

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE HASSIBA BENBOUALI CHLEF

FACULTE DE GENE CIVILE ET D'ARCHITECTURE

DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE



Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme Master

Spécialité : Hydraulique

Option : Hydraulique Urbaine

THEME :

**UTILISATION DU MODELE HYDROLOGIQUE SWAT
POUR LA SIMULATION DES DEBITS LIQUIDES
D'OUED ZEDDINE BASSIN VERSANT DE CHELIFF**

Présentée par :

— RASSELKAF Ibtissam

— NEGADI Zohra

Soutenue publiquement le : 30/06/2024

Devant les jurys :

Mr HADBI

Mr MAKHLOUFI Nouredine

Mr MESKINE

UHBC

UHBC

UHBC

Dirigé par :

- Mr. MAKHLOUFI Nouredine

Président

Encadreur

Examineur

Année Universitaire : 2023/ 2024

Remerciements

Avant tout propos, nous remercions ALLAH le tout puissant de nous avoir prêté vié et volonté pour achever ce travail.

Nous tenons à exprimer nos remerciements les plus sincères à monsieur MAKHLOUFI.N, qui a encadré ce mémoire de fin d'étude, pour ses efforts fournis afin de mener à bien ce projet.

Et nous avons également l'honneur d'adresser nos remerciements pour tous les enseignants du département d'hydraulique à l'université de Hassiba Ben Bouali CHLEF.

Nous remercions également les membres du jury pour avoir pris la peine d'évaluer ce modeste travail.

Enfin, madame AMINA, merci de nous avoir bien traités, pour votre accueil chaleureux, et pour votre soutien.

Merci

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A l'être le plus cher à mon cœur, à celui qui m'a toujours guidée par ses conseils et qui a passé des innombrables heures à m'aider dans mes devoirs durant tous mes années d'étude et m'a donné la force de surmonter tous les obstacles : Mon père bien-aimé.

A la lumière de ma vie, au cœur le plus doux à celle qui s'est tellement sacrifiée pour me voir toujours meilleur : Ma très chère mère.

Au support de mon âme : Mon frère ABDERRAHIM.

A monsieur l'ingénieur BENDOUKHA OUALID pour son aide et ses conseils.

A ma chère voisine Amina et sa famille.

A Dr. ELMEDDAHI.Y pour ses conseils avisés, ses encouragements, sa reconnaissance de mes capacités et pour son appui constant qui m'ont motivé à travailler plus.

A toute ma famille et mes amis les plus proches : Wafa, Bilal, Idriss et ma binôme Zohra.

A chaque professeur dont j'ai eu un jour le privilège et l'opportunité de profiter de son savoir.

A tous les étudiants du 2^{eme} A. Master Hydraulique de l'université de CHLEF promo 2023/2024.

Ibtissam

Dédicaces

Je dédie cet ouvrage, fruit de longues années d'études, d'abord avec le sourire de la vie, dont la supplication fut le secret de ma réussite,

À ma chère Mère,

À l'âme pure et pure de mon Père,

À mon Mari qui m'a soutenue dans mon parcours,

À mon Frère Omar et mes Sœurs,

Toute ma Famille,

Tous les Etudiants d'hydraulique,

Tous mes honorables professeurs,

Et à tous ceux qui m'ont donné une parole de force pour continuer.

Zohra

Table des matières :

<i>Remerciements</i>	
<i>Dédicaces</i>	
<i>Liste des figures</i>	
<i>Liste des tableaux</i>	
<i>Résumé</i>	
<i>Introduction</i>	1

Chapitre I :Aperçus sur la modélisation et model hydrologiques

<i>I.1. Introduction</i>	3
<i>I.2. Le cycle hydrologique</i>	3
<i>I.3. Composantes</i>	4
<i>I.4. Le bilan hydrologique</i>	5
<i>I.5. Notion de modélisation</i>	5
<i>I.6. Modélisation pluie -débit</i>	6
<i>I.7. Principe du modèle hydrologique</i>	6
<i>I.8. La modélisation peut être représentée comme suit</i>	8
<i>I.9. Intérêt d'un modèle pluie-débit.....</i>	8
<i>I.10. Classification des modèles pluie-débit</i>	10
<i>Conclusion</i>	12

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

<i>II. Introduction</i>	14
<i>II. 1- Présentation générale</i>	14
<i>II. 2- Situation géographique du bassin haut et moyenne Chélif.....</i>	15
<i>II. 3- Sous Bassin de Rouina Zeddin (0119).....</i>	16
<i>II. 4- Situation morphologique du sous bassin versant</i>	17
II. 4-1- Caractéristiques physiques	17
II. 4-2-Caractéristique climatique	17
II-4-3- végétation du bassin versant	18
<i>II.4-4- Caractéristique de forme</i>	18
II-4-5-Caractéristiques de relief	20
II-4-6-Réseau hydrographique	24
<i>CONCLUSION</i>	25

Chapitre III :Méthodologie

<i>Introduction</i>	27
<i>III.1. Traitement des données</i>	27
III.1.1. Collecte des données	28
III.1.2. Choix des stations	28
<i>III.3. Description du logiciel ArcGIS 10.2</i>	29
III.3.1 Composantes de l'environnement ArcGIS	30
III.3.2 Géo-référencement	33
III.3.3 Les systèmes de projections	33
<i>III.4 Le choix du modèle</i>	34
<i>III.5 Description du modèle hydrologique SWAT</i>	35
<i>III.6 Calage et validation du modèle</i>	40
<i>III.7 Les critères de performances</i>	40
III.7.1 Le critère de NASH	41
III.7.2 Le critère de R ²	41
III.7.3 Le critère de RMSE	41
<i>Conclusion</i>	41

Chapitre IV: Résultats et discussions

<i>IV.1 INTRODUCTION</i>	43
<i>IV.2 L'entrée des données</i>	43
IV.2.1 MNT (<i>Modèle Numérique du Terrain</i>)	43
IV.2.2 Carte d'occupation des sols	43
IV.2.3 Carte de types de sols	44
IV.2.4 Données pluviométriques	44
<i>IV.3 Le lancement de la simulation</i>	44
<i>IV.4 Résultats et discussions</i>	44
<i>IV.5 Conclusion</i>	49
<i>Conclusion</i>	51
<i>Références bibliographiques</i>	53

Liste des figures :

Figure	Page
Figure I.1 : Le cycle hydrologique.	3
Figure I.2 : Différentes approches de modèle hydrologique.	6
Figure I.3 : Schéma d'un modèle hydrologique	7
Figure I.4 : Les processus de la modélisation hydrologique.	7
Figure I.5 : Variables d'un modèle hydrologique	8
Figure I.6 : Intérêt d'un modèle pluie-débit	9
Figure II.1 : Carte des bassins versants de l'Algérie	14
Figure II-2 : Carte géographique de bassin versant Haut et moyen Chélif	15
Figure II-3 : Carte de situation du bassin versant de l'oued Rouina Zeddine	16
Figure II.4 : Carte géologique du sous bassin versant ROUINA ZEDDINE	17
Figure II-5 : Carte hypsométrique du sous BV de ROUINA ZEDDINE	21
Figure II.6 : Carte du réseau hydrographique	24
Figure III-1 : Carte de situation des stations du sous bassin versant Zeddine	29
Figure III.2 : Interface du logiciel ArcGIS 10.2	30
Figure III.3 : Les composantes de l'environnement ArcGIS 10.2	30
Figure III.4 : Les Applications d'ArcGIS	31
Figure III.5 : L'interface d'ArcCatalog	32
Figure III.6 : Les outils d'ArcToolbox	32
Figure III.7 : Système de projection UTM	33
Figure III.8 : Relation entre données disponibles, complexité et performance d'un modèle hydrologique.	34
Figure III.9 : Architecture de l'interface du couplage SWAT et SIG	35
Figure III.10 : La barre ArcSWAT sous ArcGIS	35
Figure III.11 : Phases du cycle hydrologique modélisé par SWAT	36
Figure III.12 : Carte d'occupation de sols d'oued ZEDDINE.	37
Figure III.13 : Carte de sols de l'oued ZEDDINE.	37
Figure III.14 : Barre d'outils d'ArcSWAT	39
Figure IV.1 : Lancement de simulation avec SWAT.	44
Figure IV.2 : Les débits observés et simulés pour la phase de calibration.	47
Figure IV.3 : Les débits observés et simulés pour la phase de validation.	47
Figure IV.4 : Le coefficient de corrélation R^2 .	48

Liste des tableaux :

Tableau	Page
Tableau II.1 : Découpage par sous-région du Bassin Chélif-Zahrez	15
Tableau II-2 : Les marges de Kc	19
Tableau II-3 : Principales caractéristiques de sous-bassin versant.	20
Tableau II.4 : Variation de l'indice de pente global.	22
Tableau II.5 Classification des reliefs d'après l'O.R.S.T.O.M	23
Tableau II.6 : Caractéristiques morpho métrique de bassin versant ROUINA ZEDDINE.	24
Tableau III-1 : Les stations choisis	28
Tableau IV.1 : Valeurs des paramètres calibrés du modèle SWAT	45
Tableau IV.2 : Critères d'évaluation de la performance	46
Tableau IV.3 : Résultats des coefficients de performance du modèle	46

Liste des abréviations :

ETP : Evapotranspiration potentielle ;

BV : Bassin versant ;

SIG : Système d'informations géographique ;

ArcGIS : Logiciel d'information géographique ;

Hydrolab : Hydraulique laboratoire ;

Mapinfo, ArcMAP, ArcVIEW : Logiciels d'information géographique ;

XLSTAT : Logiciel statistique pour Excel ;

Gr4J : modèle de génie rural à 4 paramètres journalier ;

SWAT : Soil and Water Assessment Tool (outil d'Evaluation du Sol et de l'Eau) ;

HRU : unité de réponse hydrologique ;

ANRH : Agence National des Ressources Hydriques.

OROSTOM : Office de la recherche scientifique et technique outre-mer, organisme aujourd'hui remplacé par l'IRD (Institut de recherche pour le développement) ;

HEC-HMS : Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System.

Résumé:

Notre étude a pour objectif de faire une modélisation hydrologique pluie-débit dans le sous-bassin versant d'oued Zeddine situé dans la région du Haut et Moyen Chélif, à travers le modèle SWAT.

Le modèle utilisé a permis de simuler les débits à l'exutoire du sous-bassin versant étudié, pour lequel les données des débits observés étaient disponibles. Cette étude a mis en évidence l'applicabilité du modèle dans un contexte de climat semi-aride. D'après les critères de performance, les résultats de la simulation sont satisfaisants ce qui justifie l'applicabilité du modèle SWAT au sous bassin d'oued Zeddine.

Mots clés : Modélisation pluie-débit, modèle SWAT, Oued Zeddine, bassin de Chélif.

ملخص:

تهدف دراستنا إلى تنفيذ النمذجة الهيدرولوجية أمطار-جريان في حوض وادي زدين الواقع في منطقة الشلف العليا والوسطى، من خلال نموذج SWAT.

وقد أتاح النموذج المستخدم محاكاة معدلات التدفق عند مخرج مستجمع المياه الفرعي الذي تمت دراسته، والذي توافرت بشأنه بيانات التدفق المرصودة. أبرزت هذه الدراسة إمكانية تطبيق النموذج في سياق مناخي شبه جاف. وفقا لمعايير الأداء فإن نتائج المحاكاة مرضية، مما يبرر إمكانية تطبيق نموذج التدخل السريع على حوض وادي زدين.

الكلمات المفتاحية: نمذجة أمطار- تدفق، نموذج SWAT، واد زدين، حوض الشلف.

Abstract :

Our study aims to carry out hydrological rainfall-runoff modeling in the Wadi Zeddine sub-basin located in the Upper and Middle Cheliff region, through the SWAT model.

The model used made it possible to simulate the streamflow at the outlet of the sub-basin studied, for which the observed flow data were available. This study highlighted the applicability of the model in a semi-arid climate context. According to the performance criteria, we obtained a satisfactory simulation results, which justifies the applicability of the SWAT model to the Wadi Zeddine sub-basin.

Key words: Rainfall-runoff modeling, SWAT model, wadi Zeddine, Cheliff basin.

Introduction

Introduction :

L'eau, ressource naturelle de plus en plus rare [20]. La pénurie de l'eau dans le monde, et la gestion des ressources en eau constituent l'un des problèmes les plus cruciaux du 21^{ème} siècle [29]. L'eau est essentielle pour l'homme, elle a toujours joué un rôle important dans l'histoire de l'humanité. Source de vie, elle est aussi source de conflits dans de nombreuses régions du monde [20]. Par ailleurs, l'eau est indispensable au fonctionnement des écosystèmes terrestres [22].

Loin de sa disponibilité, l'eau ne cesse d'être le souci majeur de la civilisation humaine et de son épanouissement. En Algérie, cette source de vie est en deçà des besoins de ce grand pays, ce qui fait de « la gestion de l'eau » un défi loin d'être investigué sur le terrain sachant que la présence des outils de gestion est inévitable dans les différentes institutions. Étant un pays septentrional et ayant un climat semi-aride connu par sa forte irrégularité pluviométrique, il est à noter que l'Algérie possède une extrémité saisonnière et interannuelle des écoulements avec de longues phases d'aridité, des inondations à caractère brutal et rapide, une forte érosion et de transports solides essentiels. Enfin, l'ensemble des moyens destinés à éviter ou au moins diminuer ces catastrophes commence par la prévision météorologique et par la modélisation hydrologique.

Il est à mentionner que l'observation des points d'un cours d'eau ne manque pas d'importance. Car il existe souvent une sorte de contradiction : on marque des données pluviométriques abondante alors que les données de débit sont toujours insuffisantes, donc et dans le but d'être plus précis, il serait intelligent de transformer ces dernières en données hydrométrique où on se concentre sur la modélisation pluie-débit qui se base sur l'application et l'usage des modèles imitant la manière du fonctionnement d'un bassin versant. D'une manière plus simple, l'hydrologie explique ce qui précède comme suit : en utilisant la pluie comme variable d'entrée, les modèles calculent un hydrogramme en sortie du modèle. Et d'une stratégie bien élaborée, à travers notre travail bien organisé, nous allons viser à porter à votre connaissance tous ce qui concerne l'application du modèle SWAT sur le sous bassin versant d'oued Zeddine qui fait partie du grand bassin du Chélif, ce modèle hydrologique fut déjà un objet d'étude de nombreuses recherches ce qui nous a inspirées à l'adopter.

Notre travail comporte quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la modélisation hydrologique en générale et à la représentation et la transformation de la pluie en débit en particulier. Quant au deuxième chapitre, nous avons présenté la zone d'étude qui est le sous bassin versant de l'oued Rouina Zeddine, dans laquelle nous avons présenté les différents paramètres géologiques hydrologiques, et hydro-climatiques. Dans le troisième chapitre, nous avons discuté la méthodologie utilisée dans la modélisation, puis dans la collecte et le traitement des données des stations sélectionnées dans le bassin versant. Le quatrième chapitre s'attache à la présentation des résultats de simulation des débits liquides d'oued Zeddine. Enfin, nous avons présenté la conclusion que nous tirons de ce travail.

Chapitre I :

*Aperçus sur la modélisation et
modèles hydrologiques*

I.1. Introduction :

Ce chapitre est consacré à la modélisation hydrologique, et les différents modèles utilisés dans ce domaine.

La modélisation pluie-débit, discipline de l'hydrologie, vise à comprendre et à représenter la transformation de la pluie en débit à l'échelle du BV. Transcriptions mathématiques de cette transformation les modèles qui sont très variés, car ils font appel à différentes perceptions du monde réel et répondent à divers problématiques tels que :

- ✚ Simulation de débits, pour le comblement de lacunes dans des séries de données, la reconstitution de débits historiques ;
- ✚ Prédétermination des débits de crue ou d'étiage ;
- ✚ Prévission des crues et des étiages ;
- ✚ Influence d'aménagements sur l'hydrologie.

Ces problématiques font ressortir deux aspects importants, celui de l'évaluation des risques hydrologiques liées aux phénomènes de crues et celui de la gestion de ressource en eau liée à l'apparition des étiages. On définira ensuite les fonctions de production et de transfert. Après avoir défini les objectifs, on donnera une classification des différents modèles hydrologiques.

Mais avant d'entamer ces détails, il est utile de donner un rappel sur le cycle hydrologique qui est la base de toute modélisation hydrologique.

I.2. Le cycle hydrologique :

Définition :

Il englobe les phénomènes du mouvement et du renouvellement des eaux sur la terre (figure I.1).

