

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة

التعليم

يسمى العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد -

تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de BIOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Hydrobiologie marine et continentale

Spécialité : Sciences de la mer

Par : MAMMAR Otmane

Sujet

Mise en œuvre du modèle agro-hydrologique SWAT dans le bassin transfrontalier de Mouilah

Soutenu publiquement, le / / , devant le jury composé de :

SMAHI Djamel-eddine	M.A.A	Université de Tlemcen	Président
BOUZID Samia	M.A.A	Université de Tlemcen	Examinatrice
ZETTAM Amin	M.C.A	Université de Tlemcen	Encadreur

Année universitaire : 2022/2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

"سُبْحَانَكَ لَا عِلْمَ لَنَا إِلَّا مَا عَلَّمْتَنَا ^{صَلِّ} إِنَّكَ
أَنْتَ الْعَلِيمُ الْحَكِيمُ"

"سورة البقرة الآية : 32"

Remerciements



Avant tout je remercie « Allah » qui nous attende ce jour pour faire ce travail.

Je tiens tout d'abord à exprimer notre profonde respect et remerciements à mon encadrant **ZETTAM AMIN**, d'avoir encadré ce travail, Un grand merci pour ses directives, ses conseils, ses encouragements, sa bonne honneur et surtout sa disponibilité et son suivie pour la réalisation de ce travail.

Mon vifs remerciements à Monsieur **SMAHI Djamel-eddine**, d'avoir accepté de présider le jury de ce soutenance.

Je offre aussi nos sincères remerciements à Mme **BOUZID SAMIA** , d'avoir bien voulu examiner notre travail.

Enfin, je profite de ces quelques lignes pour remercier tous les personnes qui avons nous aider de près ou de loin au bonne déroulement de ceux travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

À mon père, mon support dans ma vie, qui m'a dirigé vers la gloire.

À ma chère Mère, aucun dédicace ne serait exprimer mon respect, mon amour pour les sacrifices que vous avez pour mes instructions.

À mes sœurs, pour leur dévouement, et leur grande tendresse, qui en plus de m'avoir encouragé dans ma vie..

À mes chers frères, Merci d'être à mes côtés quand j'en ai eu besoin.

*À mon amie **Fatima**.*

À tout mes amis.

*À toute la famille « **MAMAAR** ».*

OTMANE



I. Table des matières

Liste des Abréviations

Liste des figures

Liste des Tableaux

Introduction : 1

Chapitre I :Synthèse bibliographique

I. L'hydrologie : 4

I.1 Cycle hydrologique : 4

I.1.1 Processus de cycle hydrologique :8

I.2 Modélisation hydrologie 9

I.2.1 Modèle hydrologique :9

I.2.2 Objectif de la modélisation10

I.2.3 L'élaboration d'un modèle hydrologique :11

I.2.4 modélisation des processus hydrologique :11

I.2.5 Classification hydrologiques :12

I.3 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 19

I.3.1 Le choix de modèle19

I.3.2 Présentation de modèle SWAT :19

I.3.3 Organisation de modèle SWAT :20

I.3.4 Equation hydrologique de SWAT :21

I.3.5 Données d'entrés pour modèle SWAT :22

I.3.6 Données de sorties :22

I.3.7 Utilisation de SWAT en Afrique23

Chapitre II : Matériels et méthodes

I. Présentation de bassin versant d'oued Mouilah : 26

I.1 Hydrologie : 27

I.2 La Géologie : 27

I.3 La pédagogie : 28

I.4 Climatologie : 28

I.5 Relief et topographie : 29

II.	Données utilisées en entrée pour la modélisation	30
II.1	Les données topographiques	30
II.2	Type de sol :	31
II.3	Occupation de sol :	32
II.4	Les données climatiques	32
II.5	Mesure de débit :	32
II.6	Pentes.....	33
II.7	Les sous bassin d'oued mouilah :	34

Résultats et interprétations

I.	Calibration de l'hydrologie :	38
II.	Le bilan hydrologique :	39
III.	Le débit :	40
IV.	Spatialisation des précipitations	41
V.	quantité d'eau dans le sol.....	42
VI.	Evapotranspiration	43
VII.	L'évapotranspiration potentielle :	44
VIII.	Ruissellement de surface :	45
	Discussion	47
	Conclusion générale	50
	Référence	52
	Abstract	56
	Résumé	56

Liste des Abréviations

ANRH : Agence nationale des ressources hydrauliques-Algérie.

FAO : Food and agriculture organization.

MNT : Modèle numérique terrain.

SWAT : soil and water assessment tool.

Liste des figures

Figures	Titre	Page
Figure 1	Les différents étapes d'eau	2
Figure 2	Processus du cycle hydrologique	5
Figure 3	Cycle de l'eau	7
Figure 4	Schéma d'un modèle hydrologique .	9
Figure 5	Schématisation des principaux flux verticaux et latéraux pris en compte dans les modèles hydrologiques de bassin versant (Chaponnière, 2005)	10
Figure 6	Figure représente La structure de modèle SWAT et la définition des HRUs (Unité de réponse Hydrologique)	13
Figure 7	Schéma représente le cycle hydrologique modélisé par SWAT	19
Figure 8	La figure les données d'entres et de sortie de modèle SWAT	24
Figure 9	Carte de localisation de bassin versant d'oued Mouilah	31
Figure 10	La carte de modèle numérique de terrain (30×30m)(http://earthexplorer.usgs.gov/)	33
Figure 11	Carte d'occupation des sols de bassin versant de Chouly http://ionial.esrin.esa.int	35
Figure 12	Carte d'occupation des sols de bassin versant de Chouly http://ionial.esrin.esa.int	38
Figure 13	Carte des différentes Classes de pente du bassin versant de mouilah (FAO, 2011)	39
Figure 14	Carte des différentes Carte de réseau hydrographique et des sous bassin d'oued mouilah (FAO, 2011)	41
Figure 15	Démarche de modélisation utilisée dans cette étude par le modèle SWAT	
Figure 16	Calibration annuelle des débits observés et simulés dans le bassin versant Oued mouilah (2003-2011)	

Figure17	Bilan hydrologique modélisé par SWAT model	
Figure 18	Carte de débit d'Oued mouilah pour la période(2003-2011).(FAO, 2011)	
Figure 19	Carte des précipitations moyennes annuelles d'oued mouilah entre (2003 - 2011) (FAO, 2011)	
Figure 20	Carte quantité d'eau dans le sol a oued mouillah(2003-2011).(FAO, 2011)	
Figure 21	Carte d'évapotranspiration d'oued mouilah pour la période (2003- 2011).(FAO, 2011)	
Figure 22	Carte d'évapotranspiration potentielle d'oued mouilah (2003 -2011).(FAO, 2011)	
Figure 23	Carte ruissellement de surface de oued mouilah (2003,2011)(FAO, 2011)	

Liste des Tableaux

Tableaux	Titre	Page
Tableau 1	Différents types de modèles	4
Tableau 2	Modèles de bassins versants - Principales caractéristiques	8
Tableau 3	Les paramètres calibrés	47



Introduction

Introduction :

L'eau est indispensable à la vie. C'est une denrée indispensable pour tout organisme vivant. La préservation de la ressource en eau est un des enjeux fondamentaux de notre époque. L'augmentation des prélèvements et des rejets due à la croissance démographique et au développement économique menace de plus en plus la quantité et la qualité de cette ressource vitale (Ait Mbarek et al, 2021).

La modélisation est un outil essentiel dans la gestion de la ressource en eau. Elle permet de comprendre le système hydrique dans son ensemble et d'analyser les interactions entre les différentes composantes. Grâce à la modélisation, il est possible de prévoir les ressources en eau, d'anticiper les variations saisonnières et d'évaluer les impacts des changements climatiques. Cela permet une prise de décision éclairée dans la gestion de cette ressource précieuse, en mettant en place des stratégies de gestion optimales, en optimisant l'utilisation des ressources disponibles et en assurant une répartition équitable de l'eau entre les différents usages. La modélisation contribue ainsi à une gestion durable et efficace de la ressource en eau. (Laurent, F. 1996).

La modélisation pose le problème de la représentation de l'information nécessaire à la décision. L'information liée à une ressource naturelle comme l'eau est caractérisée tant par une variabilité spatiale des données, que par une connaissance le plus souvent qualitative des phénomènes et par des interactions fortes entre les éléments de l'hydrosystème. (Andro, 2019).

Dans ce travail, la modélisation hydrologique est l'outil important pour comprendre le cycle de hydraulique et ces processus, et aussi de construire une représentation simplifiée de la réalité. Dans notre étude le choix du modèle utilisé s'est porté sur SWAT (Soil & Water Assessment Tool) (Arnold et al., 1998), le modèle est basé sur une conception physique au lieu d'une conception basée sur la statistique (Arnold et al., 2012). SWAT est plus adapté au contexte d'agriculture et à la simulation sur de longue période de temps à l'échelle de bassin versant, le modèle SWAT a été largement utilisé dans les régions nord africaines (Zettam et al, 2017 ; Briak et al, 2019 ; Mami et al, 2021).

Dans le cadre de ce travail, on s'est intéressé à la modélisation hydrologique du bassin versant transfrontalier de oued Mouilah situé en Afrique du Nord entre l'Algérie et le Maroc, sous un climat semi-aride (Hamedd et al, 2016), en utilisant un ensemble de données open source. Notre travail s'appuie sur une présentation détaillée de la pédologie et de l'occupation du sol du bassin. Des étapes de para-métrisation et de calibration du modèle permettent ensuite de tester la capacité du modèle SWAT à reproduire le fonctionnement hydrologique du bassin versant à travers l'évaluation de la performance de reproduction du bilan hydrique.

L'objectif de ce travail est de modéliser avec SWAT les différentes composantes du bilan hydrique du bassin versant d'oued Mouilah .

