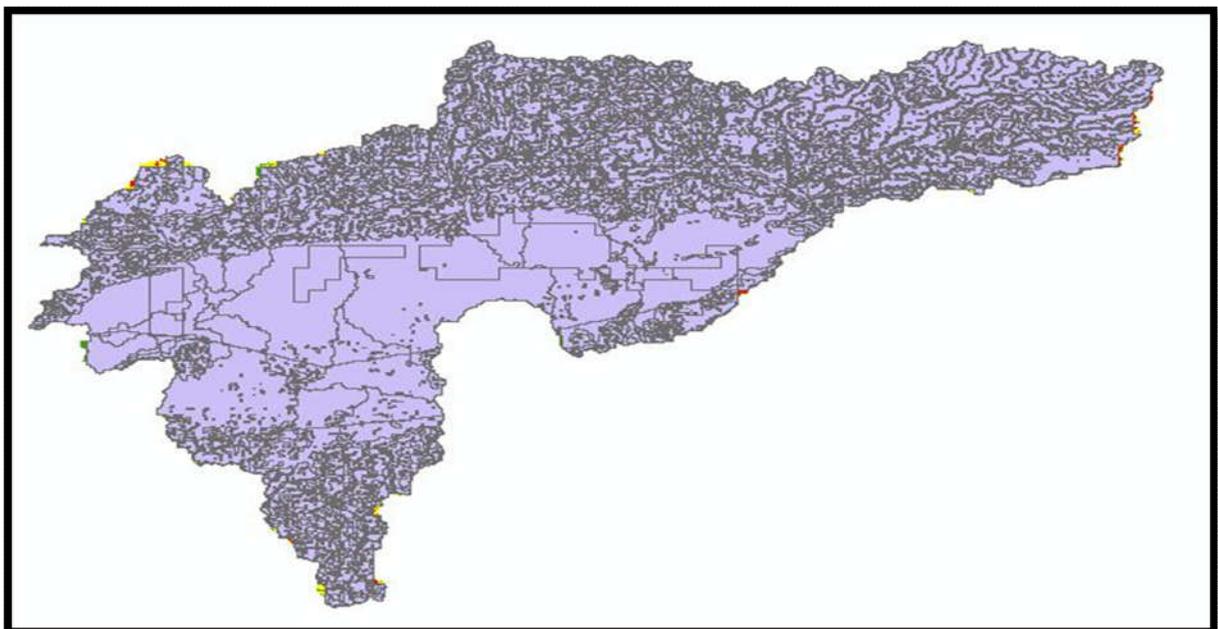


Figure IV.8 HRU du haut Cheliff

Chapitre V Résultats et interprétation

V.1 Résultats

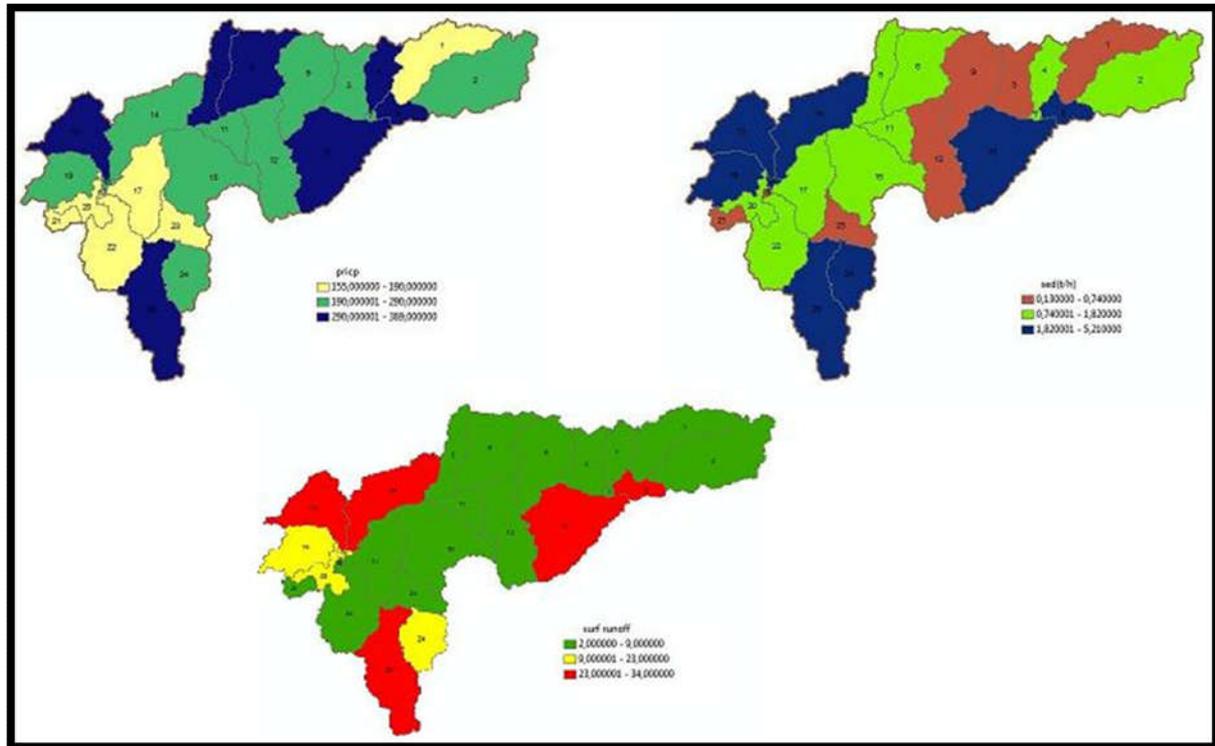


Figure V.1 moyennes Interannuelles entre (a) les précipitations 1979 et 2014, (*de millimètre* année⁻¹); les eaux de surface simulées chargent (de millimètre année⁻¹); rendement simulé de dépôt (t - ha⁻¹ · année de t⁻¹).