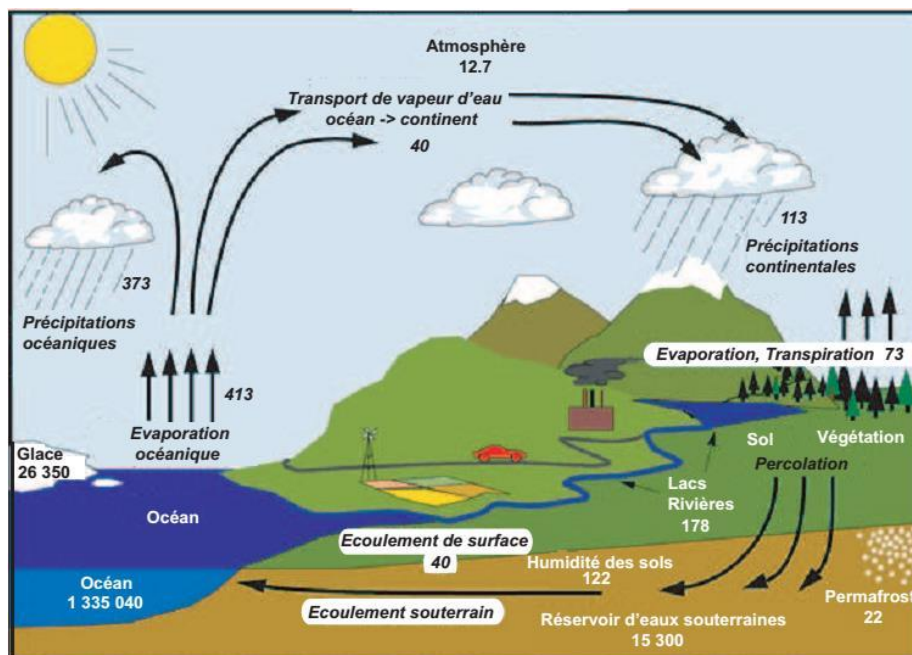


Figure I.1 : Le cycle hydrologique [2].

I.3. Composantes :

- 1- **Les précipitations** : les eaux météoriques qui tombent sur la surface de la terre, sous forme liquide (pluie) que sous forme solide (neige) et les précipitations déposées (rosée, gelée). Elles sont provoquées par un changement de température ou de pression.
- 2- **L'évaporation** : se définit comme étant le passage de la phase liquide à la phase vapeur, il s'agit de l'évaporation physique. Les sources principales de vapeur d'eau sont les plans d'eau et la couverture végétale. le rayonnement solaire est le principal facteur déterminant de l'évaporation.

Le terme évapotranspiration englobe l'évaporation et la transpiration des plantes. On distingue :

- **Evapotranspiration Réelle (ETR)** : somme des quantités de vapeur d'eau évaporées par le sol à une certaine humidité et par les plantes à un stade de développement physiologique et sanitaire spécifique.
 - **Evapotranspiration de référence (ET₀) (ou ETP Evapotranspiration Potentielle)** : quantité maximale d'eau susceptible d'être perdue en phase vapeur, sous un climat donné, par un couvert végétal continu spécifié bien alimenté en eau et pour un végétal sain en pleine croissance.
 - **Evapotranspiration maximale (ETM)** : d'une culture donnée est définie à différents stades de développement végétatif, lorsque l'eau est en quantité suffisante et que les conditions agronomiques sont optimales.
- 3- **L'interception** : La pluie ou la neige peut être retenue par la végétation, puis redistribuée en une partie qui parvient au sol et une autre qui s'évapore. La partie qui ne parvient jamais au sol est l'interception.
 - 4- **Le stockage** : On définit l'eau de stockage comme l'eau retenue dans les creux et les dépressions du sol pendant et après une averse.
 - 5- **L'infiltration** : désigne le mouvement de l'eau pénétrant dans les couches superficielles du sol et l'écoulement de cette eau dans le sol et le sous-sol, sous l'action de la gravité et des effets de pression.
 - 6- **La percolation** : représente plutôt l'infiltration profonde dans le sol, en direction de la nappe phréatique.
 - 7- **Les écoulements** :
 - **Écoulements rapides** : gagnent rapidement les exutoires pour constituer les crues :
 - **Écoulement de surface** : mouvement de l'eau sur la surface du sol

- **Ecoulement de subsurface** : mouvement de l'eau dans les premiers horizons du sol.
- **Ecoulements lents souterrains** : L'écoulement souterrain est le mouvement de l'eau dans le sol [25].

I.4. Le bilan hydrologique :

- le bilan hydrologique se situe à l'échelle du bassin versant, le bilan hydrique se situe à l'échelle de la plante.
- On peut schématiser le phénomène continu du cycle de l'eau en trois phases :

1. les précipitations,

2. le ruissellement de surface et l'écoulement souterrain,

3. l'évaporation.

- L'équation du bilan hydrologique se fonde sur l'équation de continuité et peut s'exprimer comme suit, pour une période et un bassin donné [25] :

$$S_{\text{Entrant}} - S_{\text{Sortant}} = \Delta S$$

$$(P+S) - (R+E) = \Delta S$$

Avec :

- P : Précipitations (liquide et solide) [mm],
- S : Stock, ressources (accumulation) de la période précédente (eaux souterraines, humidité du sol, neige, glace) [mm] ;
- R : Ruissellement de surface et écoulements souterrains [mm] ;
- E : Évaporation (y compris évapotranspiration) [mm] ;
- ΔS : Variation de volume du système à la fin de la période [mm].

I.5. Notion de modélisation :

L'étude de certains phénomènes physiques, chimiques, hydrodynamiques, biologiques, et hydrologiques amène souvent l'études des relations qui existent entre plusieurs variables caractérisant ce même phénomène associé un modèle mathématique exprimé par une équation différentielle [7]. Il faudra revenir au phénomène lui-même pour évaluer l'adéquation physique entre la réalité et l'approximation de la réalité à travers le modèle. Un modèle est donc un outil désigné pour représenter une version simplifiée de la réalité [12], basé sur des approximations de la réalité il ne représente pas donc la réalité.

I.6. Modélisation pluie -débit :

Un modèle hydrologique possède trois approches complémentaires (figure I.2) : l'approche débit-débit, l'approche pluie-débit, et l'approche mixte. L'approche pluie-débit est la plus étudiée, ses modèles visent à transformer de la pluie en débit à l'échelle d'un BV en essayant à établir un lien entre les débits et les phénomènes qui en sont la cause directe, les pluies. Elle permet de comprendre le fonctionnement du bassin, la nature, et le rôle des processus impliqués, leur importance relative par rapport au phénomène étudié, ainsi que les liens spatiaux ou temporels entre ces processus [11].

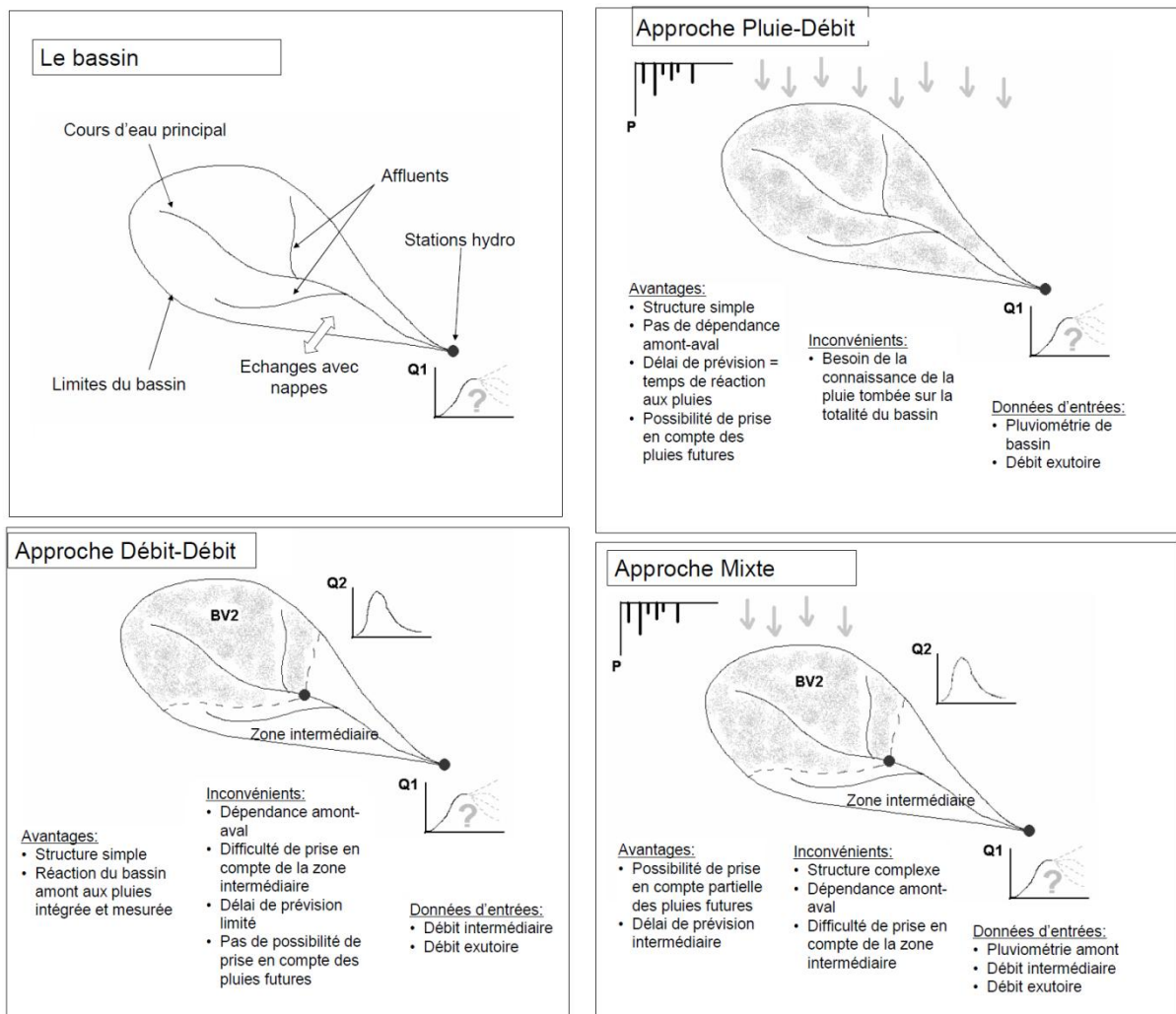


Figure I.2 : Différentes approches de modèle hydrologique [11].

I.7. Principe du modèle hydrologique :

Les modèles hydrologiques permettent donc de transformer des séries décrivant le climat d'un BV (précipitations, températures) en une série de débits. Cette transformation est en deux parties (fonctions) (figure I.3) :

➤ **Fonction de production :**

Elle permet de déterminer la pluie nette à partir de la pluie brute. La pluie nette est la fraction de pluie brute participant totalement à l'écoulement.

➤ **Fonction de transfert :**

La fonction de transfert permet de déterminer l'hydrogramme de crues résultant d'une pluie (souvent considérée comme la pluie nette).

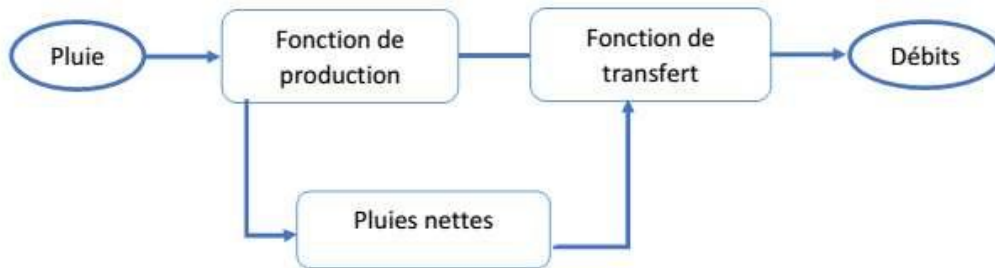
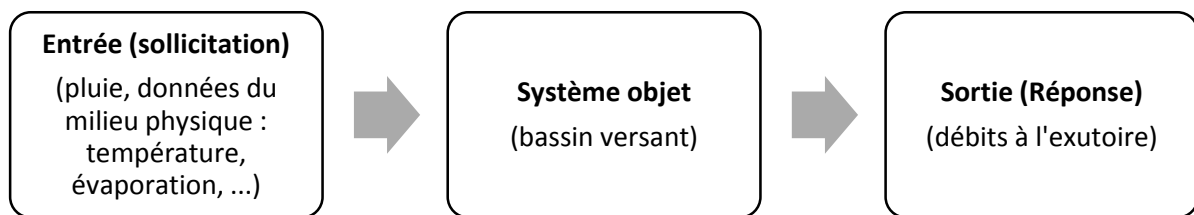


Figure I.3 : Schéma d'un modèle hydrologique [14].

Typologie des modèles hydrologiques (figure I.4) :



Variables indépendantes

Variables d'état

Variables dépendantes

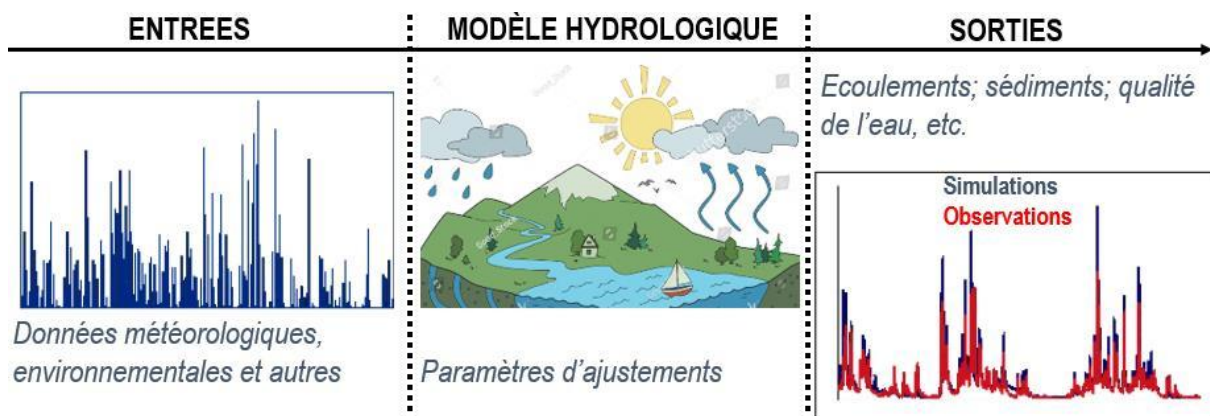


Figure I.4 : Les processus de la modélisation hydrologique. [34]

I.8. La modélisation peut être représentée comme suit (figure I.5) :

- **Variables d'entrée** ou variables indépendantes :
Données d'entrée du modèle : mesure de pluie, ETP, mesures climatologiques.
Certains modèles utilisent des données d'entrée spatialement distribuées.
- **Variables de sortie** ou variables dépendantes : débits simulés à l'exutoire du BV.
- **Variables d'état** : les variables qui caractérisent l'état du système modélisé sont celles qui peuvent évoluer dans le temps dans un modèle dynamique. Elles comprennent, par exemple, le niveau de remplissage des différents réservoirs d'eau du BV, le taux de saturation des sols et les pentes.
- **Paramètres** : servent à adapter la paramétrisation des lois régissant le fonctionnement du modèle au bassin versant étudié.
- **Performances** : il s'agit d'estimer l'amplitude des erreurs de modélisation, calculées en se basant sur la différence entre les valeurs simulées et les valeurs mesurées.

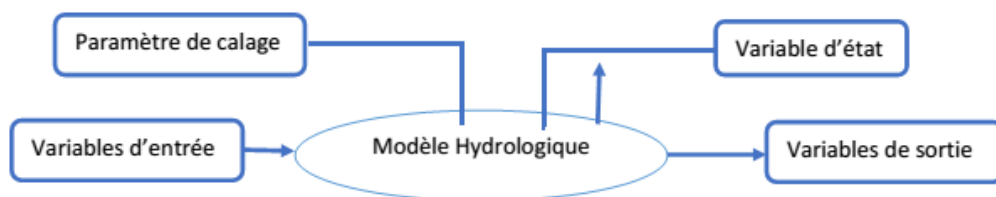


Figure I.5 : Variables d'un modèle hydrologique. [14]

I.9. Intérêt d'un modèle pluie-débit :

La figure I.6 illustre que l'étude de la transformation de la pluie en débit est l'une des nombreuses disciplines hydrologiques. Un modèle pluie-débit est utilisé pour reproduire des débits, des données relativement rares, à partir de données plus facilement disponibles telles que les précipitations et certaines caractéristiques du bassin. Il permet également de simuler les débits en dehors du domaine d'observation. En général, un modèle pluie-débit peut être utilisé pour :

- a) La simulation de débits est utilisée pour combler les lacunes dans des séries de données, reconstituer des débits historiques (les données de pluie étant souvent disponibles sur des périodes beaucoup plus longues que les débits), ou permettre des traitements statistiques.