Le présent mémoire s'articule autour de trois chapitres :

- **Chapitre I** : Synthèse bibliographique

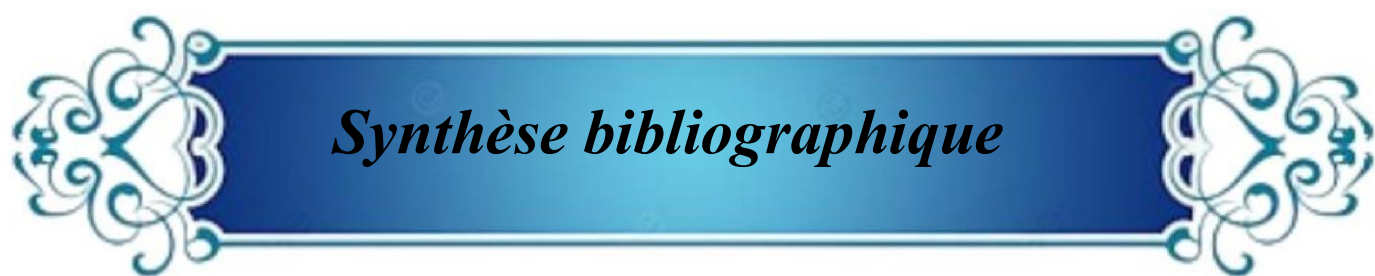
Ce chapitre présente une revue bibliographique sur l'hydrologie ,la modélisation hydrologique le modèle SWAT avec la méthodologie de Fonctionnement.

- **Chapitre II**: Matériel et méthode

fait une présentation de la zone d'étude d'oued Mouilah la localisation, le contexte physique et le matériel utilisé ainsi que la méthodologie adoptée pour atteindre les objectifs fixés.

- **Chapitre III** : Résultats et interprétations

Le troisième chapitre est consacré à l'analyse des résultats obtenus qui sera effectuée Suivi d'une discussion des principaux résultats et une conclusion générale qui présente une synthèse des résultats obtenus dans cette étude.



Synthèse bibliographique

I. L'hydrologie :

L'hydrologie est la science qui s'intéresse à tous les aspects du cycle de l'eau, et en particulier aux échanges entre la mer, l'atmosphère (océanographie, climatologie...), la surface terrestre (limnologie) et le sous-sol (hydrogéologie), sur terre (ou potentiellement sur d'autres planètes) (Dingman,2002) , aussi elle étudie les caractéristiques des eaux et leur propriétés (chimiques, physiques, géologique ou météorologique...) (Hingray ,2009)

L'hydrologie se subdivise classiquement en plusieurs branches en distingue :

- L'hydrologie de surface ou des eaux superficielles porte sur les ressources du sous-sol, leur captage, leur protection et leur renouvellement.
- L'hydrogéologie qui dit : hydrologie des eaux souterraines », constitue un « sous-cycle » de l'eau lié à l'activité humaine : production et distribution de l'eau potable, collecte et épuration des eaux usées et pluviales.(Pines,1970)

L'hydrologie est naturellement liée à plusieurs domaines : « l'hydrométéorologie, l'hydrologie de surface, l'hydrogéologie, l'hydraulique urbaine, climatologie, géologie, géographie et pédologie», ses domaines d'applications de l'hydrologie de surface sont également très variés. Parmi les plus importants et les plus classiques : (Laborde, 2009).

- l'agriculture : irrigation, drainage.
- L'énergie hydraulique : La navigation.
- Le transport solide (dépôt ou érosion) .
- Aménagement des cours d'eau et des bassins versants l'environnement fluviale et aquatique.
- l'étude des ressources en eaux : eau potable, eau pour l'industrie .
- la lutte contre la pollution.
- la sécurité des biens et des personnes : protection contre les crues...

I.1 Cycle hydrologique :

L'eau est la source de toute vie, se présente dans la nature sous trois états :

- solide : neige et glace,
- liquide : eau chimiquement pure ou chargée en solutés,
- gazeux : à différents degrés de pression et de saturation (Anctil et Al, 2004).

Les changements de phase de l'eau dépendent essentiellement de la température et de la pression, L'eau passe de l'état liquide à l'état solide, de l'état solide à l'état liquide, de l'état liquide

à l'état vapeur, de la vapeur à l'état liquide et de la vapeur à l'état solide, (Balasubramanian, 2017), tel qu'il est illustré dans la figure suivante :

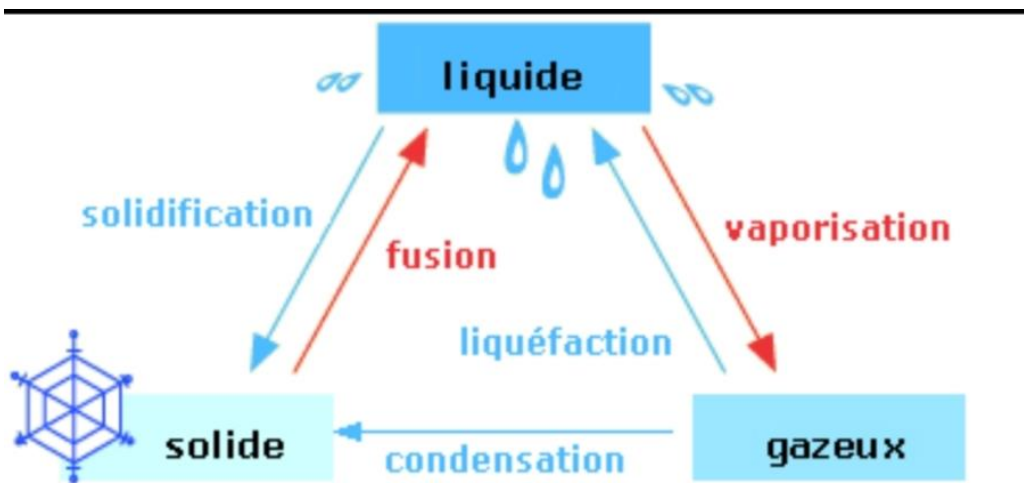


Figure 01 : les différents étapes d'eau (<https://www.maxicours.com/se/cours/etats-de-l-eau-dans-la-biosphere/>)

Dans l'atmosphère terrestre, l'eau se retrouve sous ses trois formes, Les eaux circulent en permanence sur la terre et subissent des changements d'état. L'importance de ces modifications fait de l'eau le principal agent de transport d'éléments physiques, chimiques et biologiques.

L'ensemble des processus de transformation et de transfert de l'eau forme le cycle hydrologique. (Gray, 1972).

Le cycle de l'eau : également connu sous le nom de cycle hydrologique, décrit le mouvement de l'eau entre les différentes sources telles que l'atmosphère, la terre et les océans. Le cycle (figure 02) comprend l'évaporation (de la terre vers le ciel), la condensation (dans le ciel) et la précipitation (du ciel vers la terre). Le cycle hydrologique est un processus naturel qui permet à l'eau de circuler entre les différents écosystèmes et d'être prélevée pour l'utilisation humaine. Ce cycle est avec des durées très variables : une goutte de pluie peut retourner à l'océan en quelques jours, alors que sous forme de neige, en montagne, elle pourra mettre des dizaines d'années (Laborde, 2009).

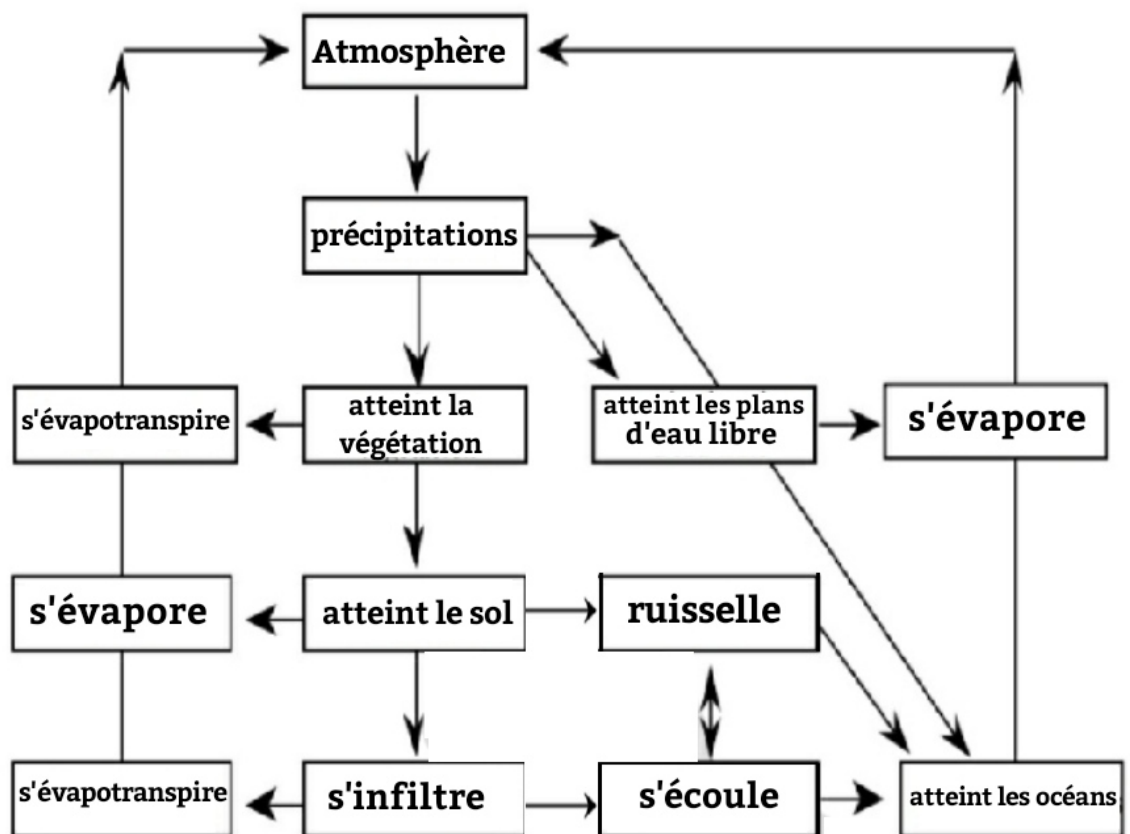


Figure 02 : Processus de cycle hydrologique (Laborde, 2009)

Sous l'effet de rayonnement solaire (figure 03), une partie de l'eau présente sur les surfaces continentales (dans les sols sous forme d'eau libre) et dans les océans s'évapore des nuages prennent forme suite à la condensation de la vapeur d'eau sous forme de gouttelettes, par la suite, cette eau sera restituée aux continents et aux océans par le biais de précipitations. Elles peuvent être liquides (pluie) ou solides (neige ou grêle) suivant les conditions de température, de pression et d'humidité de l'air.