Les simulations inter annuelles pour le bassin versant du haut Cheliff qui sont présentées dans la figure (V.1) montre que les faibles précipitations varie entre (155 et 190 millimètres *de* · année⁻¹) dans les sous bassin 1,17,18,20,21,22et23 et la plus grande quantité varie entre (290 –389 millimètres de année⁻¹) dans les bassin 4,5,6,8,10,13et25.

Eaux de surface varie entre 2 et 34 millimètres de · année⁻¹ (captation semi-aride). Les valeurs les plus élevées ont été situées dans les sous bassin 8,10, 13,14 et 25(entre 23 et 34 millimètres), alors que les plus bas étaient dans la majorité des bassins versant (entre 2 et 9 millimètres).

Le taux d'érosion de sol s'est étendu de 0,13 t-ha⁻¹ · année de 5,21), et les sous bassins 8, 10,13, 14, 19,24 et 25 ont été identifiés comme secteurs avec l'érosion élevée de sol dans le Haut Cheliff.

Sousbassin	ruissellement de surface (mm)	Etp (mm)	précipitation (mm)	sédiment (t/h)
1	4	1336	155	0,5
2	5	1399	290	1,54
3	3	1551	230	0,13
4	6	1346	312	1,1
5	7	1499	350	1,74
6	5	1420	323	1,1
7	7	1611	250	1,82
8	26	1463	348	3,65
9	5	1685	237	0,74
10	31	1707	389	5,1
11	7	1616	242	1,5
12	3	1689	223	0,13
13	34	1614	315	4,56
14	32	1570	289	5,21
15	7	1713	238	1,5
16	19	1650	263	3,6
17	9	1570	185	1
18	5	1919	183	0,68
19	19	1795	268	3,4
20	14	1711	156	1,44
21	2	1968	187	0,26
22	9	1855	185	1,65
23	4	1975	190	0,25
24	23	1683	270	3,65
25	29	1796	310	4,16
Totale	315	41141	6388	50,41

Tableau V.1 les caractéristiques du sous bassin

V.2 Discussion

Les résultats obtenues montrent que les sous bassins 8, 10, 13, 14, 19,24 et 25 ont été identifiés comme secteurs avec l'érosion élevée de sol et ca du à la forte précipitation et les forte pentes que connaissent les zones ainsi que la faiblesse de la couverture végétale.

Conclusion générale

L'intégration des systèmes d'information géographique par l'application Arcswat dans ArcGisTM dans l'étude de l'érosion nous a permis de développer une carte de sensibilité des sols pour l'érosion dans le bassin hydrographique supérieur du Cheliff. Il ressort de cette carte qu'une grande partie du terrain présente une grande vulnérabilité à l'érosion. Ceci résulte de la conjonction de plusieurs facteurs: l'agressivité des pluies, la raideur du relief et la faiblesse de la couverture végétale. L'érosion par ravinement a notamment été identifiée au niveau des sous-bassins: Oued Fodda, Oued Cheliff Ghrib et Oued Ebda

. Ceci se traduit en amont par un transport solide très important. Les techniques biologiques telles que le reboisement des forêts et l'arboriculture sont des moyens très efficaces de lutter contre ce phénomène érosif. La correction des ravins et un affaissement latéral des berges des oueds est une solution envisageable, notamment dans les zones les plus vulnérables. Pour les terrains de sensibilité moyenne, l'utilisation de bancs semble une bonne solution. La carte permettait d'avoir une vue d'ensemble des zones menacées. La méthode utilisée a été principalement utilisée pour créer un ensemble de cartes thématiques pouvant servir de support visuel et explicatif, en référence à la base de données. Il peut également fournir un soutien important aux décideurs et aux développeurs afin de mieux cibler leurs stratégies d'intervention préventive.

Références Bibliographique

BENKACI, Souhila, ABIR, Dehbia, OUMELLAL, Aziz, et al. Modélisation de l'érosion du bassin haut et moyen Cheliff par l'application Model builder sur ArcGis.

LEGRAS, O., UBERTOSI, Marjorie, BRULEBOIS, Etienne, *et al.* ÉVOLUTION DU BILAN HYDRIQUE À L'ÉCHELLE DE BASSINS VERSANTS EN CONTEXTE DE CHANGEMENT CLIMATIQUE–MISE PLACE D'UNE MÉTHODOLOGIE. *Mémoire pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur agronome.* (Dijon, France: Agrosup Dijon), 2014.

ZETTAM, Amin. *Transfert des nitrates du bassin versant de la Tafna (Nord-Ouest de l'Algérie) vers la mer Méditerranée-approche couplant mesures, modélisation et changement d'échelle vers les grands bassins versants Nord africains.* 2018. Thèse de doctorat.

RASOLOMANANA, Santatriniaina Denise. Modélisation des petits bassins versants en milieu rural: Problématique des modèles fortement paramétrés. 2012.