- b) La prédétermination des débits de crue ou d'étiage consiste à déterminer avec quelle fréquence des débits de crue supérieurs à un seuil de risque ou des faibles débits (en deçà d'un débit réservé) risquent de se produire, et sur quelle durée. Cette approche s'inscrit dans une démarche d'analyse fréquentielle et peut être utilisée pour dimensionner des ouvrages et des réservoirs ou pour planifier des aménagements dans le lit du cours d'eau.
- c) La prévision des crues et des étiages consiste à évaluer à l'avance, avec un délai de quelques heures à quelques jours, les débits de crues susceptibles de présenter des risques d'inondation ou les débits d'étiages qui pourraient nécessiter la mise en place d'une gestion spécifique des ressources, comme des barrages-réservoirs, pour assurer l'approvisionnement en eau ou la préservation de la vie halieutique. Cette approche s'inscrit dans une démarche d'analyse continue du bassin.
- d) L'influence des aménagements sur l'hydrologie vise à prédire les changements dans la réponse du bassin suite à des modifications d'origine humaine ou à des changements environnementaux. Ces problématiques mettent en évidence deux aspects importants : l'évaluation du risque et la gestion de la ressource. La pertinence des réponses que l'on peut apporter à ces questions dépend de la capacité du modèle à représenter le bassin par rapport aux objectifs fixés.[11][35]

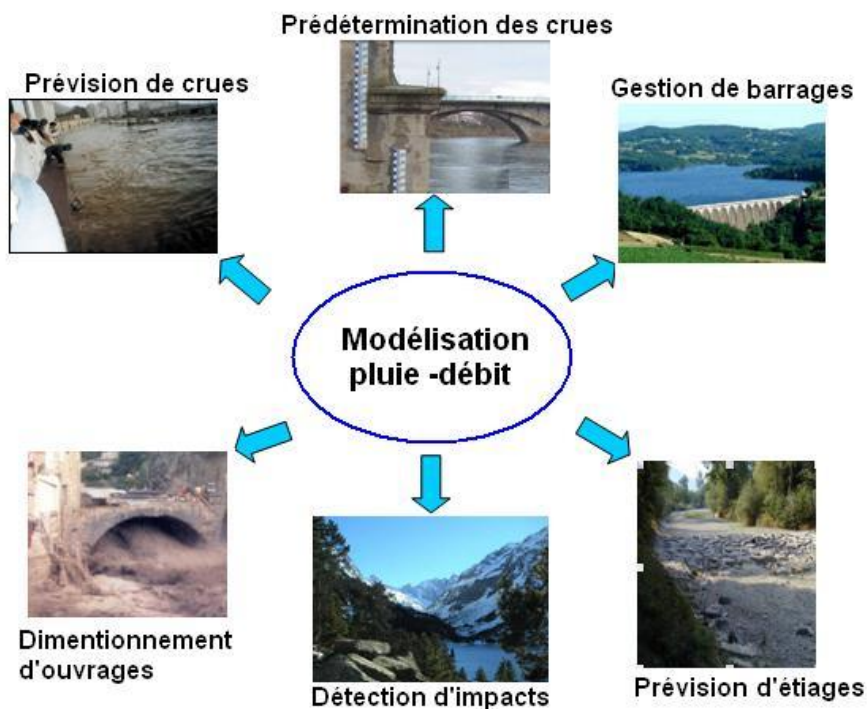


Figure I.6 : Intérêt d'un modèle pluie-débit.[35]

I.10. Classification des modèles pluie-débit :

Il a autant de modèles différents que d'experts en hydrologie.

→ **Selon l'objet étudié :**

- Modèle probabiliste ;
- Modèle déterministe ;

→ **Selon la représentation des processus hydrologiques :**

- Modèle de type « boîte noire » ;
- Modèle conceptuel ou « réservoir » (Gr4J) ;
- Modèle à base physique (SWAT) ;

→ **Selon l'approche spatiale :**

- Modèle global ;
- Modèle distribué (HEC-HMS) (SWAT) ;

→ **Selon l'approche temporelle :**

- Modèle évènementiel ;
- Modèle continu ;

Modèle probabiliste : est utilisé pour établir des critères de conception d'ouvrages, tels que le dimensionnement des évacuateurs de crue des ouvrages hydrauliques à travers le calcul de la crue et de la cote de projet, ou pour vérifier les performances d'ouvrages existants. L'objectif principal d'un modèle probabiliste est de fournir des grandeurs statistiques de variables hydrologiques telles que les débits maximums de pointe de crue pour une occurrence donnée, ou les précipitations minimales pour une durée et une période de retour données. Les difficultés rencontrées avec ce type de modèle incluent les incertitudes liées aux extrapolations lorsque les séries d'observations utilisées sont courtes, ainsi que l'impossibilité d'étudier, via ces modèles, les conséquences des modifications des bassins versants [24].

Modèle déterministe : L'aspect déterministe permet de simuler les phénomènes physiques identifiables. Le modèle déterministe est l'état d'un système au temps t_1 peut déterminer son état au temps t_2 , transporté dans le milieu hydrologique, la grande majorité des modèles hydrologiques sont déterministes, il existe une et une seule sortie pour chaque entrée et pour une même entrée la sortie sera calculée, c'est le cas de la méthode rationnelle, de hydrogramme unitaire [35].

Modèle « boîtes noire » : Les modèles boîtes noire sont des modèles qui décrivent les relations mathématiques entre les entrées (les précipitations) et les sorties (ruissellement) sans décrire les

phénomènes physiques les reliant. Cette catégorie comprend les modèles neuro-floues et les réseaux neuronaux [19].

Modèle conceptuel ou « réservoir » : sont des représentations simplifiées des processus hydrologiques d'un bassin versant, utilisant des concepts abstraits plutôt que des équations détaillées. En Algérie, ces modèles sont utilisés pour comprendre et prédire le comportement des ressources en eau dans divers environnements hydrologiques (Gr4J comme exemple) [9][17].

Modèle à base physique (SWAT) : modèles basés uniquement sur des équations de la physique, et ne comportant idéalement aucun paramètre. Il n'existe pas de modèle à base physique au sens strict en hydrologie.

L'importance de l'hétérogénéité spatiale dans la réponse des bassins versants rend cependant difficile voire impossible l'utilisation de tels modèles, la précision spatiale des données disponibles en particulier concernant les types de sols et leurs profondeurs n'est pas suffisante. Dans la pratique les profondeurs et les conductivités moyennes de sols représentatives de sous parties du bassin versant doivent être évaluées par calage et deviennent, de ce fait, des paramètres.

De tels modèles sont utilisés lors de la phase de conception des ouvrages de protection afin d'atteindre la conception optimale en termes de dimensions et d'efficacité et pour garantir un fonctionnement sûr. Ce type se distingue par sa capacité exceptionnelle à convaincre les décideurs non spécialisés [12].

Modèle global : un modèle qui ne tient pas compte de la variabilité spatiale des paramètres ou des variables dépendantes ou indépendantes est dit global. Ce type de modèle est applicable aux petits bassins versants où les effets des variations spatiales peuvent être négligées.

Modèle distribué : si la variabilité spatiale des phénomènes hydrologiques à l'intérieur du BV est explicitement prise en compte est représentée par le découpage du bassin en unités. Les modèles distribués sont plus précis que les modèles globaux.

Modèle continu : Il fonctionne tout au long de l'année. Il utilise une représentation complète des différents composants du cycle de l'eau. Ce modèle n'a pas besoin d'être initialisé, ce qui est avantageux d'un point de vue opérationnel.

Modèle événementiel : Il ne fonctionne que lorsqu'un événement pluvieux se produit. Certains phénomènes sont considérés comme prépondérants dans la représentation de ce modèle, tandis

que d'autres peuvent être négligés. Par exemple, pour la prévision des crues éclair, seule la génération du ruissellement de surface et la décrue peuvent être représentées, les processus les plus lents, comme l'évapotranspiration et la redistribution des eaux dans les sols, sont généralement négligés. Contrairement aux modèles continus, le modèle événementiel doit être initialisé [26].

Les modèles événementiels ne sont pas utilisables pour les bassins non jaugés à contrario avec les modèles continus [31].

Conclusion :

Il s'avère que décrire les processus impliqués dans la réponse hydrologique d'un bassin versant n'est pas une tâche facile. Cette description nécessite la connaissance et la maîtrise de divers facteurs et paramètres. Des renseignements suffisants sur ces données ne sont pas toujours disponibles pour tous les BV, d'où la nécessité de s'investir d'avantages dans l'étude de détermination de ces données afin de développer des modèles qui représentent au mieux la réponse hydrologique du BV.

Chapitre II :

Présentation de la zone d'étude

II. Introduction :

Le bassin du Chélif a été choisi comme zone d'application de notre travail en raison de sa vaste superficie (43750 km²) par conséquent un nombre maximal des sous bassins versants et ainsi de suite une grande variabilité des caractéristiques morpho-métriques (la variabilité spatiale). Donc ce chapitre a pour objectif de présenter le contexte général de point de vue géomorphologique, climatologique, topographique et géologique.

II. 1. Présentation générale :

L'Algérie est subdivisée en cinq (5) régions hydrographiques regroupant les dix-sept (17) bassins du pays (figure II.1).

Les agences des bassins hydrographiques sont :

- Oranie-Chatt Chergui ;
- Algérois-Hodna-Soummam ;
- Chélif-Zahrez ;
- Constantinois-Seybouse-Mellegue ;
- Sahara.

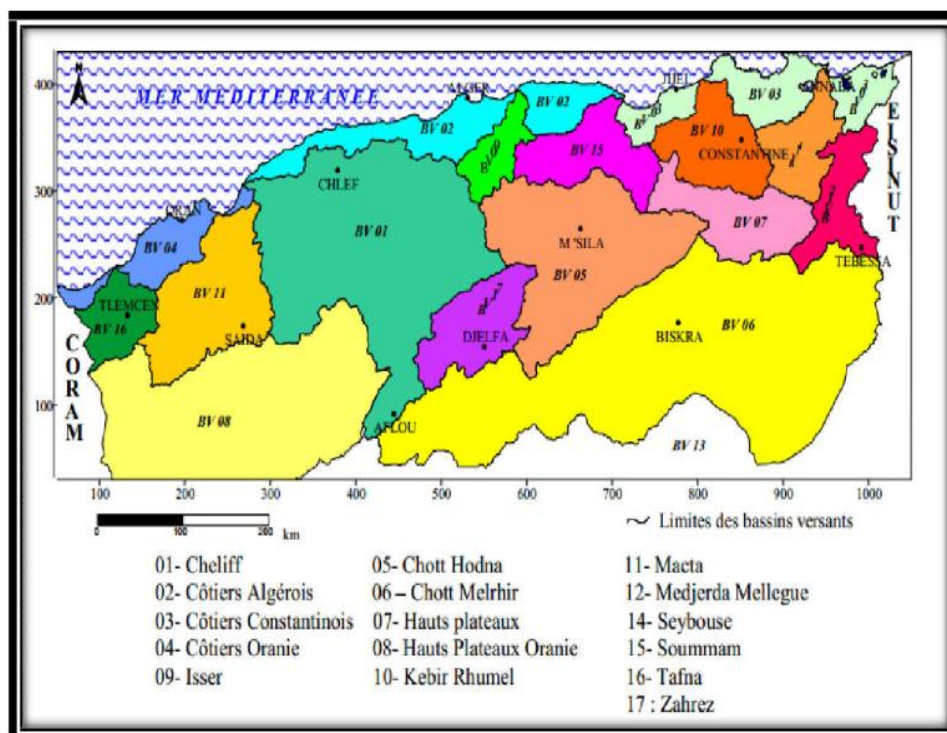


Figure II.1 : Carte des bassins versants de l'Algérie.

Avec une superficie de 43750 km² environ (soit plus de 22% de la superficie de l'Algérie du Nord) le bassin du Chélif-Zahrez déborde largement les limites géographiques du Chélif, en longitude entre 0°12' et 3°87' Est et en latitude entre 33°91' Nord et 36°58' Nord.

Cette région hydrographique est limitée naturellement au Nord par la mer Méditerranée, à l'Ouest par la région Oranie-Chott Chergui, à l'Est par la région Algéroise-Hodna-Soummam et au sud par le Sahara.

Tableau II.1 : Découpage par sous-région du Bassin Chélif-Zahrez

Sous-région	Bassin hydrographique	Wilayas
Sous-région 1	Haut Chélif	Ain Defla, Médéa, Tissemsilt et Tipaza
Sous-région 2	Moyen Chélif	Chlef
Sous-région 3	Mina, Bas Chélif	Relizane, Tairt, Mostaganem, Saida et Mascara
Sous-région 4	Haut plateau	Djelfa, Laghouat et M'sila

Source : Atlas de bassin hydrographique Chélif-Zahrez

II. 2. Situation géographique du bassin haut et moyenne Chélif :

Le bassin versant de Cheliff correspond à une cuvette intra montagnaise située au sud-ouest d'Alger. Circonscrite à l'intérieur des chaînes de l'Atlas tellien, cette plaine parallèle au littoral méditerranéen, est limitée (figure II.2) :

- Au Nord, par le bassin versant sud de la chaîne de Dahra.
- Au Sud, par les monts de l'Ouarsenis.
- A l'Est, par la plaine du moyen Cheliff occidental.

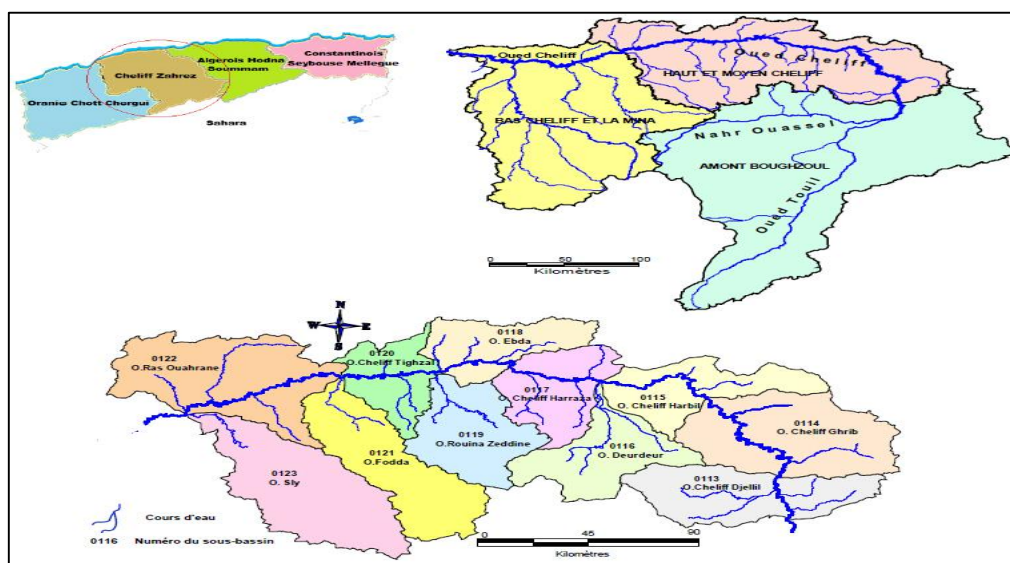


Figure II.2 : Carte géographique de bassin versant Haut et moyen Chélif. [2]

Notre zone d'étude (bassin versant de l'Oued Rouina Zeddine) se situe dans la partie du haut et moyen Chélif.

II. 3. Sous Bassin de Rouina Zeddin (0119)

Le sous bassin versant de l'oued Rouina Zeddine (figure II.3) se situe au nord-ouest algérien, il fait partie du grand bassin versant du Chélif « bassin numéro 1 ». D'une superficie de 892.31 km², le bassin s'étend de Djebel Meddad au Sud vers la plaine Rouina au Nord. Il est situé entre les altitudes Nord 35° 50' 50" et 36° 14' 37" et les longitudes Est 1° 43' 29" et 2° 7' 54". Le sous bassin présentant une forme allongée et orienté vers le Nord géographique.

À la jonction des oueds Zeddine et Zeddina l'oued Rouina Zeddine prend sa source et c'est sur cet affluent du versant gauche de l'oued Chélif que le barrage de Ouled Mellouk a été construit comme le montre la figure 3.