Une partie de la pluie qui tombe peut-être interceptée par les végétaux puis être partiellement restituée sous forme de vapeur à l'atmosphère (Musy, 2005). Les précipitations liquides non interceptées atteignent le sol. Une partie est évaporée à partir des zones de sol nu ou absorbée par les racines des plantes puis évaporée par transpiration foliaire. Une autre partie ruisselle en surface par gravitation ou peut être acheminé par percolation (aussi appelée drainage) vers les zones plus profondes (Szczypt, 2012).

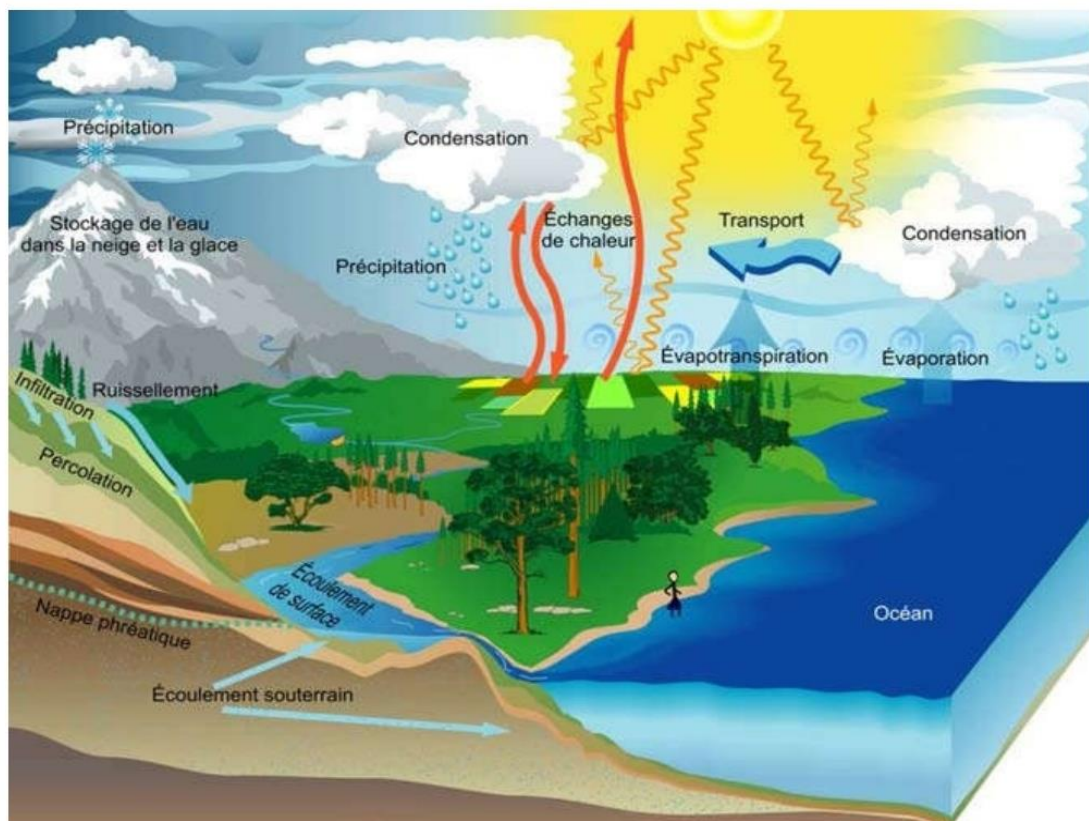


Figure 03 : cycle de l'eau (Source : NASA, 2007) <https://code.nasa.gov/>

I.1.1 Processus de cycle hydrologique :

Le cycle hydrologique représente l'ensemble de tous les processus de transformation de l'eau sur la terre (Bennis, 2009)

Les phases de cycle hydrologique sont :

- **L'évaporation** : passage de la phase liquide à la phase vapeur, il s'agit de l'évaporation, le cycle commence dans les océans et les eaux continentales, qui sont les masses d'eau d'où provient 80 % de l'évaporation. A ces endroits, la température est élevée par le biais du rayonnement solaire et l'évaporation de l'eau se produit. Elle se produit également par le biais de la transpiration des plantes et des animaux.

- **L'évapotranspiration** : englobe les processus d'évaporation et de transpiration de la végétation, la terre subit simultanément un processus d'évaporation, car elle est aussi baignée dans les rayons solaires, ce qui augmente la température et change l'état de l'eau en gaz. La végétation y transpire l'eau qu'elle contient, comme un processus d'élimination et de refroidissement des plantes, le sol libère également l'eau retenue dans l'atmosphère avec la sublimation et le givrage, qui se produisent sur les surfaces grêlées.

- **Transport par les vents et les courants** :

C'est l'étape de condensation est celle durant lequel la formation de les nuages. Les mouvements d'air sont générés par le gradient de pression qui existe entre les centres de haute et basse pressions. L'existence de ces centres reliée au gradient de température entre des endroits exposés différemment au soleil.

- **Précipitations** : L'eau tombe sous forme de gouttelettes liquides provenant des nuages, et dans certaines régions où les températures sont nettement plus basses, elle peut tomber sous des formes plus ou moins solides comme la grêle, le givre ou la neige.

- **Infiltration** : c'est une partie où l'eau atteint la surface de la terre. Une partie de l'eau est utilisée pour alimenter les océans et d'autres masses d'eau, tandis que l'autre partie est utilisée directement par les organismes vivants. Une troisième fraction de l'eau des précipitations s'infiltré dans le sol et s'accumule, formant des couches d'eau souterraine, ou également appelés aquifères.

- **Le ruissellement** ou écoulement de surface : mouvement de l'eau sur ou dans les premiers horizons du sol (écoulement de subsurface), consécutif à une précipitation.

I.2 Modélisation hydrologie

La modélisation hydrologique est une représentation, partielle ou cycle hydrologique total (Marchandise, 2007), c'est une élaboration par des méthodes physiques ou mathématiques de modèles de simulation du cycle de l'eau et de son incidence sur un bassin hydrologique. (Chaponnière, 2005).

I.2.1 Modèle hydrologique :

Le modèle est "une représentation simplifiée, relativement abstraite, d'un processus, d'un système, en vue de le décrire, de l'expliquer ou de le prévoir".

Un modèle hydrologique, ou modèle pluie-débit, est un outil numérique de représentation de la relation pluie-débit à l'échelle d'un bassin versant. Il permet de transformer des séries temporelles dérivante climat d'un bassin versant donné (séries de précipitations et de températures par exemple, séries qui sont les entrées du modèle hydrologique) en une série de débits (sortie du modèle hydrologique) (Roche, 1988).

Le développement d'un modèle repose généralement sur les éléments suivants :

- L'approche adoptée est empirique (pas d'usage a priori d'équations physiques).
- Les structures des modèles doivent être les plus générales possible (applicables à une large gamme de bassins versants et conditions).
- Le test en calage-contrôle, sur de grands échantillons de bassins, est le mode d'évaluation standard des modèles (Oudin et all, 2006).

On distingue quatre types de variables (figure 04) qui peuvent exister en totalité ou en partie dans chaque modèle (Boudhraa, 2007) :

- Variables d'entrée.
- Variables de sortie.
- Variables d'état.
- Paramètres de calage.

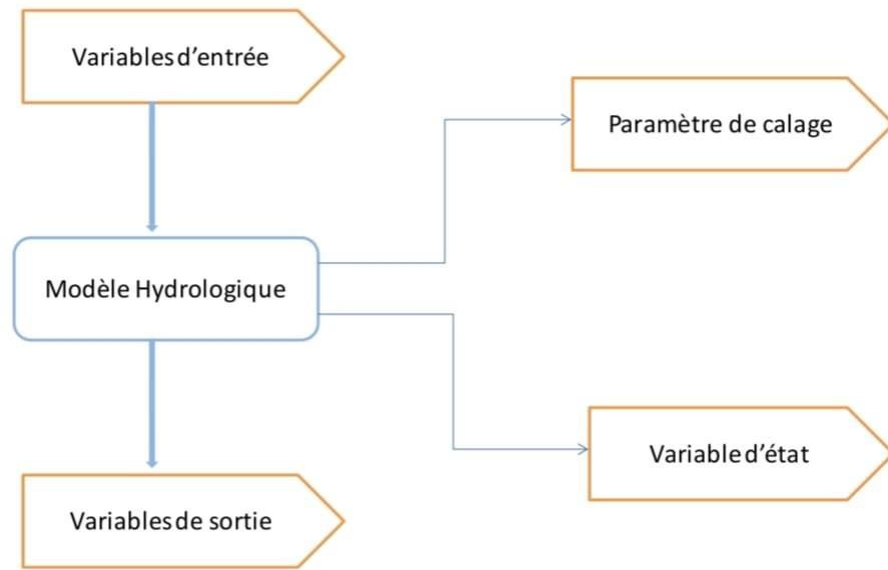


Figure4 : Variables d'un modèle hydrologique (Gaume, 2002).