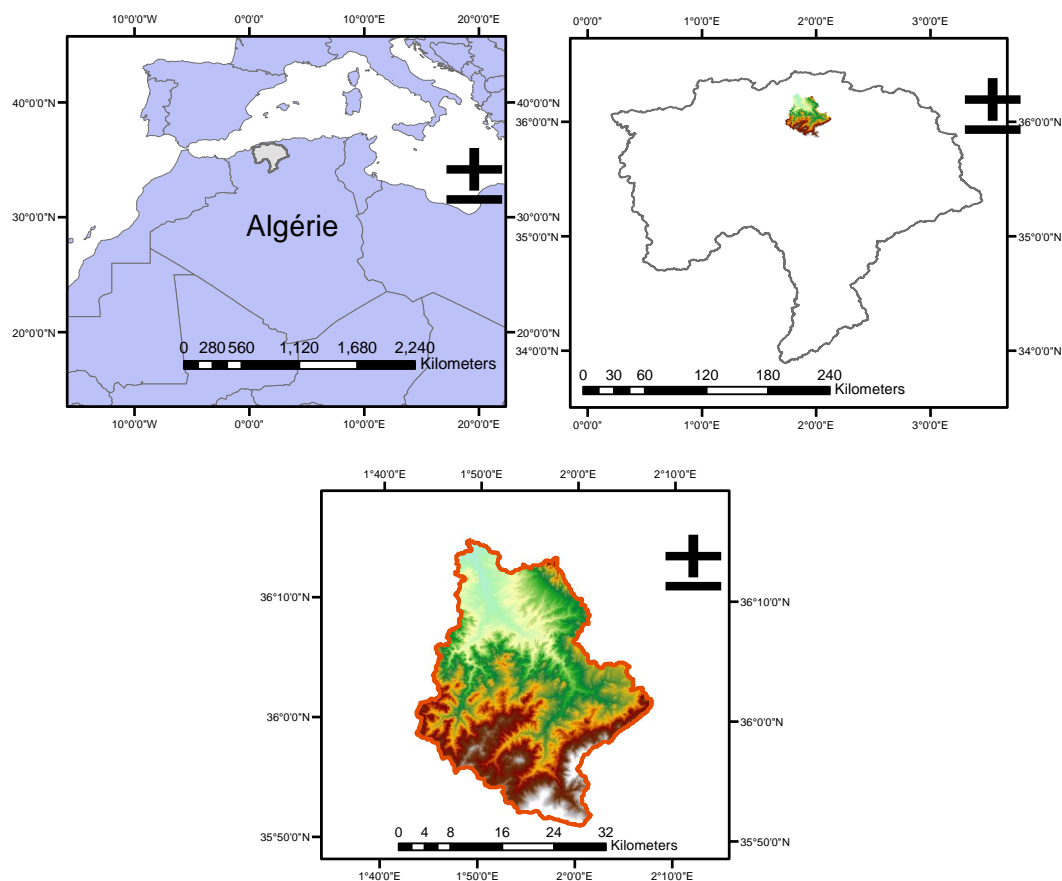


Figure II.3 : Carte de situation du bassin versant de l'oued Rouina Zeddine

(Réalisé par nos soins sous ArcGis 10.2).

II. 4. Situation morphologique du sous bassin versant :

Le sous bassin de l'oued Rouina Zeddine présente un caractère montagneux moyennement accidenté avec des altitudes qui varient entre 183 m et 1786 m. Les principales caractéristiques morphologiques sont représentées dans ce qui suit :

II. 4.1. Caractéristiques physiques :

II. 4.1.1. Géologie du bassin :

Le bassin versant de l'oued ROUINA ZEDDINE est constitué de différentes formations géologiques (figure II.4). Des formations argilo-gréseuses (Crétacé inférieur) occupent le centre et le sud-ouest du bassin. Au nord se développent des conglomérats à éléments gréseux à gréseux calcaires et des sables non consolidés (Pliocène continental), une série limoneuse plus ou moins détritique du Miocène inférieur, des argiles et des formations marno-calcaires (Jurassique inférieur).

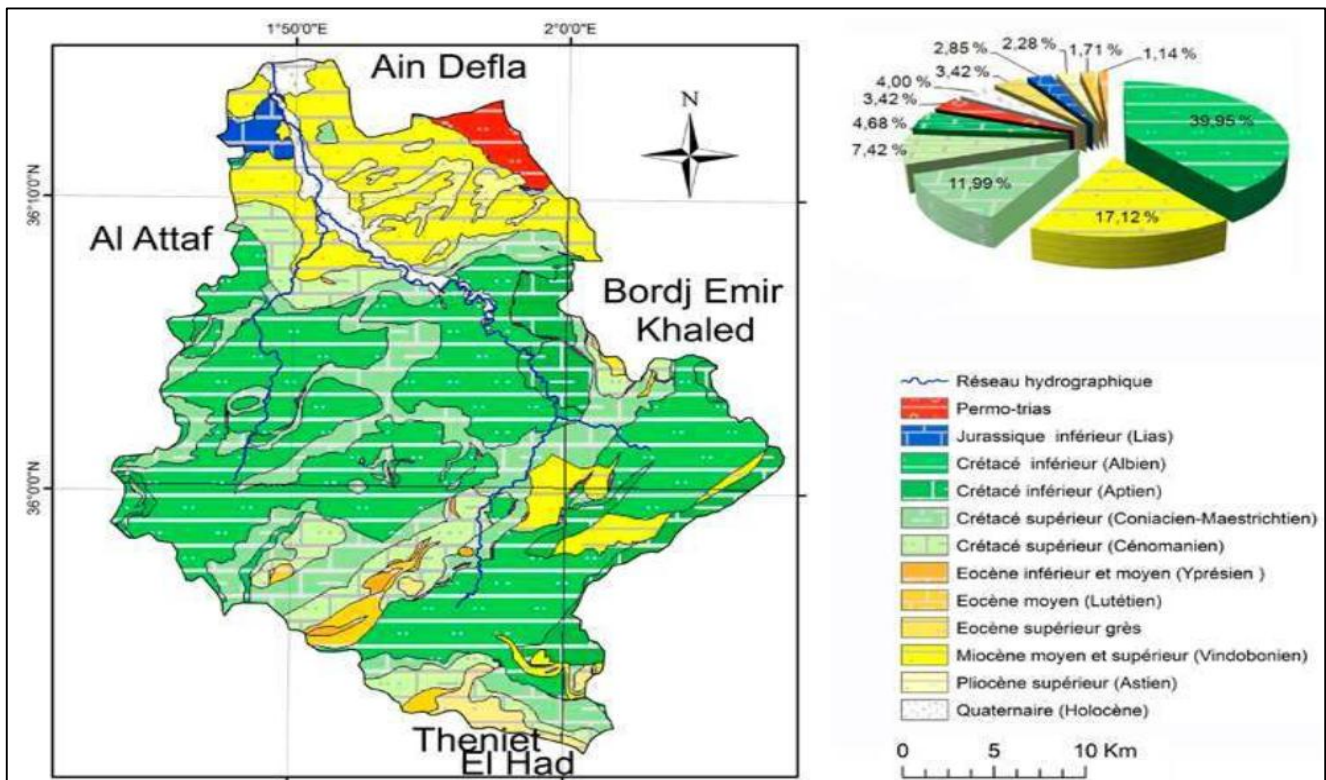


Figure II.4 : Carte géologique du sous bassin versant ROUINA ZEDDINE.[5]

II. 4.2. Caractéristiques climatiques :

Le climat dans le sous bassin versant ROUINA ZEDDINE est de type semi-aride, humide et froid en hiver et chaud et sec en été.

II.4.2.1. Les précipitations :

Le bassin reçoit entre 300 et 500 mm de pluie par an (ANRH). Après une étude critique des éléments antérieurement obtenus, la précipitation annuelle moyenne du bassin versant a été fixée à 461 mm/an. (ANBT)

II.4.2.2. La température :

Les températures moyennes de la région subissent des variations saisonnières. Le contraste saisonnier est bien marqué entre l'hiver et l'été. Les minima thermiques sont généralement atteints en janvier, les maximas en juillet / août qui peut atteindre les 41°C. (ANRH)

II.4.2.3. Le vent :

Le bassin versant subit un fort vent stable de décembre à avril et des vents calmes de juin à octobre.

Le vent souffle du sud-ouest (SO) au nord-est (NE). (ANRH)

II.4.3. végétation du bassin versant :

La végétation est un facteur déterminant de la rapidité du ruissellement superficiel, du taux d'évaporation et de la capacité de rétention du bassin. La présence de végétation va jouer le rôle de « régulateur » dans la région d'écoulement.

La région d'Ain Defla (ROUINA ZEDDINE) en général, est à vocation agricole. La prédominance de l'arboriculture fruitière couvre environ 47% de la superficie cultivée totale sur les plaines et les terrains à faible pente. Les cultures céréalières et maraîchères occupent une seconde position d'importance.

II.4.4. Caractéristique de forme :

La forme des sous bassins versants traduite par l'indice de compacité a une influence directe sur l'écoulement : un BV de forme allongée ne réagira pas de la même façon qu'un BV de forme ramassée.

II.4.4.1. Superficie (A) :

La surface du bassin versant est la première et la plus importante des caractéristiques, elle est obtenue par la suite de la délimitation du sous bassin sur ArcGIS.

II. 4.4.2. Périmètre (P) :

C'est le résultat de la délimitation du sous bassin obtenu directement sur ArcGIS.

II. 4.4.3. Indice de compacité (K_C) :

C'est le rapport entre le périmètre du bassin et la circonférence du cercle ayant la même superficie que ce bassin.

$$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = \frac{0.28P}{\sqrt{A}} \dots\dots\dots (1)$$

Avec :

K_C : indice de compacité de GRAVILUS

A : surface du bassin versant (km²).

P : périmètre du bassin versant (km).

Tableau II.2 : Les marges de K_C

Si K_C = 1	Bassin circulaire.
Si 1 < K_C < 1,3	Bassin compact.
Si K_C > 1,3	Bassin allongé.

II. 4.4.4. Rectangle équivalent :

Le bassin versant rectangulaire résulte d'une transformation géométrique du bassin réel dans laquelle on conserve les mêmes paramètres de forme et donc par conséquent la même répartition hypsométrique.

Les dimensions du rectangle équivalent sont calculées par les formules :

$$L_r = \frac{K_c \sqrt{A}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_G} \right)^2} \right] \dots\dots\dots (2)$$

$$l_r = \frac{K_c \sqrt{A}}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_G} \right)^2} \right] \dots\dots\dots (3)$$

L_r: Longueur du rectangle équivalent (Km).

l_r : Largeur du rectangle équivalent (Km).

Les résultats des principales caractéristiques du sous-bassin figurent dans le tableau ci-après :

Tableau II.3 : Principales caractéristiques de sous-bassin versant.

Sous- bassin	Code du sous-bassin	Superficie (Km ²)	Périmètre (Km)	Indice de Compacité K _C	Rectangle équivalent		Forme du bassin
					Longueur (Km)	Largeur (Km)	
Oued ROUINA ZEDDINE	0119	892,31	207,18	1,94	93.32	9.43	Forme allongée

La valeur de l'indice de compacité obtenue pour le sous-bassin versant (Oued ROUINA ZEDDINE) montre qu'il est affaire à de bassin qui présente une forme assez allongée avec la valeur de K_c qui est égale à 1.94.

Dans l'ensemble, la forme de sous-bassin est plus ou moins semblable et traduit de temps de concentration plus ou moins long qui pourrait favoriser plutôt l'infiltration des eaux superficielles.

II.4.5. Caractéristiques de relief :

II.4.5.1. Classe des surfaces et relief :

Le relief c'est un de facteur dominant sur la rapidité de la concentration des eaux à l'exutoire du bassin versant, et même d'approcher le paramètre hydro climatologique. Le relief est un facteur essentiel, il détermine en grande partie l'aptitude au ruissellement des terrains, l'infiltration et l'évaporation. C'est un élément capital dans le comportement hydrologique d'un bassin. Il se détermine au moyen de différents indices et généralement apprécié par l'établissement de la courbe hypsométrique.

La courbe hypsométrique fournit une vue synthétique de la pente du bassin, donc du relief. Cette courbe représente la répartition des altitudes en fonction des pourcentages cumulés des superficies ; elle permet de calculer l'altitude moyenne et l'indice de pente globale.

Les courbes hypsométriques demeurent un outil pratique pour comparer plusieurs bassins entre eux ou diverses sections d'un seul bassin.

Partant de la répartition par tranches d'altitudes des bassins, nous avons établi les courbes hypsométriques et les diagrammes des fréquences altimétriques.

Le bassin versant occupe une superficie de 892.31Km², et un périmètre de 207.18 km.

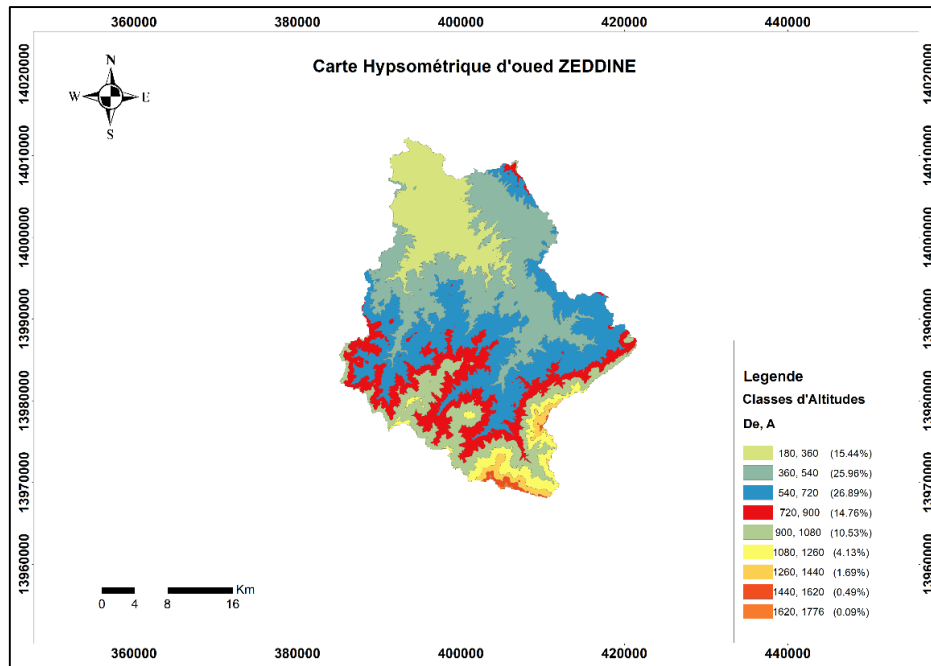


Figure II.5 : Carte hypsométrique du sous BV de ROUINA ZEDDINE (réalisée sous ArcGIS 10.2)

II.4.5.2. Indices de pente :

Vue l'influence directe de la pente sur le ruissellement des eaux superficielles, les hydrologues travaillent avec des indices de pente, pour tenir compte des dénivellations de relief qui sont en contact avec la réponse hydrologique du bassin versant.

II.4.5.2.1. Indice de pente de roche :

L'indice de pente de Roche caractérise la pente globale du bassin versant. Il s'exprime par :

$$I_p = L^{-\frac{1}{2}} \sum_1^n \sqrt{a_i \cdot d_i} \dots \dots \dots (4)$$

Où :

L : Longueur du rectangle équivalent,

ai : représente la fraction en % de la surface *A* comprise entre deux courbes de niveau voisines distantes de *di*

IP = 100%, ce qui correspond à un relief accidenté.

II-4-5-2-2- Indice de pente global

Cet indice permet de déduire la nature du relief en se référant à la classification de l'O.R.S.T.O.M (tableau II.4) :

Tableau II.4 : Variation de l'indice de pente global.

R1	Relief très faible	$I_g < 0.002$
R2	Relief faible	$0.002 < I_g < 0.005$
R3	Relief assez faible	$0.005 < I_g < 0.01$
R4	Relief modéré	$0.01 < I_g < 0.02$
R5	Relief assez fort	$0.02 < I_g < 0.05$
R6	Relief fort	$0.05 < I_g < 0.1$
R7	Relief très fort	$I_g > 0.1$

Il est calculé par :

$$I_G = D / L \quad D = H_{95\%} - H_{5\%} = 1300 - 400 = 900\text{m}$$

D : La dénivelée ou bien la distance qui sépare les altitudes ayant 5% de la surface du bassin et celles de 95% ou bien la distance qui sépare les deux courbes de niveau maitresses extrêmes H5% et H95%. Donc l'indice global s'écrit comme suit :

$$I_g = H_{5\%} - H_{95\%} / L \quad \text{Alors} \quad I_g = 900 / 92.32 = 9.75 \text{ m / km}$$

Ce qui donne : $I_g = 0.097\%$. En se référant à la classification donnée sur le tableau ci-dessus, on déduit que cet indice correspond à un relief fort.

II.4.5.2.3. Indice de pente moyenne :

C'est le facteur moteur qui détermine la vitesse avec laquelle l'eau va s'écouler pour se rendre à l'exutoire. Il s'exprime par :

$$i_m = \frac{D.L}{A} \dots\dots\dots (5)$$

Alors :

Où :

i_m : pente moyenne [m/km ou %],

L : longueur totale de courbes de niveau [km],

D : équidistance entre deux courbes de niveau [m],

A : surface du bassin versant [km²].

La valeur obtenue est : $i_m = 15,46\%$

II.4.5.2.4. Dénivelée spécifique :

La dénivelée spécifique permet d'utiliser la classification de l'O.R.S.T.O.M (l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-mer.) (tableau II.5), qui permet de définir les différents types de relief des bassins Versants quel que soient leurs superficies. Cette classification est représentée sur le tableau ci-dessous :

Tableau II.5 Classification des reliefs d'après l'O.R.S.T.O.M

R1	Relief très faible	$D_s < 10m$
R2	Relief faible	$10m < D_s < 25m$
R3	Relief assez faible	$25m < D_s < 50m$
R4	Relief modéré	$50m < D_s < 100m$
R5	Relief assez fort	$100m < D_s < 250m$
R6	Relief fort	$250m < D_s < 500m$
R7	Relief très fort	$D_s > 500m$

La dénivelée spécifique est définie par la relation suivante :

$$D_s = I_G \sqrt{A} \dots\dots\dots (6)$$

Avec :

I_G : pente globale

A : surface de BV

La valeur calculée est : $D_s = 304,13$ m qui correspond à un Relief fort. Cette valeur traduit le volume montagneux dans le bassin versant.

Pour conclure, il est résumé sur le tableau ci-dessous les caractéristiques morphométriques de bassin versant ROUINA ZEDDINE :

Tableau II.6 : Caractéristiques morpho métrique de bassin versant ROUINA ZEDDINE.

Superficie (Km ²)	892.31
Périmètre (Km)	207.18
Indice de compacité Kc	1.94
Altitude maximale (m)	1777
Altitude minimale (m)	180
Longueur du rectangle équivalent	93.32
Largeur du rectangle équivalent	9.43
Pente moyenne en %	15.42

II.4.6. Réseau hydrographique :

Le réseau hydrographique représente l'ensemble des cours d'eau permanents et temporaires ainsi que les talwegs, dans lesquels s'écoulent les eaux de surface, la partie infiltrée dans les nappes constitue une composition d'écoulement souterrain. Selon la figure 6, notre bassin est d'ordre 4.

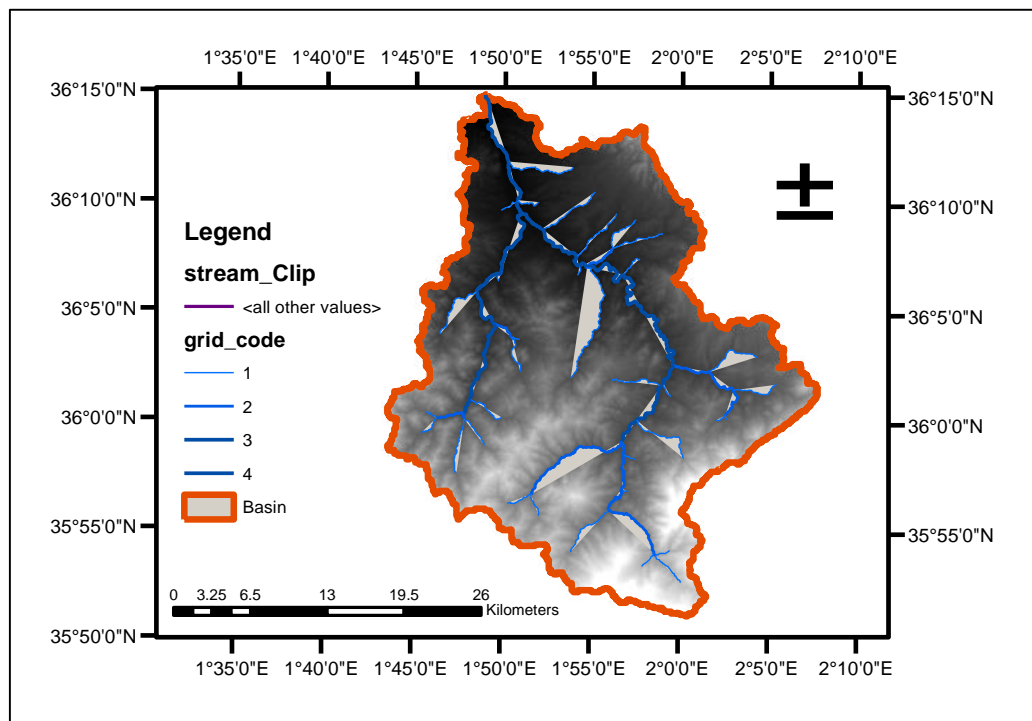


Figure II.6 : Carte du réseau hydrographique (réalisée sous ArcGIS 10.2).

CONCLUSION :

Dans ce chapitre on a présenté la région d'étude du sous bassin versant de Oued ROUINA ZEDDINE 0119 (sous bassin versant de Haut et Moyen Chélif) dont on a étudié les différents paramètres géologiques, hydrogéologiques et hydro climatiques actuelles de sous bassin, qui nous permet de connaître la situation existante, et le fonctionnement du bassin actuel. L'analyse des différents paramètres climatologiques montrent que la zone d'étude présente un climat semi-aride.

Chapitre III :
Méthodologie

Introduction :

Tous les modèles hydrologiques utilisés dans les études hydrologiques nécessitent des séries historiques de données sur la météorologie, la géographie, la géologie,... etc. Ces données doivent être bien choisies et traitées pour se rapprocher le plus possible de la réalité des événements climatiques.

III.1. Traitement des données :

Des données fiables sont essentielles pour le développement de modèles hydrologiques précis. Ces modèles sont utilisés pour prévoir des événements tels que les inondations et les sécheresses. La fiabilité des prévisions dépend directement de la qualité des données hydrologiques utilisées.

Les données recueillies sont entachées d'erreurs, cette constatation impose une critique de ces données. Les lacunes dans les séries de précipitations mensuelles sont dues être comblées afin de les homogénéiser au mieux et de faciliter ensuite la détection d'éventuelles instationnarités.

Le grand nombre de stations rendait pratiquement impossible de combler chaque lacune en utilisant les techniques de régression classiques [13].

Des logiciels sont disponibles pour le traitement de données, à savoir :

- **XLSTAT**

C'est un logiciel d'analyse des données statistiques développé sous forme de

Complément pour Microsoft Excel. Il inclut des outils pour la régression linéaire et non linéaire ainsi que d'autre technique de modélisation.

- **Hydrolab**

C'est un outil d'ajustement très simple pour un échantillon de données à partir d'une loi de probabilité, ainsi que la détermination de la pluie correspondant à chaque période de retour.

- **Le solveur**

Un solveur de données est un logiciel qui utilise des techniques mathématiques et algorithmiques avancées pour trouver des solutions optimales à des problèmes complexes. Employé dans divers domaines tels que la recherche opérationnelle, l'ingénierie, la finance et les sciences de la gestion, il permet d'optimiser les processus, de réduire les coûts ou de maximiser les profits. Les méthodes utilisées incluent la programmation linéaire, non linéaire, entière et les algorithmes heuristiques, permettant de traiter de grandes quantités de données et de variables, essentielles pour les décisions stratégiques des entreprises et des organisations [8].

▪ Système d'information géographique

Un système d'information géographique (SIG) est un système assisté par ordinateur pour l'acquisition, le stockage, l'analyse et présente tous les types de données spatiales et géographiques. Actuellement, plusieurs logiciels existent sur le marché : ArcGis, ArcMAP, Mapinfo...[23].

III.1.1. Collecte des données :

Une base de données a été construite sur la base des fichiers obtenus au niveau de l'Agence National des Ressources Hydriques (ANRH).

III.1.2. Choix des stations :

Les données utilisées sont des séries chronologiques de pluies provenant de 6 Stations. Ces données ont été recueillies auprès de l'Agence National des Ressources Hydriques (ANRH). En raison de l'absence de longues séries historiques ou de la présence de nombreuses lacunes dans les séries existantes, nous avons choisi ces 6 stations (tableau III.1) (figure III.1) [2].

Tableau III.1 : Les stations choisies

Sous bassin	Code de station	Type de station	Nom de station	X (m)	Y (m)	Z (m)
ROUINA ZEDDINE	011605	Pluviométrique	Thniet el had	412557.08	3969995.72	1162
	011901	Pluviométrique	El touaibia	404261.20	3997469.23	376
	011903	Pluviométrique	Toutia El Hassania	402634.15	3978701.59	959
	011904	Pluviométrique	Rouina Mairie	393441.91	4012490.55	216
	011906	Pluviométrique	Rouina mines	395150.25	4008085.03	343
	011905	Hydrométrique	Bir ouled Tahar	392159.37	4010104.75	331

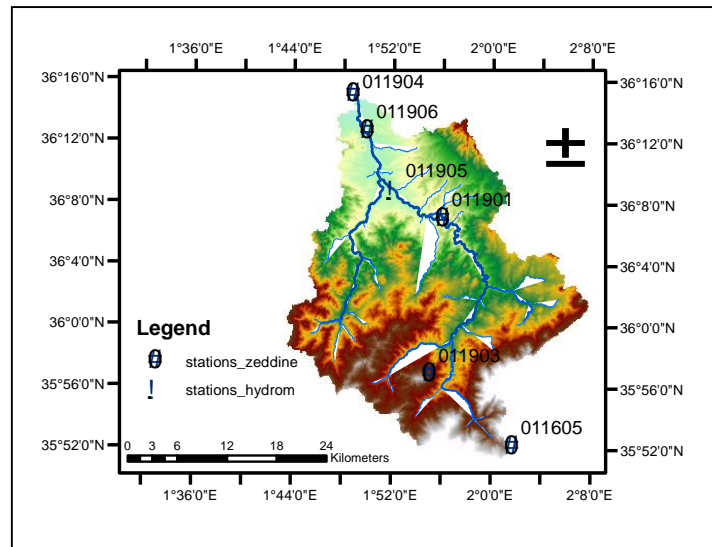


Figure III.1 : Carte de situation des stations du sous bassin versant Zeddine (réalisée sous ArcGIS 10.2)

III.3. Description du logiciel ArcGIS 10.2 :

Le logiciel ArcGIS 10.2 (figure III.2) est l'un des Systèmes d'Information Géographique (SIG) les plus utilisés. Ce logiciel offre de nombreuses possibilités pour la manipulation, la gestion, l'analyse et l'édition des données spatiales. Différentes couches d'informations spatiales peuvent être manipulées, permettant d'analyser une ou plusieurs couches sous le contrôle des autres. Le seul lien entre ces différentes couches est le lien spatial, c'est-à-dire, l'appartenance au même espace géographique et ayant le même système de coordonnées.

Les différentes couches d'informations décrivent un espace géographique terrestre déterminé. Elles peuvent correspondre à des documents cartographiques représentant des objets thématiques géographiquement identifiés (carte de photographies aériennes, images satellitaires, etc.) ou provenir d'analyses et de procédures de spatialisation (carte de la teneur en eau du sol, carte topographique, etc) [6].

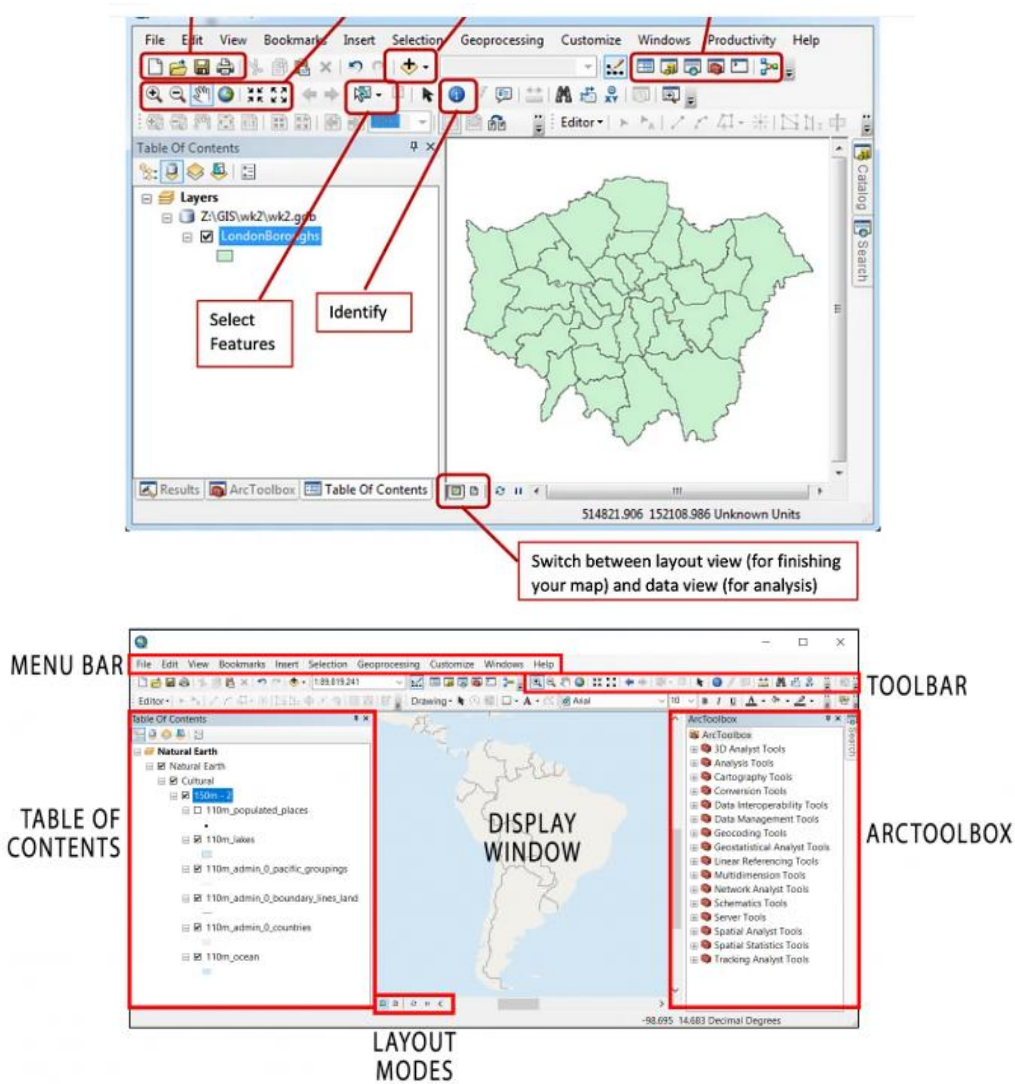


Figure III.2 : Interface du logiciel ArcGIS 10.2

III.3.1 Composantes de l'environnement ArcGIS :

ArcGIS 10.2 comprend trois applications principales (figure III.3) : ArcMap, ArcCatalog, et ArcToolbox



Figure III.3 : Les composantes de l'environnement ArcGIS 10.2 [6].

A l'aide de ces trois applications, on peut effectuer toutes les tâches SIG, de la plus simple à la plus avancée, y compris la cartographie, la gestion des données, l'analyse géographique, la mise à jour des données et le géotraitement ...etc (figureIII.4).

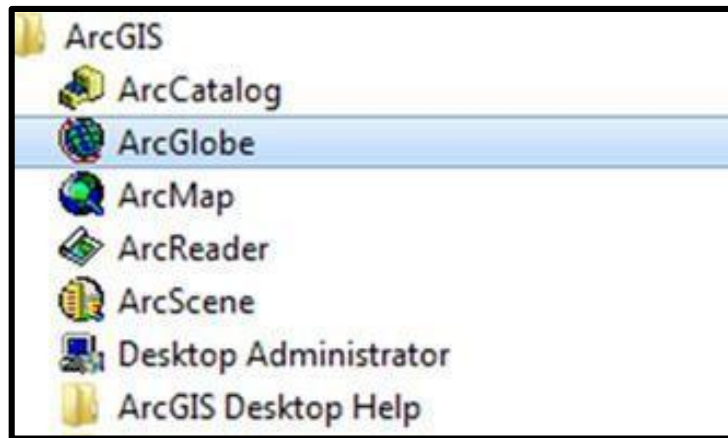


Figure III.4 : Les Applications d'ArcGIS. [6]

III.3.1.1 ArcMap :

Il est utilisé pour toutes les tâches de cartographie et de mise à jour, ainsi que pour les analyses associées aux cartes. ArcMap permet de visualiser, interroger, éditer, créer ou analyser des données sous forme de tables ou de cartes. ArcMap facilite la mise en page des cartes pour l'impression, l'intégration dans d'autres documents et l'édition de documents électroniques.