I.2.2 Objectif de la modélisation

La modélisation hydrologique est une méthode d'analyse des comportements hydrologiques dans les milieux naturels tels que les bassins versants, les rivières et les nappes. Elle permet de comprendre et de prédire les interactions entre les différentes composantes du cycle de l'eau, telles que les précipitations, l'évaporation, l'infiltration et le ruissellement. Grâce à cette modélisation, il est possible d'obtenir des informations précieuses sur les systèmes aquatiques et d'aider à la gestion de l'eau. , (Perrin, 2000). On distingue trois objectifs essentiels d'utilisation des Modèles en hydrologie (Gaume, 2002) :

La simulation de débit : Les modèles hydrologiques sont également utilisés pour combler les lacunes dans les séries de données hydrologiques. Ils peuvent être utilisés pour reconstituer les débits historiques en utilisant des données de précipitations disponibles sur des périodes plus longues. Ces modèles permettent également de réaliser des traitements statistiques sur les données hydrologiques, ce qui facilite l'analyse et l'interprétation des tendances, des variations saisonnières et des extrêmes hydrologiques. (Perrin, 2000)

La prévision de l'écoulement : pour la connaissance d'état de bassin et nous donne une anticipation des évolutions futures du débit d'un cours d'eau. (Ferrah,2017)

L'extrapolation : Il est crucial de prendre en compte les scénarios de crues, ainsi que les périodes d'étiage, dans le cadre d'une planification précise des risques, notamment pour la délimitation des zones inondables. En effet, ces scénarios permettent d'évaluer les fluctuations potentielles des débits d'eau. Cette approche est essentielle lors de l'élaboration de plans de gestion des risques d'inondation, car elle permet d'identifier les zones à risque et de mettre en place des mesures préventives appropriées. En considérant également les périodes d'étiage, où les débits d'eau peuvent être extrêmement bas, cette modélisation permet d'anticiper les impacts sur l'environnement, l'approvisionnement en eau et d'autres activités humaines.. (Ferrah,2017)

I.2.3 L'élaboration d'un modèle hydrologique :

Les différentes étapes de modélisation hydrologique sont :

- Définir** : donne une définition d'un modèle avec ses objectifs.
- Identifier** : le modèle pour préciser tous les processus de base (système et ses frontières et sa structure ...)
- **Elaborer** l'algorithme pour la vérification (De Marsilyet et Ambroise, 1998).
- **Caler** le modèle, par estimation des paramètres du modèle (Boudhraa, 2007).
- **Définir** le domaine de validité du modèle élaboré (Ambroise, 1998). La formulation mathématique du modèle est basée sur des équations simplifiées, selon les conditions initiales et aux limites.

I.2.4 Modélisation des processus hydrologique :

La figure 05 présente une diversité de fonctions dans les modèles hydrologiques pour les bassins versants, on peut les regrouper en deux catégories : les fonctions de production, liées aux transferts verticaux, et les fonctions de transfert, associées aux redistributions latérales, les fonctions de production se concentrent sur les processus de transfert vertical de l'eau, tels que les précipitations, l'évapotranspiration, l'infiltration et le ruissellement, elles permettent de quantifier et de simuler les entrées et les sorties d'eau à l'intérieur du bassin versant, quant aux fonctions de transfert, elles sont responsables des redistributions latérales de l'eau, notamment à travers les écoulements de surface et souterrains, elles représentent les interactions entre différentes parties du bassin versant, la connectivité des cours d'eau, la répartition spatiale des débits et les échanges d'eau avec les zones avoisinantes.. (Chaponnière, 2005) . Et aussi existe des modèles plus complets prennent en compte les substances verticaux et latéraux (Chaponnière, 2005).

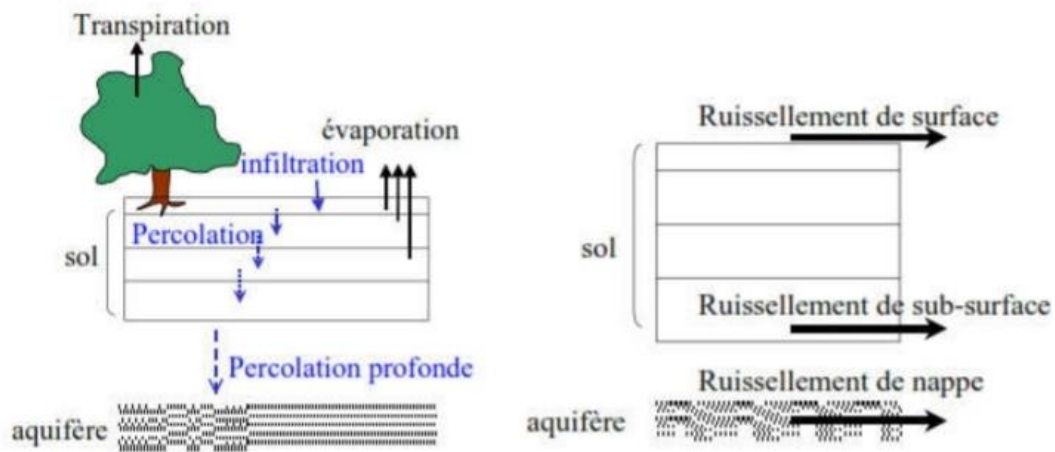


Figure 5. Schématisation des principaux flux verticaux et latéraux pris en compte dans Les modèles hydrologiques de bassin versant (Chaponnière, 2005)

I.2.5 Classification hydrologiques :

Il existe, dans la littérature de nombreux modèles hydrologiques de bassins versant ayant, chacun leur spécificités et leur domaines d'application et peuvent être fonction de plusieurs caractéristiques (Borah, 2011). Une fois le modèle choisit, il faut évaluer sa capacité à représenter la réalité, ceci se fait le plus souvent en comparant les résultats du modèles avec les observations, c'est une étape très délicate, le tableau suivant propose de classer les différents types des modèles selon leur caractéristiques (Chaponnière, 2005).

Tableau 1 : différents types de modèles

Caractéristique	Type de modèle
Selon la nature de la variable	Modèle déterministe (variable non aléatoire) Modèle stochastique (variable aléatoire)
Traitement de l'espace (homogénéité de bassin)	Modèle globale Modèle semi distribué (ou semi globale) Modèle spécialisé
Fondement théoriques et approche de développement	Modèle empirique Modèle conceptuel Modèle à base physique
L'évolution temporelle.	Modèle cinématiques (descriptif) Modèle dynamique (explicatif)
Fonction objectif.	Modèle de simulation Modèle de gestion

I.2.5.1 Classification selon la représentation spatiale :

a. Le modèle global : Dans un modèle hydrologique global, le bassin versant est considéré comme une seule entité spatiale homogène décrite par un nombre restreint de paramètres (Furusho, 2011).

Le modèle distribuée : Ce modèle dispense une discrétisation en sous-bassins , il est le plus performants et dans lequel on subdivise le bassin versant à étudier en plusieurs unités spatiales de taille suffisamment petite pour pouvoir être considérées comme homogènes.(Furusho, 2011).

b. Le modèle semi-distribué :

Se situent entre ces deux représentations , quand on peut estimer que les variations spatiales des paramètres et des variables d'entrées peuvent être prises en compte d'une façon globale et qu'il n'y a pas lieu d'effectuer un découpage dans l'espace, on dit que le modèle est global , au contraire, quand l'étendue ou l'hétérogénéité du cadre physique, comme la concentration et la diversité spatiale des interventions anthropiques sur le

système, peuvent conduire à préférer a priori une discrétisation de l'espace des entrées et des paramètres, on construit alors un modèle distribué (Grusson, 2016).

I.2.5.2 Classification selon la discrétisation temporelle :

- a. **Le modèle événementiel :** Ce genre de modèle permet de reproduire la réponse du bassin en termes de débit lors des épisodes pluvieux. Il n'est activé qu'au moment des pluies, et se représente l'état initial du bassin en fonction des conditions climatiques antérieures (Gnouma, 2006).
- b. **Le modèle continu :** Il calcule les sorties par exemple : (débit, teneur en eau...) tant qu'ils sont alimentés par des données (précipitation, températures...). A cette échelle temporelle, les écoulements lents et l'évapotranspiration jouent un rôle important donc il est capable d'afficher des longues périodes de débits et il peut révéler une variété d'effets des changements environnementaux (climat, occupation du sol, etc) (Furusho, 2011).

I 3.5.3-Classification selon la description du processus :

- a. **Le modèle empirique :** Ce modèle est généralement du type « boîte noire ». basé sur une relation entrées et sorties mathématiques directes du système hydrologique se prend en compte les processus internes de l'hydrosphère. Si la représentation peut considérer les composantes du cycle hydrologique agir en général est très loin d'être une fonction d'eau efficace (Grusson, 2016).
- b. **Le modèle conceptuel :** Ce modèle est adapté à la simulation sur de grandes échelles telle que : (spatiales et/ou temporelles), avec une demande de puissance de calcul qui reste limitée. Ce modèle hydrologique est en général constitué de réservoirs connectés entre eux par des flux et qui représente les différentes composantes de l'hydro système (réseau hydrographiques, des surfaces, eau souterraine, ...). Cette représentation peut être très simple avec un nombre réduit de composantes et ne dépendre que de paramètres nécessaires aux relations, le modèle se rapprochant alors d'un modèle empirique. Mais elle peut aussi devenir beaucoup plus complexe, avec des relations basées sur des lois physiques, nécessitant un nombre relativement important de paramètres, se rapprochant alors d'un modèle physique (Grusson, 2016).
- c. **Modèle de base physique :** Le modèle à base physique remet sur la résolution d'un grand nombre d'équation de continuité et de quantité de mouvement liée soit aux substances de transport d'eau ou des processus soit d'énergie. Ces équations doivent analyser les différents phénomènes dans d'un bassin versant (Grusson, 2016)

Nombreux modèles ont été utilisés par les chercheurs pour comprendre la dynamique des substances dans les hydro-systèmes. Le tableau suivant présente des modèles hydrauliques utilisés et leurs différentes caractéristiques et les applications dans les bassins versant (Daniel et al. 2011) :

Tableau 2. Modèles de bassins versants - Principales caractéristiques (Daniel et al., 2011).