III.3.1.2 ArcCatalog :

ArcCatalog (figure III.5) est un explorateur de données tabulaires et cartographiques offrant des outils de gestion et d'organisation analogues à ceux offerts par les systèmes d'exploitation comme WINDOWS ou DOS (copier, renommer, effacer, créer des icônes, etc). Il est vivement conseillé d'utiliser ArcCatalog pour effacer les fichiers car ces fichiers sont accompagnés d'autres fichiers que l'explorateur de Windows, s

il est utilisé, ne permet pas de les effacer automatiquement. ArcCatalog permet aussi de visualiser les données tabulaires et des couches géographiques ainsi qu'une exploration des différents thèmes qui les constituent.

Permet de gérer les fichiers de données et l'organisation des bases de données ainsi que d'enregistrer et de visualiser les métadonnées.

ArcCatalog permet de passer en revue, organiser, distribuer et modifier les éléments de propriétés des données géographiques. L'interface permet d'employer des méthodes graphiques ou textuelles pour passer en revue, contrôler ou modifier l'ensemble des données [6].

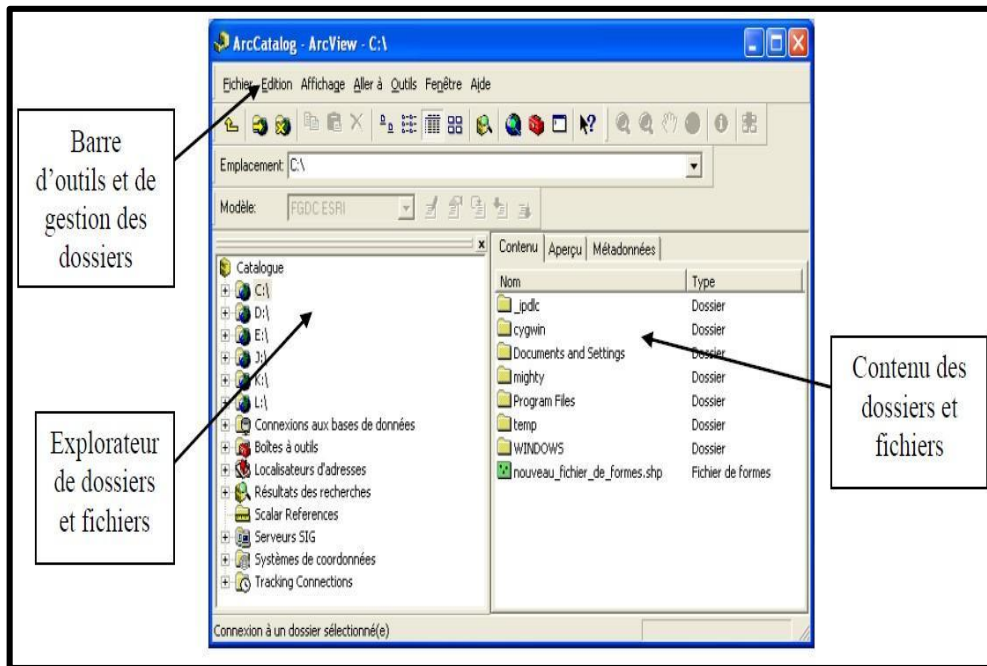


Figure III.5 : L'interface d'ArcCatalog [6].

III.3.1.3 ArcToolbox :

ArcToolbox (figure III.6) est une boîte à outils permettant d'effectuer des conversions et de transferts de format et aussi de projection. ArcToolbox est le module dans ArcGIS 10.2 qui permet à toutes les fonctionnalités puissantes de traitement et d'analyse. La boîte à outils fournit un ensemble très riche de fonctions de géotraitement. Il converti aussi les formats de données pour l'importation ou l'exportation de fichiers, ainsi que les changements de projection [6].

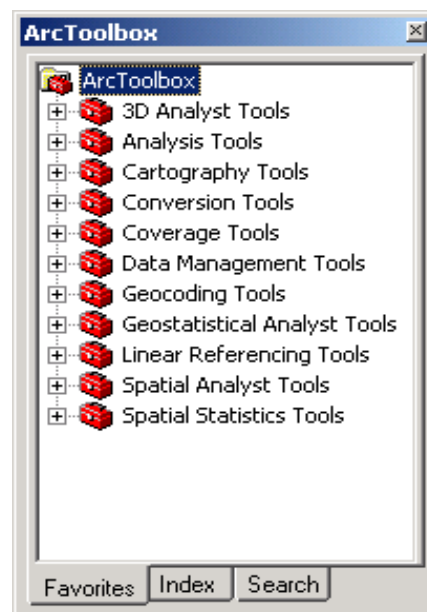


Figure III.6 : Les outils d'ArcToolbox. [6]

L'un des extensions les plus connues d'ArcGIS est Spatial Analyst tools (Modélisation spatiale avancée).

III.3.2 Géo-référencement :

Le géo-référencement est un processus permettant d'établir une relation entre les entités affichées dans votre système d'information géographique et leur position dans le monde réel. La terre est sphérique, et les cartes étant plates, la conversion de positions géographiques sur une surface de la terre en une surface plate nécessitant une formule mathématique appelée projection cartographique. Pour bien exploiter les données sur le SIG on utilise un système de coordonnées projetées (UTM) ou géographiques (WGS 84). Le géo-référencement transforme des données spatiales en données géographiques.

Le géo-référencement peut correspondre à trois types d'opérations différentes :

- La transformation des données spatiales en données géographiques par la déclaration d'un système de coordonnées.
- La transformation d'un système de coordonnées géographiques à un autre.
- La transformation des données spatiales en coordonnées géographiques par transformation algébrique [23][6].

III.3.3 Les systèmes de projections :

III.3.3.1 Le système de projection UTM :

C'est notre système de projection utilisé dans notre projet et pour notre zone située dans la zone 31 S. Le système de projection UTM est schématisé dans la figure (III.7) ci-dessous :

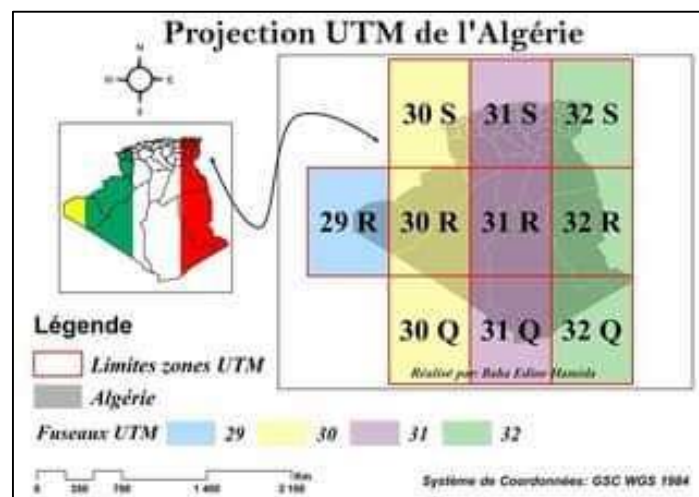


Figure III.7 : Système de projection UTM. [23]

III.4 Le choix du modèle :

Le choix ou le développement d'un modèle est un compromis entre le niveau de complexité du modèle, la disponibilité des données et la performance du modèle (Figure III.8). En effet, pour une quantité fixe de données disponibles, la performance d'un modèle hydrologique est optimale pour un certain degré de complexité. Un modèle trop simple ne permettra pas d'exploiter toutes les informations dérivables des données et, à l'inverse, il n'est pas opportun d'utiliser un modèle très complexe et non vérifiable à partir des données disponibles. En général, en fonction des données disponibles, un essai de modélisation peut permettre d'identifier le modèle le plus parcimonieux. La parcimonie est un principe consistant à n'utiliser que le minimum de causes élémentaires pour expliquer un phénomène. Un modèle parcimonieux sera le modèle le moins complexe, mais aussi performant que les autres.

Le choix d'un modèle dépend essentiellement de l'objectif de l'étude, des données disponibles, du milieu, des échelles spatio-temporelles et des moyens (matériels et financiers). Il faut aussi prendre en compte la facilité d'utilisation, qui concerne l'expérience du modélisateur ou de son équipe avec le modèle, ou encore la disponibilité de ressources pour l'apprentissage.

L'adéquation modèle-zone d'étude (milieu et échelles spatio-temporelles) consiste à s'assurer que le modèle est capable de reproduire les principaux processus hydrologiques du comportement hydrologique de la région d'étude à travers une revue de littérature [34].

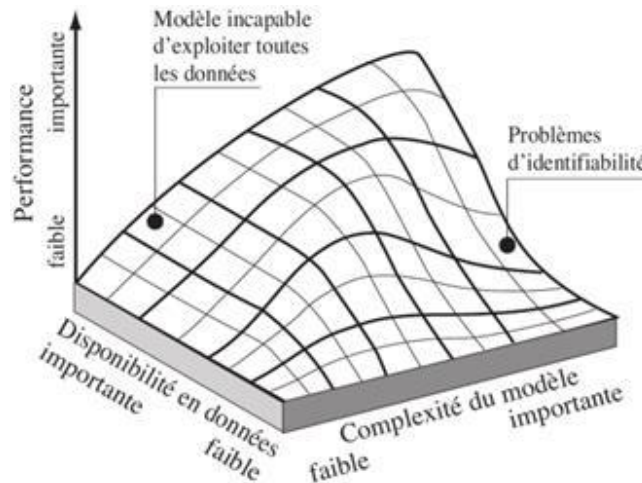


Figure III.8 : Relation entre données disponibles, complexité et performance d'un modèle hydrologique. [34]

Notre étude est portée sur le modèle SWAT (Soil and Water Assessment Tool) pour la simulation des débits liquides d'oued ZEDDINE (BV de Chélif).

III.5 Description du modèle hydrologique SWAT :

a. Définition :

Le modèle SWAT (Soil and Water Assessment Tool) est un modèle hydrologique semi-distribué basé sur des principes physiques, conçu et développé par les chercheurs de l'USDA (United States Department of Agriculture). Grâce à son approche physique, le modèle permet de reproduire les processus réels se déroulant dans l'environnement à l'aide de nombreuses équations complexes. SWAT est un modèle continu dans le temps, conçu pour réaliser des simulations sur de longues périodes. Il peut être utilisé pour simuler un seul bassin versant ou un système de plusieurs bassins versants hydrologiquement connectés. Chaque bassin versant est d'abord divisé en sous-bassins puis en unités de réponse hydrologique (HRU en anglais). Chaque HRU se distingue par une occupation du sol unique, un type de sol et de sous-sol spécifique, ainsi qu'une topographie moyenne. SWAT permet d'accéder aux différentes variables du bilan hydrologique à l'échelle de l'HRU pour chaque pas de temps (journalier, mensuel et annuel) sur toute la période de simulation [15].

b. Le couplage SWAT et SIG :

L'intégration avec les logiciels SIG (figure III.9) (figure III.10) tels que ArcMAP et ArcVIEW permet la gestion des données raster, vecteur, et alphanumériques. Elle facilite et automatise la préparation des données d'entrée, et rend plus conviviales les phases d'intégration, de manipulation, et de paramétrage des données liées à la simulation [31].



Figure III.9 : Architecture de l'interface du couplage SWAT et SIG [26].

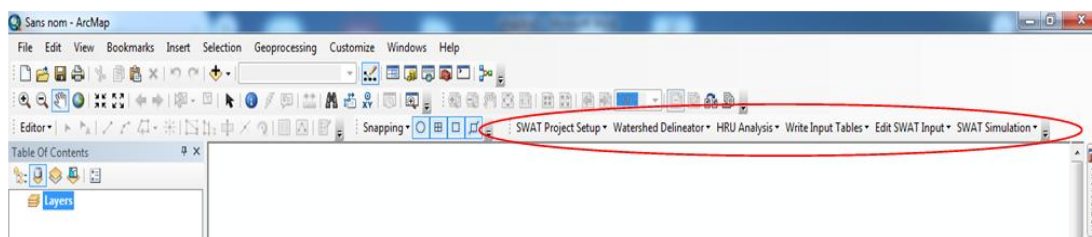


Figure III.10 : La barre ArcSWAT sous ArcGIS

c. Aspect hydrologique de SWAT :

Une fois que le bassin versant est organisé spatialement, le bilan hydrologique peut être calculé. Le cycle hydrologique se divise en deux phases (figure III.11) :

- Une phase dite terrestre, où les quantités d'eau, les sédiments, les pesticides, etc, apportées au réseau à partir de chaque sous-bassin sont déterminées.

$$SWt = SW0 + \sum_{t=1}^t (Rday\ i - Qsurf\ i - Ea\ i - Wseep\ i - Qgw\ i) \dots \dots \dots (7)$$

- **SWt** : le contenu final en eau du sol (à la fin du jour i) (mm) ;
- **SW0** : le contenu initial en eau du sol (au début du jour i) (mm) ;
- **Rday** : les précipitations au jour i (mm) ;
- **Qsurf** : le ruissellement de surface au jour i (mm) ;
- **Ea** : l'évapotranspiration au jour i (mm) ;
- **Wseep** : Percolation (mm) ;
- **Qgw** : débit de base (mm).

- Une phase dite « de routage », où le mouvement de l'eau et des différents éléments est modélisé à travers le réseau hydrographique jusqu'à l'exutoire [31], [28].

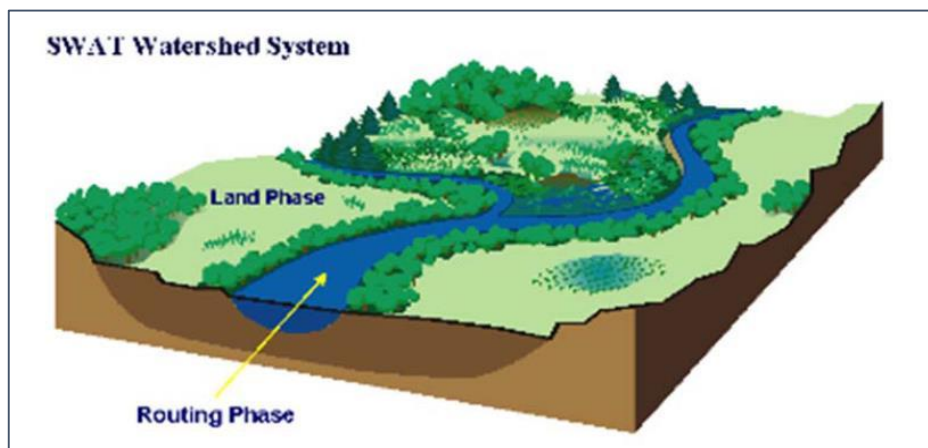


Figure III.11 : Phases du cycle hydrologique modélisé par SWAT. [28]

d. Préparation des données d'entrée ArcSWAT :

○ Données topographiques :

Les données de Modèle Numérique de Terrain (MNT) : Utilisées pour délimiter le bassin versant et générer le réseau hydrographique.

○ Données d'utilisation des sols :

Les cartes d'occupation des sols : Informations sur la couverture et l'utilisation des terres (figure III.12).

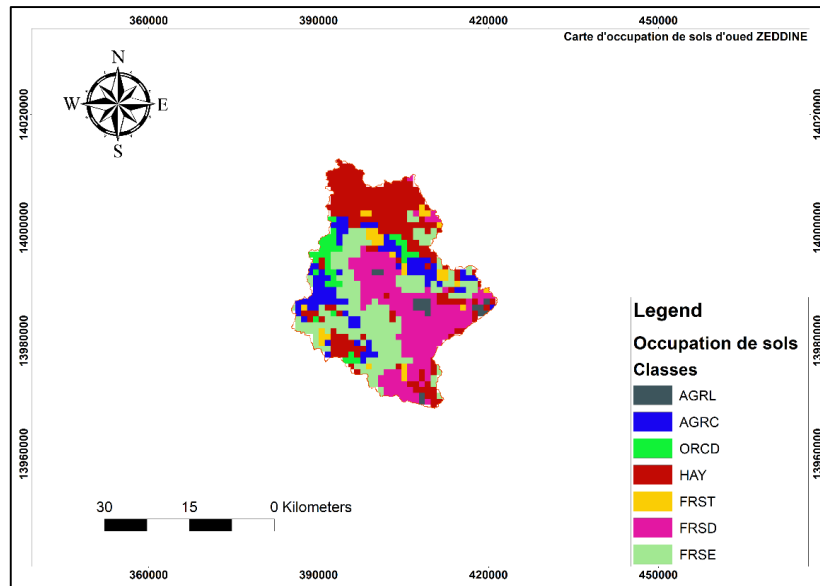


Figure III.12 : Carte d'occupation de sols d'oued ZEDDINE (réalisée par, nos soins sous ArcGIS 10.2).

○ **Données pédologiques :**

Les cartes des sols : Informations sur les types et les propriétés des sols (figure III.13).