Modèle	Applicati on	Composantes principale	Flux latérale	Simulatio ns chimique	Echelle temporel	Echelle spatial
ANSWER S	bassins versants agricoles; conçu pour les bassins versants sans station de mesure	Ruissellement, infiltration, drainage souterrain, érosion du sol,	Aucun	Aucun	évènementiel	distribué
ANSWER S- 2000	Bassins agricoles de taille moyenne ; bassins sans stations de mesures ; évaluation des bonnes pratiques culturales ; simulation des interactions entre quatre	Ruissellement; infiltration, transport de nutriments	Equation de Darcy	Transport de N,P, sédiments	continu	distribué

	groupes d'azote					
AGNPS	bassins agricoles	Ruissellement; infiltration, transport de Sédiments, et l'érosion	Aucun	Aucun	évènementiel	distribué
Ann AGNPS	bassins agricoles ; pratiques culturales	hydrologie, Transport de sédiments, de nutriments et de pesticides, MNT utilisé pour générer un réseau de réseau hydrographique	Equation de Darcy	N,P, pesticides, carbone et nutriments	continu	distribué
GSSHA/C AS C2D	bassins versants agricoles urbains; capacités de modélisation dans une variété de climats avec des ensembles de données spatiales complexes	Ruissellement; l'humidité du sol, transport de Sédiments, et l'érosion	Aucun	Aucun	continu	distribué

HEC-1/HECHMS	Bassins urbanisés, modélisation de crues	Précipitation, pertes, flux de base, transformation et écoulement	Aucun	Aucun	événementiel	Semi distribué
HSPF	Bassins agricoles et urbanisés ; qualité d'eau et sédiments	qualité des eaux de ruissellement /, simulation des zones perméables / imperméables	percolation, écoulements latéraux ou de nappe	température, DO, CO ₂ , N, NH ₃ , orgN/P, pesticides	continu	Semi distribué
KINEROS 2	Bassins agricoles et urbanisés	Les apports pluviométriques distribués, le transport des sédiments, l'infiltration, le ruissellement de surface et l'érosion	Aucun	Aucun	continu	Semi distribué
MIKE SHE	Large gamme d'échelles spatiales et temporelles; la conception modulaire facilite l'intégration d'autres modèles; capacités avancées	écoulement superficiel, fonte des neiges; échange aquifère / rivières, processus géochimiques, croissance végétale, érosion des sols et irrigation	écoulement des eaux souterraines	éléments dissous dans la surface, le sol et les eaux souterraines	événementiel, continu	distribué

	pour la qualité de l'eau, l'estimation des paramètres et l'analyse du bilan hydrique					
SWAT	Bassins agricoles ; pratiques culturales	Hydrologie, conditions météorologiques, sédimentation, température et propriétés du sol, croissance des cultures, nutriments, pesticides, gestion agricole et flux des réservoirs	percolation, écoulements latéraux ou de nappe	N,P, pesticides, carbone	continu	Semi distribué
PRMS/MS	petits bassins agricoles; érosion des sols	Hydrologie et ruissellement de surface, érosion des sols, transport des sédiments	aucun	aucun	évènementiel	distribué

I.3 SWAT (Soil and Water Assessment Tool)

I.3.1 Le choix de modèle

Le choix d'un modèle dépend des objectifs de l'étude et aussi en se basant sur le type de résultats recherchés, pour atteindre l'objectif de l'étude le modèle SWAT (Soil and Water Assessment Tool) a été choisi pour plusieurs raisons.

La modélisation du fonctionnement hydrologique sous SWAT répond aux exigences :

1. En effet, il assure une simulation continue, à long terme des processus terrestres et fluviaux.
2. Il garantit la modélisation des grands bassins versants dépassant une superficie de plusieurs milliers de Km², comme on peut l'appliquer sur des petits bassins.
3. La capacité du modèle à décrire l'impact conjugué du climat et des activités anthropiques sur la réponse hydrologique globale des bassins versants.

I.3.2 Présentation de modèle SWAT :

SWAT est un modèle agro-hydrologique à base physique, semi distribué. Ce modèle a été développé par le département de l'agriculture et les laboratoires de l'université de Texas A & M aux États-Unis. C'est un modèle « Open source » qui ouvre des horizons d'adaptation à d'éventuelles spécificités des milieux étudiés. SWAT a joué un rôle spécifique pour la simulation des principaux mécanismes des bassins versants tel que l'hydrologie, la sédimentation, le transfert d'éléments nutritifs, la croissance des cultures et le changement climatique à l'échelle des bassins versants (Arnold et al, 1998).

En effet le modèle SWAT peut analyser le bassin versant dans sa globalité ou par d'autres méthodes : (en le subdivisant en sous-bassins versants contenant des portions Homogènes appelées Unités de Réponse Hydrologiques (HRU) (figure 06). La phase d'intégration de manipulation et le paramétrage des données liées à la simulation le modèle SWAT a été couplé avec le logiciel SIG (Arcgis) cycle (est une suite de logiciels d'information géographique développés par la société américaine Esri) (Kouane,2019).

- ArcGIS permet d'analyser une gestion spatialisée des informations en sortie de modèle, il facilite la gestion des bassins versants, la récolte et la manipulation des phases d'incorporation et de calibrage (Neitsch et al, 2005).

I.3.3 Organisation de modèle SWAT :

Le bassin étudié par le modèle SWAT est subdivisé en sous-bassins versants qui eux même séparé en unités de réponse hydrologique (HRU : Hydrological Response Units) (figure 06).

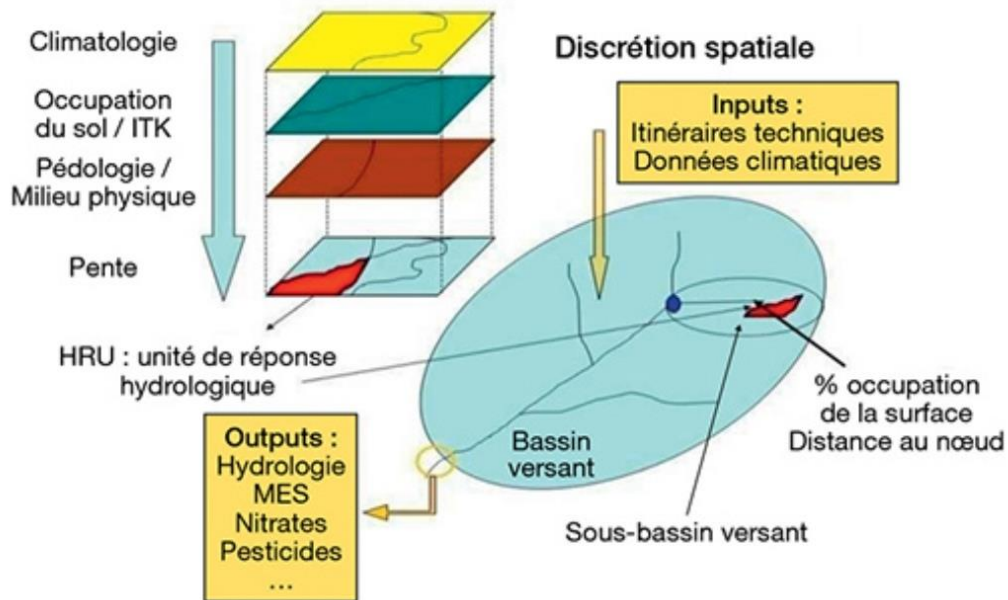


Figure 6 : Figure représente La structure de modèle SWAT et la définition des HRUs (Unité de réponse Hydrologique) (Boithias, 2011)

I.4.4 Fonctionnement de modèle :

La modalisation subdivisée en deux phases :

- La première représente la phase terrestre : qui analyse le bilan hydrique sur chaque sous-bassin (figure 07) (Neitsch et al, 2005).
- La deuxième est la phase aquatique : qui réalise le transfert de l'eau dans les réseaux jusqu'à l'exutoire (Neitsch et al, 2005).

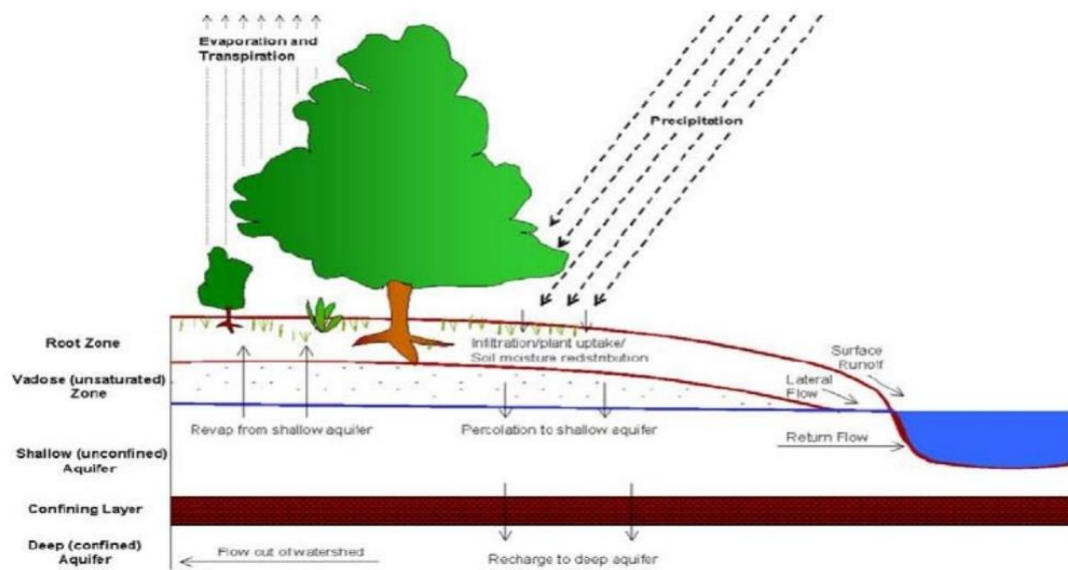


Figure 7 : Schéma représente le cycle hydrologique modélisé par SWAT (Neitsch et al., 2005)

I.3.4 Equation hydrologique de SWAT :

Ce modèle simule le cycle de l'eau à travers l'équation hydrologique suivante (Neitsch et al. 2005)

$$SW_t = SW_0 + \sum (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw})$$

Avec :

- SW_t = teneur en eau du sol (mm)
- SW_0 = quantité initiale d'eau disponible (mm)
- t = temps (jour)
- R_{day} = quantité de précipitation (mm)
- Q_{surf} = ruissellement de surface (mm)
- E_a = évapotranspiration (mm)
- w_{seep} = percolation (mm)
- Q_{gw} = débit de base (mm).

I.3.5 Données d'entrées pour modèle SWAT :

Ce modèle permet d'analyser les mouvements d'eau, et aussi de sédiments et d'éléments nutritifs dans un bassin versant, SWAT nécessite des données d'entrées (figure 08) spécifiques qui incluent la superposition spatiale de nombreuses couches d'information incluant les propriétés des sols, l'occupation du sol et le model numérique du terrain (MNT).