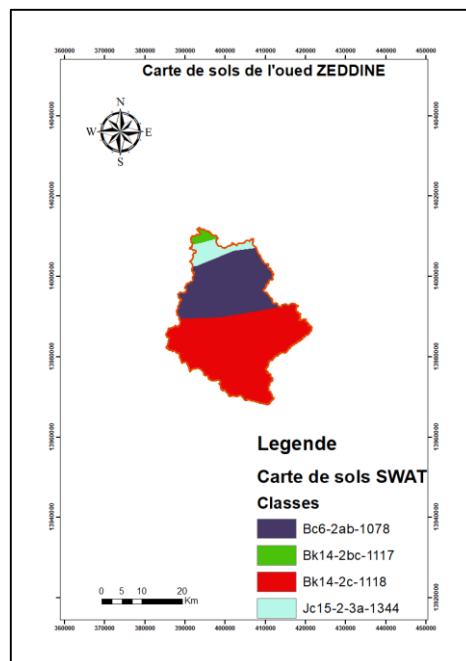


Figure III.13 : Carte de sols de l'oued ZEDDINE (réalisée par, nos soins sous ArcGIS 10.2).

- **Données climatiques :**

Les précipitations, la température, le vent, l'humidité relative, la radiation solaire : Nécessaires pour la modélisation des processus hydrologiques.

- e. **Les étapes d'une simulation avec SWAT :**

La simulation avec ArcSWAT (Soil and Water Assessment Tool) est un processus complexe qui nécessite plusieurs étapes distinctes. Voici une description générale des étapes nécessaires pour réaliser une simulation avec ArcSWAT.

-  **Collecte des données d'entrée :**

- Données topographiques : Utiliser un modèle numérique de terrain (MNT) pour définir les bassins versants et les cours d'eau.

- Données climatiques : Recueillir des données sur la précipitation, la température, l'humidité, le vent, et la radiation solaire.

- Données d'utilisation des terres : Obtenir des informations sur l'occupation des sols et les pratiques de gestion des terres.

- Données sur les sols : Inclure des propriétés des sols telles que la texture, la profondeur, la conductivité hydraulique, etc [4].

-  **Préparation des données dans ArcGIS :**

- Importer les données dans ArcGIS et les organiser correctement.

- Utiliser les outils d'ArcSWAT pour définir les bassins versants, les sous-bassins et les segments de rivière.

-  **Configuration du modèle ArcSWAT :**

- Définir les paramètres du modèle et les paramètres de simulation.

- Créer le projet ArcSWAT en utilisant l'interface de l'extension ArcSWAT dans ArcGIS [16].

-  **Calibrage et validation du modèle :**

- Calibrer le modèle en ajustant les paramètres pour obtenir une correspondance entre les résultats simulés et les données observées.

- Valider le modèle en utilisant un jeu de données indépendant pour vérifier la précision de la simulation [16].

-  **Exécution de la simulation :**

- Lancer la simulation pour la période définie.

- Analyser les résultats, y compris les débits, la qualité de l'eau, l'érosion des sols, etc [18].

Analyse et interprétation des résultats :

- Interpréter les résultats pour évaluer l'impact des pratiques de gestion des terres, des scénarios climatiques, etc.

- Utiliser les sorties du modèle pour la prise de décision et la planification de la gestion des ressources en eau [30].

f. La barre d'outils ArcSWAT :

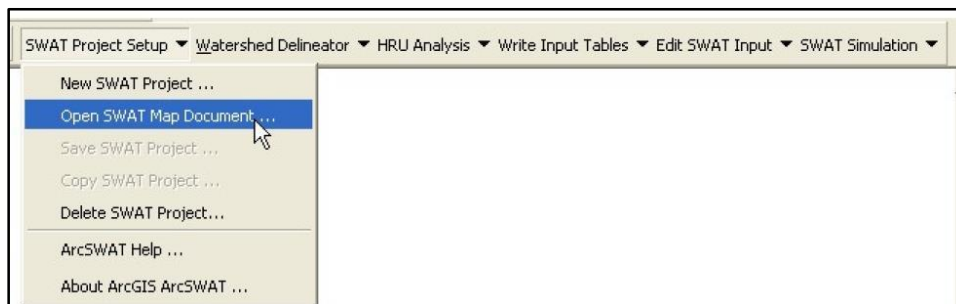


Figure III.14 : Barre d'outils d'ArcSWAT. [28]

ArcSWAT est une extension pour ArcGIS qui permet de simuler les processus hydrologiques et de gestion des terres d'un bassin versant. Voici les principales fonctionnalités de la barre d'outils ArcSWAT :

1. Project Setup (Configuration du projet) :
 - ✓ New SWAT Project (Nouveau projet SWAT) : Permet de créer un nouveau projet SWAT.
 - ✓ Open SWAT Map Document (Charger un projet SWAT) : Permet de charger un projet SWAT existant.
2. Watershed Delineation (Délimitation du bassin versant) :
 - ✓ Define Watershed Outlet(s) (Définir les exutoires du bassin versant) : Permet de définir les points de sortie du bassin versant.
 - ✓ Delineate Watershed (Délimiter le bassin versant) : Génère la délimitation du bassin versant basée sur le MNT (Modèle Numérique de Terrain).
3. HRU Analysis (Analyse des unités de réponse hydrologique HRU) :
 - ✓ Land Use/Soil/Slope (Utilisation des terres/Sols/Pente) : Permet de définir les caractéristiques du bassin versant en fonction de l'utilisation des terres, des types de sols et des pentes.
 - ✓ Overlay and Calculate HRUs (Superposer et calculer les HRU) : Génère et calcul les HRU en superposant les différentes couches de données.
4. Weather Data Definition (Définition des données météorologiques) :
 - ✓ Import Weather Data (Importer des données météorologiques) : Permet d'importer des données météorologiques nécessaires à la simulation SWAT.
5. Write Input Tables (Écrire les tables d'entrée) :

- ✓ Write SWAT Input Tables (Écrire les tables d'entrée SWAT) : Génère les tables d'entrée nécessaires pour l'exécution du modèle SWAT.
- 6. SWAT Simulation (Lancement de la simulation SWAT) :
 - ✓ Run SWAT (Lancer SWAT) : Permet d'exécuter la simulation SWAT.
 - ✓ SWAT Output (Résultats SWAT) : Permet d'accéder aux résultats de la simulation.
- 7. Results (Résultats) :
 - ✓ Time Series Plot (Graphique de séries temporelles) : Affiche les résultats de la simulation sous forme de séries temporelles.
 - ✓ Map Output (Carte des résultats) : Génère des résultats de la simulation.

III.6 Calage et validation du modèle :

Le calage des modèles consiste à ajuster les paramètres d'un modèle afin de simuler au mieux le comportement hydrologique d'un bassin. Cette opération peut être réalisée manuellement, par tâtonnements, ou automatiquement grâce à des algorithmes d'optimisation. Les objectifs principaux sont souvent les suivants :

- ❖ Une correspondance précise entre les volumes mesurés et simulés ;
- ❖ Une bonne concordance de la forme des hydrogrammes mesurés et simulés ;
- ❖ Une adéquation précise des débits de pointe en termes de temps de réponse et de volumes ;
- ❖ Une bonne correspondance des débits faibles.

À la fin de la calibration d'un modèle, il est crucial de vérifier la reproductibilité des résultats et la représentativité des paramètres ajustés. Cette étape, appelée validation, consiste à tester le modèle dans des conditions différentes de celles utilisées pour l'étalonnage. [21] propose une approche hiérarchique en quatre étapes pour la validation des modèles :

1. Application du modèle à un ensemble de données non utilisé pour l'a calibration.
2. Transposition du modèle à d'autres zones géographiques.
3. Application du modèle au bassin versant d'étalonnage avec des données reflétant un changement d'occupation du sol ou de climat.
4. Transposition du modèle à d'autres zones climatiques.

Ce processus permet de s'assurer que le modèle est robuste et fiable dans des conditions variées.

III.7 Les critères de performances :

Pour évaluer les performances des modèles hydrologiques et la correspondance entre les données simulées et les données observées, plusieurs critères de performance ont été utilisés dans diverses études à travers le monde.

III.7.1 Le critère de NASH :

L'efficacité de Nash-Sutcliffe a été largement employée dans diverses études. Une valeur de Nash égale à 1 indique une correspondance parfaite entre les données simulées et les données observées.

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2} \right] \dots\dots\dots (8)$$

Où $Q_{obs,i}$ est le débit observé, $Q_{sim,i}$ est le débit simulé, et $\overline{Q_{obs}}$ est le débit observé moyen.

III.7.2 Le critère de R^2 :

Ce critère peut être appliqué aux logarithmes ou aux racines des variables, car il tend à accorder une importance considérable à la représentation précise des valeurs élevées, ce qui peut introduire un biais, notamment dans les simulations des récessions de crues (Boyle et al., 2000). En nous basant sur la corrélation entre les séries simulées et observées, nous pouvons également viser à maximiser le coefficient de détermination R^2 .

$$R^2 = \left[\frac{[\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}}) \times (Q_{sim,i} - \overline{Q_{sim}})]^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \overline{Q_{sim}})^2}} \right]^2 \dots\dots\dots (9)$$

Où $Q_{obs,i}$ et $Q_{sim,i}$ est le débit observé et simulé respectivement, et $\overline{Q_{obs}}$ et $\overline{Q_{sim}}$ est le débit observé moyen, et le débit simulé moyen respectivement.

III.7.3 Le critère de RMSE :

La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est également un indicateur fréquemment utilisé pour évaluer la divergence entre les simulations et les observations, en fournissant notamment une indication de la dispersion entre les deux. Plus la RMSE est faible, plus l'écart entre les simulations et les observations est réduit.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_{obs,i})^2} \dots\dots\dots (10)$$

Où $Q_{obs,i}$ est le débit observé, $Q_{sim,i}$ est le débit simulé, N est le nombre de points données qui ont été observés.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons abordé la méthodologie suivie pour la modélisation hydrologique qui sera incluse dans le chapitre suivant.

Les données des stations choisies du sous bassin versant d'oued ROUINA ZEDDINE ont été collectées et traitées. Pour la suite de la modélisation, on a choisi le modèle SWAT.

Chapitre IV:
Résultats et discussions

IV.1 INTRODUCTION :

Après la présentation de la zone d'étude et la méthodologie, ce chapitre s'intéresse à la présentation des résultats de la simulation des débits liquides d'oued ZEDDINE (BV de Chélif).

Le modèle SWAT a connu plusieurs versions depuis sa création, pour notre étude nous sommes intéressés à la version SWAT 2012. Le modèle se distingue par son utilisation extensive, attestée par environ 4000 publications [32]. De ces publications, plus de 200, publiées entre 2005 et 2019, se concentrent sur des études menées en Afrique [1]. Le modèle SWAT bénéficie d'un réseau d'utilisateurs dynamiques et présents dans toutes les régions du globe.

Notre travail est structuré comme suit :

- L'introduction des données dont le modèle a besoin.
- La modélisation hydrologique de la zone d'étude (simulation des débits) par SWAT.
- La discussion et la justification des résultats.

IV.2 L'entrée des données :

Pour son application, le modèle SWAT nécessite certaines données, comme on a indiqué auparavant.

IV.2.1 MNT (*Modèle Numérique du Terrain*) :

Pour notre étude on a utilisé un modèle numérique du terrain qu'on a téléchargé à partir du site (www.usgs.gov).

En vue de la situation de notre sous bassin versant, on a été obligé de faire fusionner plusieurs images rasters avec le logiciel Arc MAP par la fonction « Mosaic to new raster » pour avoir un MNT qui couvre notre sous bassin versant d'oued ZEDDINE.

IV.2.2 Carte d'occupation des sols :

Pour notre étude on a utilisé l'image raster Land use d'Afrique.

On a fait le découpage d'après la fonction « Extract by Mask » dans Arc MAP (utiliser la délimitation du sous bassin qui a été converti en polygone), et ensuite on a converti le résultat en polygone, on doit avoir une image contenant les types d'occupation du sol.

Cependant, le nombre de classes d'occupation du sol est restreint, ce qui entraîne la combinaison de plusieurs types d'occupation du sol qui auraient dû être distingués. Pour aligner ces données avec les codes d'occupation du sol de SWAT, il a été nécessaire de créer de nouveaux codes basés sur les observations de terrain et plusieurs hypothèses [31].

IV.2.3 Carte de types de sols :

Nous avons utilisé la carte mondiale des sols téléchargée depuis le site de la FAO et extrait la carte de notre zone d'étude en utilisant la fonction « Extract by Mask » d'Arc MAP. Les tables attributaires de cette carte ne contenaient que des codes qui n'étaient pas compatibles avec la base de données SWAT, laquelle comporte 202 types de sols.

Pour résoudre ce problème nous avons téléchargé MapWindow GIS et installé MWSWAT, une version de SWAT intégrée dans MapWindow GIS. Nous avons ensuite mis à jour la base de données ArcSWAT.mdb avec celle de MWSWAT.mdb, qui contient environ 5000 types de sols de notre carte correspondaient à ceux de la nouvelle base de données.

IV.2.4 Données pluviométriques :

Pour les données pluviométriques (précipitations, débit, ensoleillement, humidité relative, et vitesse du vent) ; des séries de données de 5 ans (2007-2012) de 6 stations à partir de l'Agence National des Ressources Hydriques (ANRH) ont été utilisées.

IV.3 Le lancement de la simulation :

Après avoir entré toutes les données nécessaires pour la construction du modèle la fonction « Run SWAT » a été sélectionnée (figure IV.1).

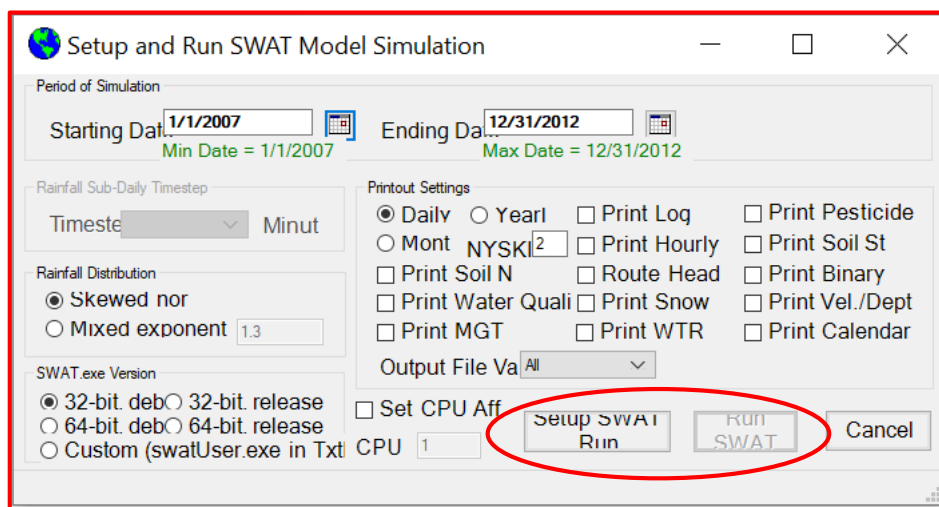


Figure IV.1 : Lancement de simulation avec SWAT.

IV.4 Résultats et discussion :

L'objectif principal de la modélisation pluie-débit du sous bassin versant de l'oued ROUINA ZEDDINE à travers le modèle SWAT c'est la vérification de l'efficacité et l'applicabilité de ce modèle dans cette zone.

Les tableaux illustrés présentent les résultats de la calibration et la validation du modèle SWAT de notre sous bassin versant d'oued ZEDDINE (Tableau IV.2 et IV.3), ainsi que les paramètres optimisés et leurs valeurs (Tableau IV.1).

Tableau IV.1 : Valeurs des paramètres calibrés du modèle SWAT.

Paramètres calibrés	Définition	Unité	Marges	Résultats du calibrage
CN2	Numéro de courbe de ruissellement pour la condition d'humidité	-	35 - 98	83
SOL_AWC	Capacité en eau disponible de la couche de sol	mm H ₂ O/mm Sol	0 - 1	0.017
CANMX	Capacité maximale de stockage du couvert végétal	mm H ₂ O	0 - 100	40
ESCO	Facteur de compensation d'évaporation du sol	-	0 - 1	0.9
EPCO	Facteur de compensation de l'absorption par les plantes	-	0 - 1	1
SLSUBBSN	Longueur Moyenne de la pente	m	10 - 150	50
ALPHA_BF	Facteur alpha de l'écoulement de base	jour	0 - 1	0.95
SURLAG	Temps de retard de l'écoulement de surface	jour	0.05 - 24	12

Pour évaluer les performances du modèle SWAT, on a utilisé le coefficient de

Nash-Sutcliffe (**NSE**) et le coefficient de corrélation (**R²**), ainsi que le coefficient **RMSE**.