I.3.6 Données de sorties :

Les données de sorties du modèle SWAT sont représenté par différentes échelles : journalière-mensuelle-ou annuelle. Qui sont :

- ✓ Transfert de l'eau dans le bief principal
- ✓ Sédimentation
- ✓ Nutriments
- ✓ Climat (température du sol, neige, générateur climatique),
- ✓ Croissance des cultures
- ✓ Gestion agricole
- ✓ Hydrologie (ruissellement, interception par le couvert, évapotranspiration, drainage)

La figure suivant représente les divers données d'entrées et de sorties dans le modèle SWAT Pour plus d'information consulté (Neitsh al, 2005)

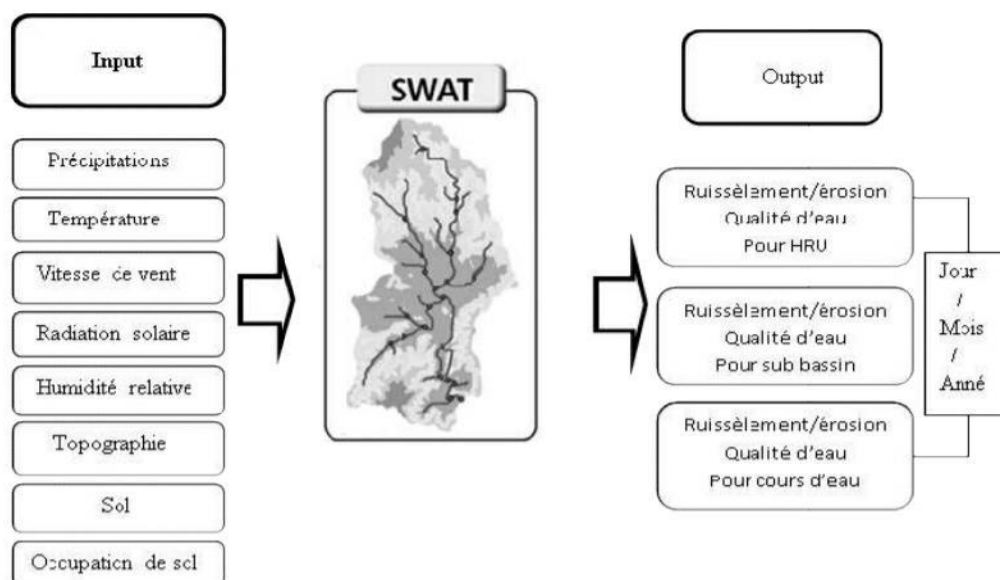


Figure 8: La figure les données d'entres et de sortie de modèle SWAT , 2021).

I.3.7 Utilisation de SWAT en Afrique

le modèle SWAT a été largement utilisé en Afrique où il a démontré son efficacité, comme au Nil (2,9 millions de km²) qui couvre 10 % du continent africain (A. van Griensven et al., 2012), au bassin du lac Tchad est le plus grand bassin endoréique du monde, avec une première superficie de 2 500 000 km² (Ali.B et al., 2022), le Medjerda, le principal fleuve tunisien, qui prend sa source dans les montagnes semi-arides de l'Atlas de l'Est de l'Algérie, avec une superficie de 24 000 km², dont 7700 km² situés en Algérie (Bouraoui, F et al., 2005). À l'ouest Algérien au niveau du Bassin versant de la Tafna (7200 km²) par Zettam et al, 2017 ; Zettam et al, 2020.



Chapitre II :

*Matériel et
Méthodes*

I. Présentation de bassin versant d'oued Mouilah :

Oued Mouilah est un oued qui prend sa source dans les montagnes de Tlemcen (à 1250m), dans le nord-ouest de l'Algérie. Il s'écoule vers le Maroc (figure 08). L'oued est long de 124 kilomètres avec un bassin versant de 2650 km²(Hamedd et al, 2016). Le débit de l'Oued Mouilah est variable et dépend des précipitations annuelles, qui peuvent varier de 300 à 1000 mm/s, pendant la saison sèche le débit peut être très faible. La zone de Mouilah caractérisée par un climat semi-aride avec une température moyenne de 16,7 °C, tandis qu'en période de crue, le débit peut augmenter considérablement, atteignant jusqu'à 30 mètres cubes par seconde.

Les inondations dues aux crues de l'Oued Mouilah ont souvent causé des dégâts dans les zones environnantes, en particulier dans les plaines et les villes situées le long de l'oued. L'oued Mouilah est un oued très important pour l'hydrologie et la biodiversité de la région de Tlemcen en Algérie. Son débit variable et ses crues occasionnelles peuvent causer des dégâts importants, mais son rôle est crucial dans la régulation des eaux de surface et souterraines en fait un élément important de l'écosystème local (Riad et Salih, 1999).



Figure 9 : Carte de localisation de bassin versant d'oued (FAO, 2011)

I.1 Hydrologie :

L'Oued Mouilah représente un élément important de l'hydrologie de la région. Il fournit environ 70 millions de mètres cubes d'eau chaque année, contribuant ainsi à la recharge des nappes phréatiques et à la régulation des eaux de surface et souterraines. Le débit annuel moyen d'oued Mouilah à son embouchure est d'environ $3,5 \text{ m}^3/\text{s}$ (Terfous et al, 2001). Les débits minimaux et maximaux annuels de l'oued sont respectivement de $0,26 \text{ m}^3/\text{s}$ et $13,1 \text{ m}^3/\text{s}$. Ces chiffres sont basés sur des études hydrologiques antérieures et peuvent ne pas refléter les conditions actuelles de l'oued, qui peuvent varier considérablement en fonction des précipitations saisonnières et des facteurs environnementaux (Terfous et al, 2001). Dans la partie du Maroc on trouve la station d'épuration des eaux de Oujda qui est une installation de traitement des eaux usées située dans la ville d'Oujda, dans la région orientale du Maroc (figure 09). La station utilise un processus de traitement biologique pour éliminer les contaminants présents dans les eaux usées, en particulier les matières organiques.

La station a une capacité de traitement de $65\,000 \text{ m}^3/\text{jour}$ et dessert une population d'environ 450 000 habitants. Le traitement des eaux usées se compose de plusieurs étapes, notamment le prétraitement, le traitement biologique et la désinfection. (El Houssain ,2022)



Figure 10 : La station d'épuration des eaux de Oujda

I.2 La Géologie :

Le bassin de l'oued Mouilah est occupé par une série géologique allant du primaire au quaternaire, il se creuse dans du matériel à résistance fort variable. Sur le substratum schisto-

quartzitique primaire et les formations carbonatées du secondaire, se sont déposés des sédiments du tertiaire principalement des argiles et grès du miocène et des alluvions quaternaires occupant les bas fond des vallées et des plaines (Benest et Elml, 1978).

I.3 La pédologie :

La pédologie de la région de l'Oued Mouilah est caractérisée par une grande diversité de sols en raison de la variété des formations géologiques sous-jacentes, du climat semi-aride de la région et des pratiques agricoles locales. On peut identifier plusieurs types de sols dans la région, tels que les sols brun rougeâtre, les sols bruns calciques, les sols bruns lessivés et les sols bruns podzoliques (Mendas et al, 2021). Les sols brun rougeâtre se trouvent principalement dans les zones rocheuses et ont une faible fertilité, tandis que les sols bruns calciques sont caractéristiques des régions où les formations géologiques sont riches en calcaire. Les sols bruns lessivés se trouvent dans les régions où il y a une forte érosion et un drainage élevé, tandis que les sols bruns podzoliques se trouvent dans les régions où il y a une forte acidité et une faible teneur en nutriments (Mendas et al, 2021).

I.4 Climatologie :

Le climat semi-aride de la région de l'oued Mouilah a également une influence importante sur les sols de la région. La faible pluviométrie entraîne une forte évapotranspiration et une accumulation de sels dans les sols, ce qui peut entraîner une dégradation de la fertilité des sols. En outre, les fortes pluies peuvent causer une érosion importante des sols, réduisant ainsi leur qualité. L'été sont chauds et secs, avec une température moyenne de 31 °C en juillet et août. Les hivers sont frais et humides, avec une température moyenne de 11 °C en janvier. La région reçoit une quantité modérée de précipitations annuelles, avec une moyenne de 288.5 mm par an. Le mois le plus humide est décembre, avec une moyenne de 102 mm de précipitations, tandis que les mois d'été sont généralement très secs, avec une moyenne de 15 mm de précipitations en juillet et août (Cunningham et al, 2020). La région est également sujette aux vents forts qui soufflent du sud. Il est important de noter que ces chiffres sont des moyennes générales et peuvent varier d'une année à l'autre. (Cunningham et al, 2020).

I.5 Relief et topographie :

Oued Mouilah se situe dans la région de Tlemcen, dans le nord-ouest de l'Algérie. Le relief de cette région est principalement constitué de montagnes, avec des altitudes allant de 500 à 2000 mètres. Oued Mouilah prend sa source dans les montagnes du Tlemcen, traverse la plaine côtière et se jette dans le barrage de Hammam Boughrara. Le bassin versant de l'oued est principalement constitué de collines et de plateaux avec des altitudes allant de 200 à 1000 mètres. La topographie de la zone est donc assez variée, avec des pentes plus ou moins prononcées. En général, l'oued suit un tracé sinueux à travers le paysage, avec des zones de plaines alluviales et des zones plus encaissées dans les montagnes. (Ketrouti et al, 2012).

-Occupation de Sol :

Activités agricoles :

Culture de céréales telles que le blé, l'orge et le maïs.

Culture de fruits tels que les amandes, les olives, les figes et les raisins.

Élevage de bétail et de volaille tels que les moutons, les vaches, les poulets et les dindes.

La région oued mouilah est également connue pour la production d'huile d'olive de qualité supérieure. En effet, la majorité des exploitations agricoles sont des oliveraies qui produisent une huile d'olive de qualité supérieure, très appréciée par les consommateurs. (Hattab et al, 2016).

-Activités industrielles :

Industries alimentaires, telles que le traitement des céréales et la production d'huile et de produits laitiers.

Industries artisanales, telles que la fabrication de tissus, d'artisanat et de céramique.

Industries du bois, telles que la fabrication de meubles et la menuiserie.

Industries chimiques, telles que la fabrication de pesticides et d'engrais.

Il convient de noter que la région de oued mouilah est également riche en ressources naturelles telles que l'eau et les minéraux, ce qui peut contribuer à soutenir davantage le développement de ces industries. (Harrar et al, 2016). Il y a aussi un barrage (Le barrage de Hammam Boughrara) Le bassin est délimité par un périmètre de 241 km et est principalement composé des plaines d'Angad (situées à Oujda, au Maroc) et de la plaine de Zrigua (située à Maghnia, en Algérie). Le talweg principal du bassin mesure 104,4 km de long. (bouzid-lagha, s et al 2012)

II. Données utilisées en entrée pour la modélisation

Nous avons à notre disposition des données qui décrivent physiquement le bassin versant, ainsi que des données climatiques, qui constituent la base des processus hydrologiques. Dans notre projet nous avons utilisé les données suivantes :

II.1 Les données topographiques

Le modèle numérique de terrain (MNT) utilisé est un MNT de type Nord Sahara 1959 UTM zone 30, avec une résolution de 30 m × 30 m (figure 10) Nous avons obtenu ce MNT sur le site de l'US Geological Survey.

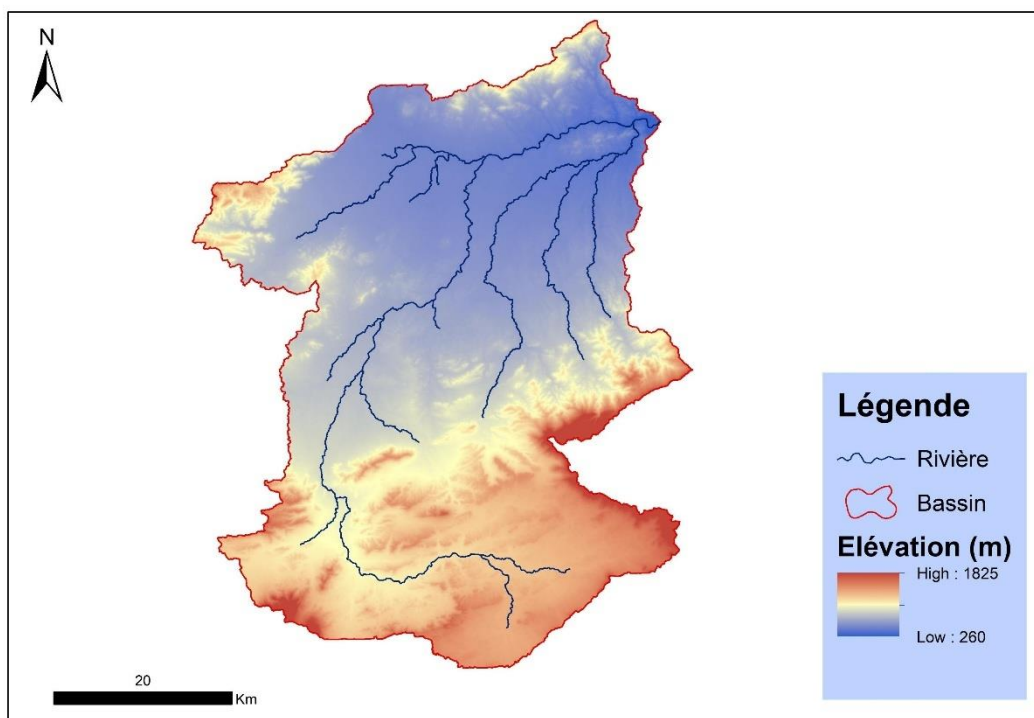


Figure 11: La Carte de modèle numérique de terrain (30×30m)(<http://earthexplorer.usgs.gov/>)

La zone d'étude présente principalement un plateau avec des altitudes qui varient entre 260 mètres et 1825 mètres au-dessus du niveau de la mer.

II.2 Type de sol :

Les informations sur le type de sol (figure 11) dans la zone d'étude proviennent de la base de données des sols de la FAO (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture).

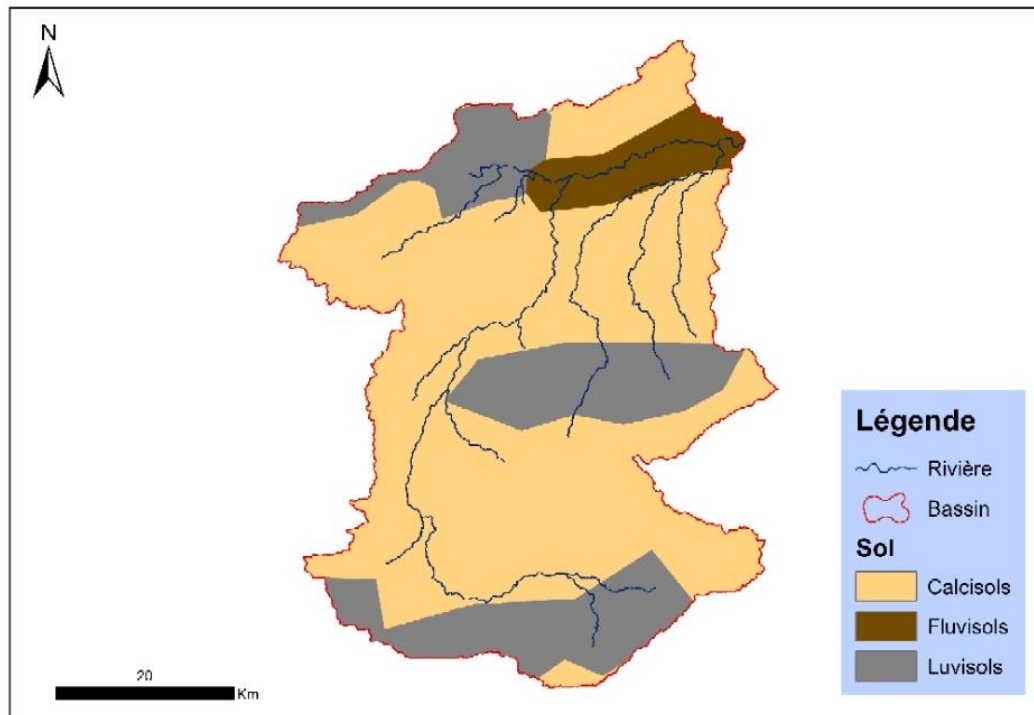


Figure 12 : Carte des sols de bassin versant de mouilah (FAO, 2011)

Le bassin versant de Mouilah présente trois types de sols différents :

- Les calcisols
- Les fluvisols
- Les luvisols

II.3 Occupation de sol :

Les données sur l'occupation des sols (figure 12) dans la zone d'étude proviennent du centre européen des études spatiales.

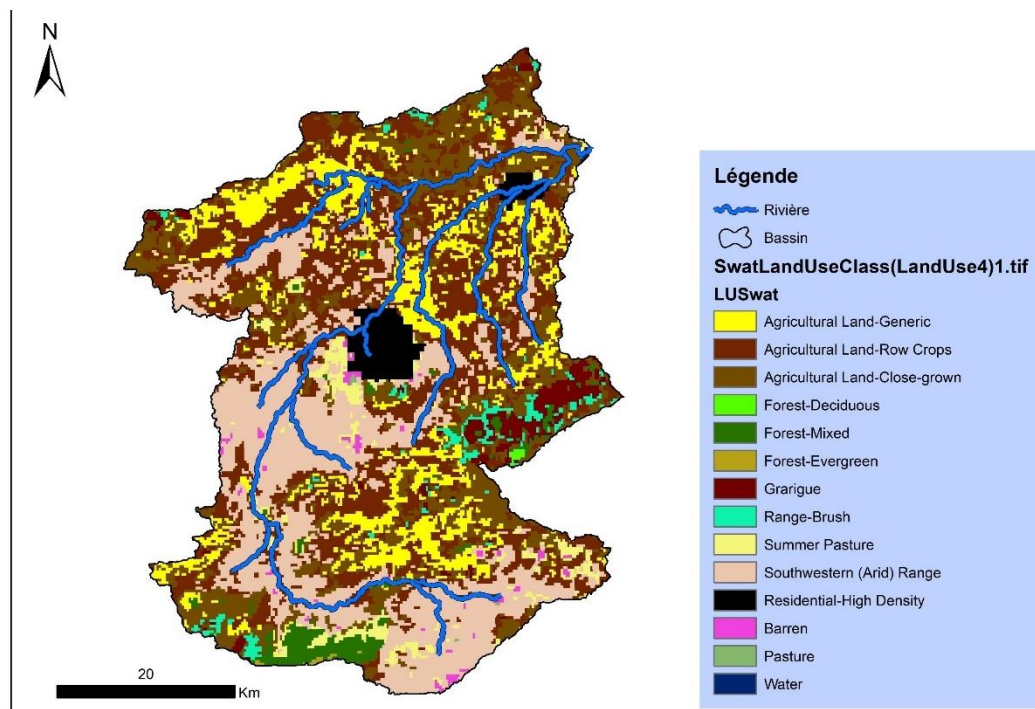


Figure 12 : Carte d'occupation des sols de bassin versant de Mouilah
(http://due.esrin.esa.int/page_globcover.php)

II.4 Les données climatiques

Les données de précipitations de l'Oued Mouilah, couvrant la période de 2003 à 2011, sont fournies par l'Agence Nationale des Ressources Hydriques algérienne (ANRH). Alors que les autres données précipitations, les températures minimales et maximales, l'ensoleillement, l'humidité et la vitesse du vent, obtenues à partir du système de réanalyse du Climate Forecast System (CFSR) (<https://swat.tamu.edu/data/cfsr>).

II.5 Mesure de débit :

Les mesures quotidiennes de débit de la station exutoire de Mouilah, collectées de 2003 à 2011, proviennent de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH).