Tableau IV.2 : Critères d'évaluation de la performance. (Moriasi, Guitau, Pai, et Daggupati, 2015)

Critères	Non satisfaisant	Satisfaisant	Bien	Très bien
NSE	$NSE \leq 0.50$	$0.50 < NSE \leq 0.7$	$0.70 < NSE \leq 0.80$	$NSE > 0.80$
R^2	$R^2 < 0.40$	$0.40 \leq R^2 \leq 0.60$	$0.60 \leq R^2 \leq 0.80$	$R^2 > 0.80$
RMSE	$RMSE \geq 30\%$	$20\% \leq RMSE < 30\%$	$10\% \leq RMSE < 20\%$	$RMSE < 10\%$

Calibration et validation :**Tableau IV.3 :** Résultats des coefficients de performance du modèle.

Phase \ Critères	NSE	R^2	RMSE
Calibration	0.51	0.56	0.70
Validation	0.54	0.65	0.60

Les résultats pour notre sous-bassin montrent des taux de performance satisfaisants pour les valeurs de NSE et R^2 et non satisfaisants pour les valeurs de RMSE.

Dont on a arrivé à un critère de Nash-Suttcliffe de 0.51, d'un coefficient de corrélation de 0.56, et d'un coefficient RMSE de 0.70, en phase de calibration et 0.54, 0.65, 0.60, par ordre en phase de validation.

Les valeurs enregistrées dans la phase de validation sont meilleures par rapport à la phase de calibration.

Les figures IV.2 et IV.3 représentent les graphiques des débits observés et simulés issus de la modélisation.

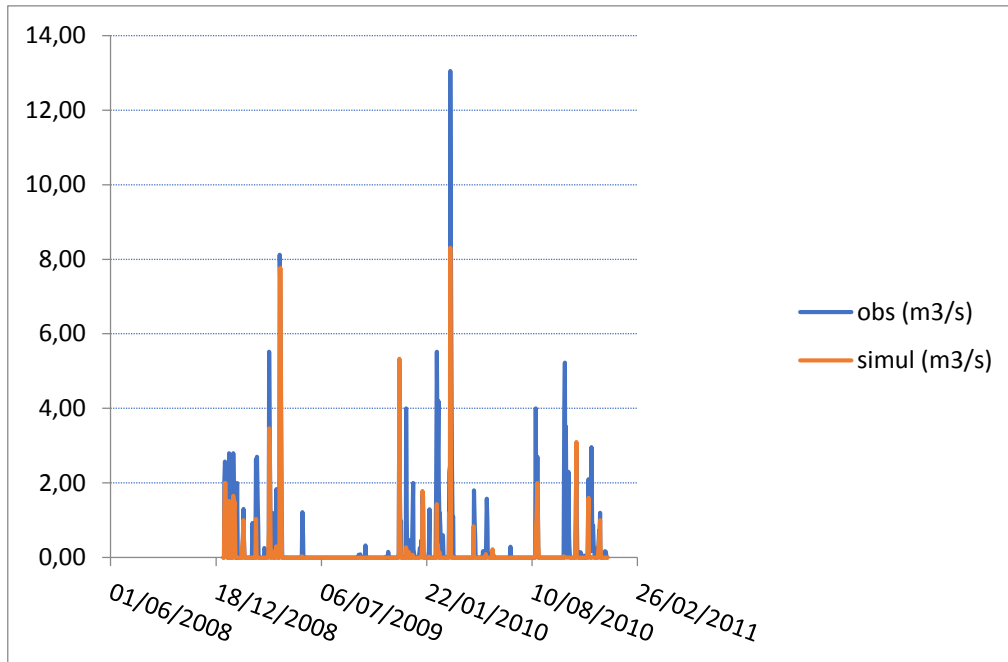


Figure IV.2 : Les débits observés et simulés pour la phase de calibration.

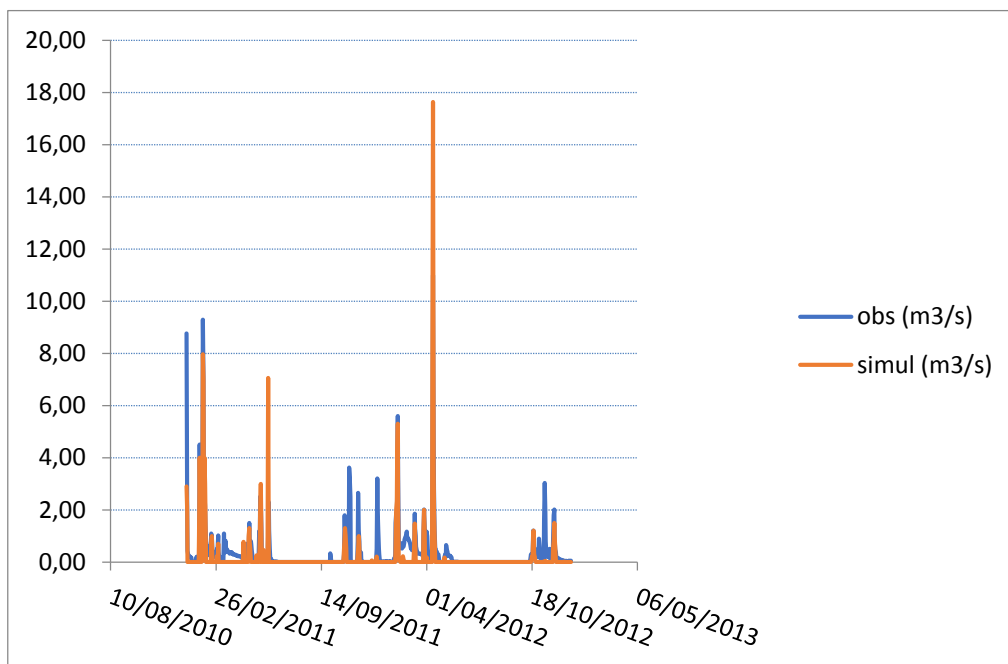
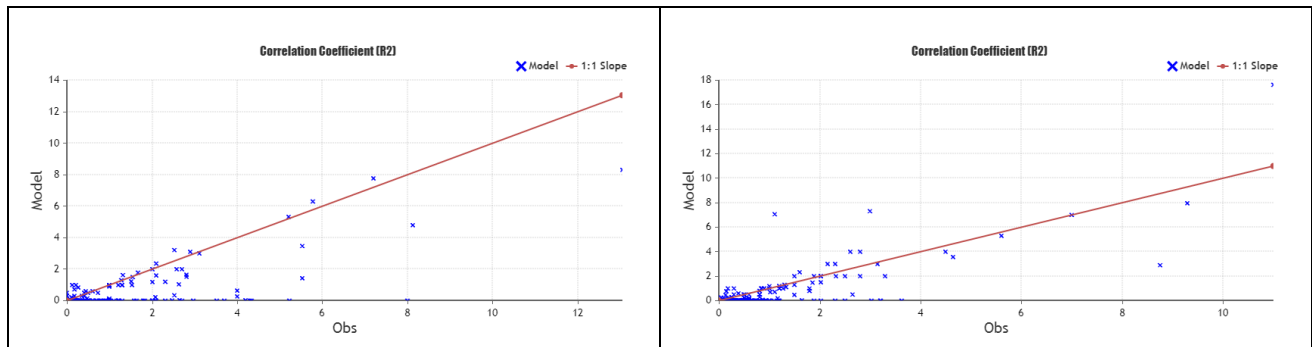


Figure IV.3 : Les débits observés et simulés pour la phase de validation.



Calibration

Validation

Figure IV.4 : Le coefficient de corrélation R^2 .

Ces faibles résultats obtenus lors de notre étude c'est la conséquence de plusieurs raisons :

❖ **Précision de données de sol :**

Dans notre cas, nous n'avons pas les données mesurées sur le terrain. Nous avons regardé les paramètres de sol qu'on doit fournir au modèle. On a utilisé les données de la FAO. Mais vue la faible résolution de la carte, classée hydrologiquement (selon l'infiltrabilité) elle ne donne que quatre types de sol pour notre surface de 892.31 Km².

❖ **Calibration incorrecte :**

Le modèle SWAT devrait être calibré pour ajuster ses résultats aux données de sortie réelles. Sans une calibration adéquate, le modèle produira des résultats avec erreurs. Pour notre cas nous avons fait un calibrage manuel qui est connu par son incohérence où différents utilisateurs sont obtenus des résultats différents pour le même modèle et les mêmes données, de plus le modèle SWAT a de nombreux paramètres qui interagissent de manière complexe, rendant difficile de comprendre et de gérer toutes les interactions manuellement.

❖ **Paramètres calibrés :**

Le modèle SWAT a de nombreux paramètres, pour notre étude nous avons choisi huit paramètres seulement par rapport à la complexité du modèle et les contraintes du temps.

IV.5 Conclusion :

L'optimisation dans SWAT est utilisée pour identifier des paramètres de modèle à prédire la série de débit après un événement pluvieux. L'application du modèle nécessite un modèle numérique du terrain, des données sur les types de sol, l'occupation du sol, et des données météorologiques. La calibration des paramètres de modèle sert à améliorer la fonction objective.

Les résultats de la simulation sont parfois non satisfaisants à satisfaisants cela dépend de la qualité des données et de la rigueur du processus de calibration.

Les résultats obtenus démontrent que la simulation des débits d'oued ZEDDINE, à l'aide du modèle hydrologique SWAT, peut être utilisée pour prédire ses débits futurs et dans des bassins versants similaires, conduisant à une gestion efficace des ressources en eau, qui enrichit la littérature sur la simulation des débits par le modèle SWAT et notamment dans la région nord algérien.

Conclusion

Conclusion :

Pour développer des stratégies appropriées pour la gestion des ressources en eau et participer au domaine de la modélisation hydrologique et de la prédiction des débits dans les sous-bassins qui pose problème dans les stations du bassin du Cheliff, nous avons réalisé cette étude pour la calibration des paramètres du modèle SWAT, dans la région du haut et moyen Cheliff. Des séries de précipitations et de débits ont été choisies et traitées qui couvrent le sous-bassin d'oued Zeddine à partir des données disponibles de la période 2007 à 2012.

Le résultat donne un modèle dont les débits calculés sont plus ou moins proches des débits observés. Etant donné la complexité du modèle, ces performances auraient été très difficiles à atteindre par calibration manuelle.

L'amélioration de la précision de la prévision peut avoir lieu en prenant en compte plusieurs paramètres d'entrée et les conditions limites de température d'évapotranspiration, ...etc.

Les résultats obtenus démontrent que la simulation des débits d'oued Zeddine, à l'aide du modèle hydrologique SWAT, peut être utilisée pour prédire les débits futurs dans ce bassin et dans le reste des sous bassins de cette région.

Références bibliographiques

Références bibliographiques :

1. AKOKO, George, et al. A review of SWAT model application in Africa. *Water*, 2021, 13.9: 1313.
2. Amiar Sakina, Modélisation hydrologique pluie – débit et l’impact du changement climatique sur le cycle de l’eau. Cas Oued Cheliff. Bassin versant du Haut et Moyen Cheliff, thèse de doctorat, 2021, université Aboubakr Belkaid Telemcen.
3. Amiar, S., Bouanani, A., Baba-Hamed, K., Belarbi, H. (2020). Variabilité pluviométrique dans le bassin versant du Haut et Moyen Cheliff. *Revue des sciences de l’eau*.
4. ARNOLD, Jeffrey G., et al. SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 2012, 55.4: 1491-1508.
5. Bendaoud Hadjer, modélisation pluie-débit par le modèle conceptuel GR2M : cas du bassin versant de l’oued Zeddine, mémoire de master, 2018, université Saad Dahleb Blida.
6. Benhamidcha Esmâ, modélisation hydrologique du bassin versant de l’oued Saf Saf par HEC-HMS, mémoire de master, 2019, université de Baji Mokhtar Annaba.
7. Bertrandias, F., Bertrandias, J-P. (1994). *Mathématiques pour les sciences de la nature et de la vie*. Collection Grenoble Sciences, p187.
8. BERTSIMAS, Dimitris; GAMARNIK, David; TSITSIKLIS, John N. Estimation of time-varying parameters in statistical models: an optimization approach. In: *Proceedings of the tenth annual conference on Computational learning theory*. 1997. p. 314-324.
9. Bouanani, A. (2004). *Hydrologie, Transport solide et modélisation. Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW-Algérien)*. Thèse de Doctorat d'état, Univ. Tlemcen
10. Bouziane. A, cours modélisation hydrologique, Ecole Mohammadia d’ingénieurs.
11. Charles Perrin, vers une amélioration d’un modèle global pluie-débit au travers d’une approche comparative, 2000, Institut national polytechnique de GENOBLE.
12. Dassargues. A, modèles mathématiques en hydrogéologie, 1995, programme tempus : science de l’eau et de l’environnement, p125.
13. Elmeddahi Yamina, les changements climatiques et leurs impacts sur les ressources en eau, thèse de doctorat, 2016, université Hassiba Ben Bouali Chlef.
14. Eric Gaume. *Hydrologie des versants et des bassins versants et modélisation pluie-débit*. Ecole nationale des ponts et chaussées. 2004-2005.
15. Gaborit, E., Pelletier., Vanrolleghem, P.A., et Anctil, F. (2010), *Presse scientifique du CNRC*.
16. GASSMAN, Philip W., et al. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50.4: 1211-1250.

Références bibliographiques

17. GUO, Yuhan, et al. Regionalization of hydrological modeling for predicting streamflow in ungauged catchments: A comprehensive review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2021, 8.1: e1487.
18. K. C. Abbaspour, J. Yang, I. Maximov, R. Siber, K. Bogner, J. Mieleitner, J. Zobrist and R. Srinivasan, "Spatially-Distributed Modelling of Hydrology and Water Quality in the Prealpine Alpine Thur Watershed Using SWAT," *Journal of Hydrology*, Vol. 333, No. 2-4, 2007.
19. Kessasra Fares, cours modélisation hydrogéologique M1 Hydrogéologie, 2020, université de Jijel.
20. Kettab, A., Mitiche, R., et Bennaçar, N, (2008), de l'eau pour un développement durable : enjeux et stratégies, *Revue des sciences de l'eau*.
21. KLEMEŠ, Vit. Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological sciences journal*, 1986, 31.1: 13-24.
22. Lajoie, M., 1999, L'approche éco systémique et la gestion par bassin versant, 39 p. *Models, Part I - A discussion of principles, J. Hydrol.*, 10, 282–290.
23. Larbi Abdelmadjid, cours SIG master informatique, 2021/2022, université de Béchar.
24. Michel, C, modèles hydrologiques à l'échelle du bassin versant, 1987.
25. OUADJA Abid, cours protection contre les crues et inondations M2 Hydraulique Urbaine, 2023/2024, université Hassiba Ben Bouali Chlef.
26. Radjah Soufyane, modélisation pluie-débit par le modèle SWAT (Application au bassin versant des Issers), Ecole National Polytechnique.
27. Ramde Wend Noaga, modélisation pluie-débit du bassin versant du Mouhoum à Banzon au Burkina Faso application du modèle hydrologique HEC-HMS, mémoire de master, 2019, Institut international de l'ingénierie.
28. Reffai, R., Bessouda, A., analyse de l'impact des inondations à l'aide du SIG et le modèle Arc SWAT dans le bassin versant de Saf Saf Skikda, mémoire de master, 2017, université Baji Mokhtar Annaba.
29. Saidi, A., 2007, Ministère des ressources en eau, direction des études et des aménagements hydrauliques, Algérie.
30. SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J. G.; JONES, C. A. Hydrologic modelling of the United States with the soil and water assessment tool. *International Journal of Water Resources Development*, 1998, 14.3: 315-325.
31. TADRIST Nassima, impact des particulier fines sur la recharge des nappes à partir des lachers de barrages – application au barrage de Boukourdane (Tipaza), thèse de doctorat, 2020, université Saad Dahleb Blida.
32. TAN, Mou Leong, et al. A review of SWAT applications, performance and future needs for simulation of hydro-climatic extremes. *Advances in Water Resources*, 2020, 143: 103662.
33. Winchell, M., Srinivasan, R., Diluzio, M., Arnold, J. Arc SWAT interface for SWAT 2012. (2013). Texas Agrilife Research.

Références bibliographiques

34. Yetchékpou Patrick Gbouhoui, modélisation hydrologique de bassin emboîtes du Nakanbe au Burkina Faso dans un contexte de changement global, thèse de doctorat, 2021, Ecole Doctorale GAIA.
35. Zekouda Naima, modélisation des crues d'oued Ouahrane pour la gestion intégrée des risques d'inondation, mémoire de magister, 2009, université Hassiba Ben Bouali Chlef.