II.6 Pentas

Les pentes (figure 13) du bassin ont été classées en cinq catégories distinctes :

Pent<5%

5%<pent<10%

10%<pent<15%

15%<pent<20%

Pent>20%

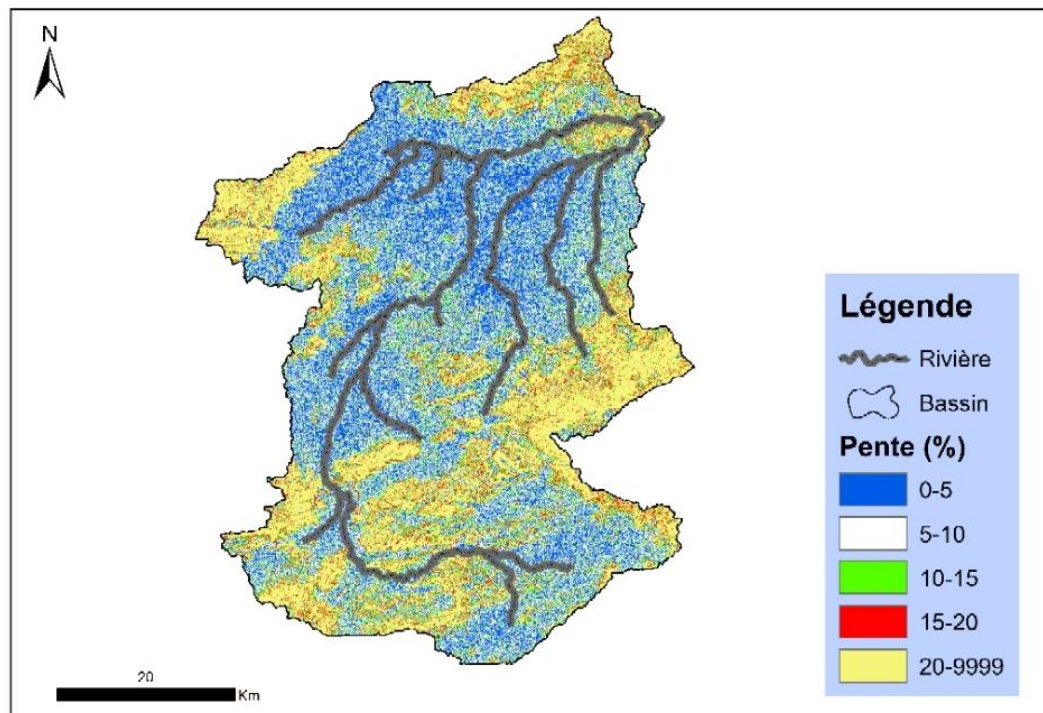


Figure 13 : Carte des différentes Classes de pente du bassin versant de Mouilah

II.7 Les sous bassin d'oued mouilah :

Une fois que les couches de sol, d'occupation des sols et les pentes ont été incorporées dans le modèle SWAT, notre bassin d'étude a été de subdivisé en 27 sous-bassins distincts (figure 14). Cette division nous permet de mieux analyser et gérer les différentes zones de la région de manière plus précise et ciblée.

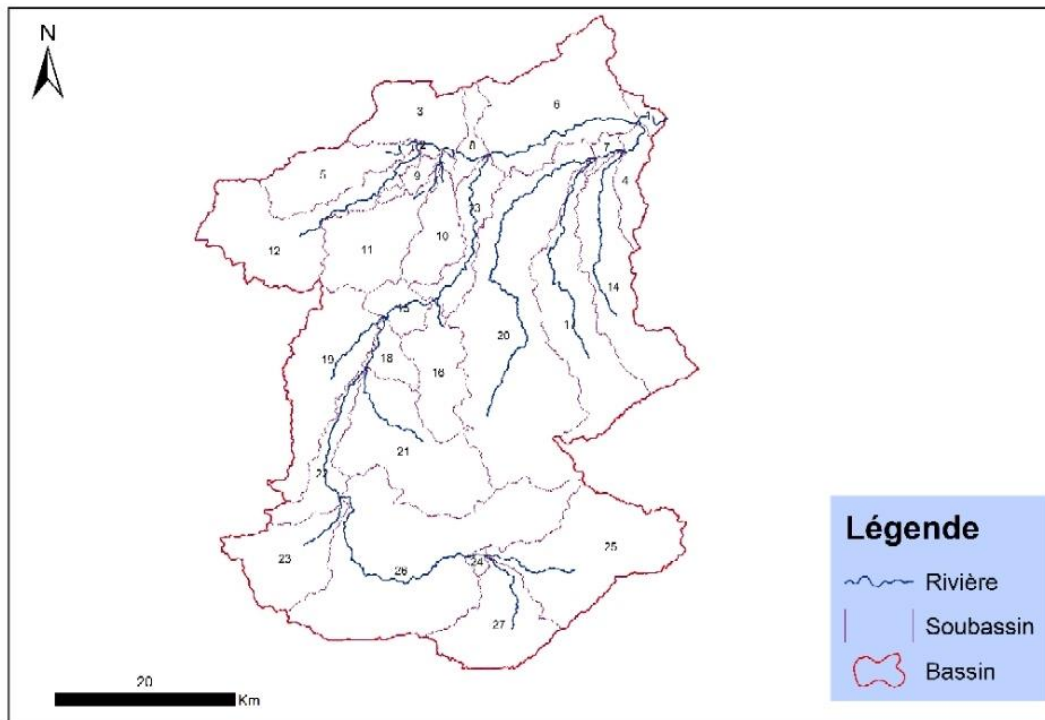


Figure 14 : Carte des différentes des sous bassin d'oued mouilah.

La figure suivante montre la démarche suivis durant notre travail

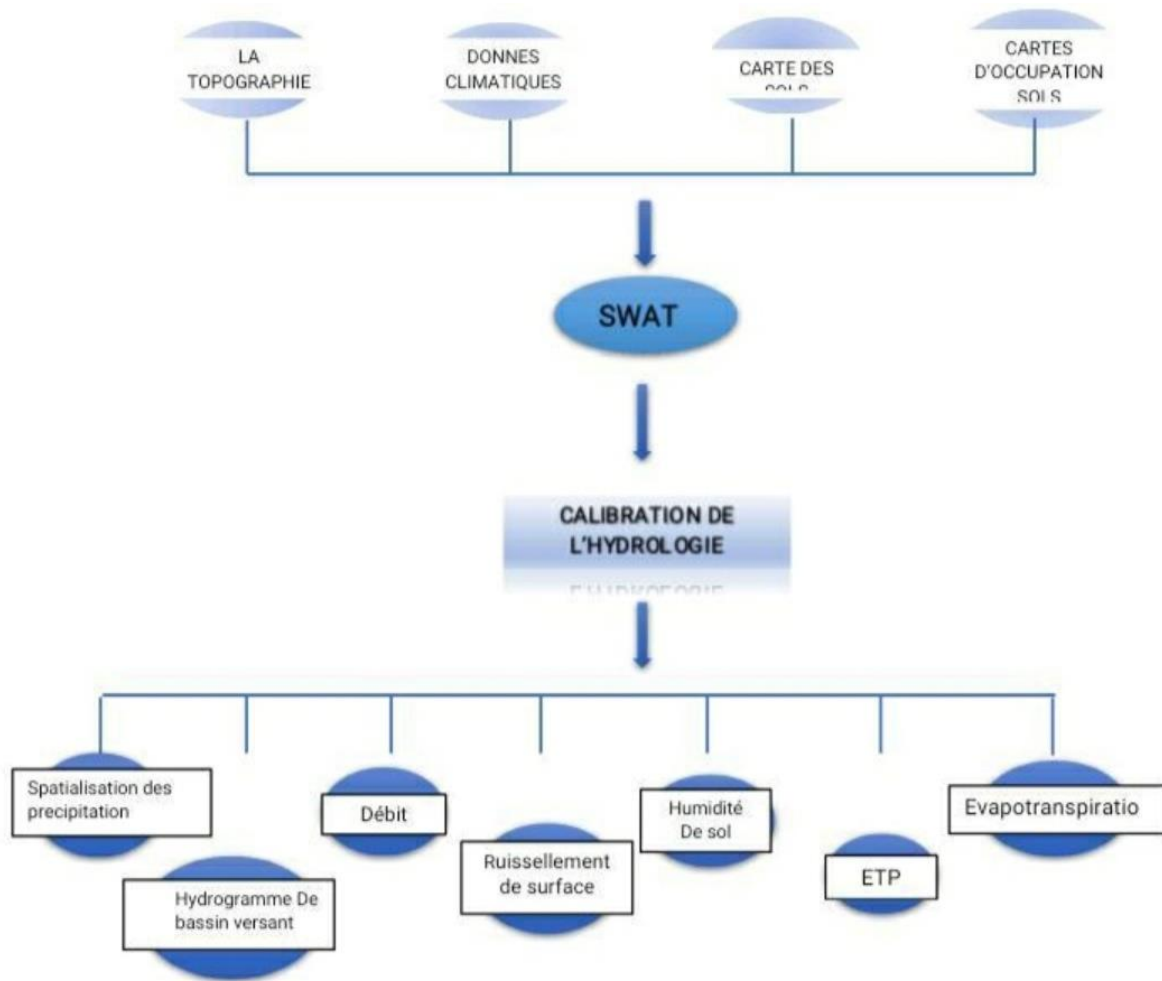


Figure 15: Démarche de modélisation utilisée dans cette étude par le modèle SWAT



Chapitre III

Résultats et interprétations

I. Calibration de l'hydrologie :

Les paramètres calibrés sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau(3) : Les paramètres calibrés

Paramètres	Définitions	Unité	Valeur par défaut	Valeur calibré
CN2.mgt	Initial SCS runoff curve number for moisture conditionII	Jour	35-98	40%
ALPHA.BF.gw	Coefficient d'évaporation à partir de la nappe souterraine	Jour	0.048	0.5
CH-K2-rte	Perméabilité des berges des canaux principaux.	Mm.h ²	0	100
GW-DELAY.gw	Délai de recharge de l'aquifère	Jour	31	150
GW.REVAP.gw	Coefficient d'évaporation a partir de la nappe souterraine	Jour	0.02	0.19
ESCO.hru	Facteur sol d'évaporation du sol en fonction de la profondeur Coefficient de Manning	Mm.h ²	0.95	0.3
OV-N.hru	d'ensemble du réseau hydrographique	Mm.h ²	0.14	0.5

La figure (16) présente les résultats de la calibration, où les débits simulés et observés se situent dans le même intervalle. Le coefficient NSE varie de 0,03 à 0,048, tandis que le coefficient R² varie de 0,18 à 0.2.

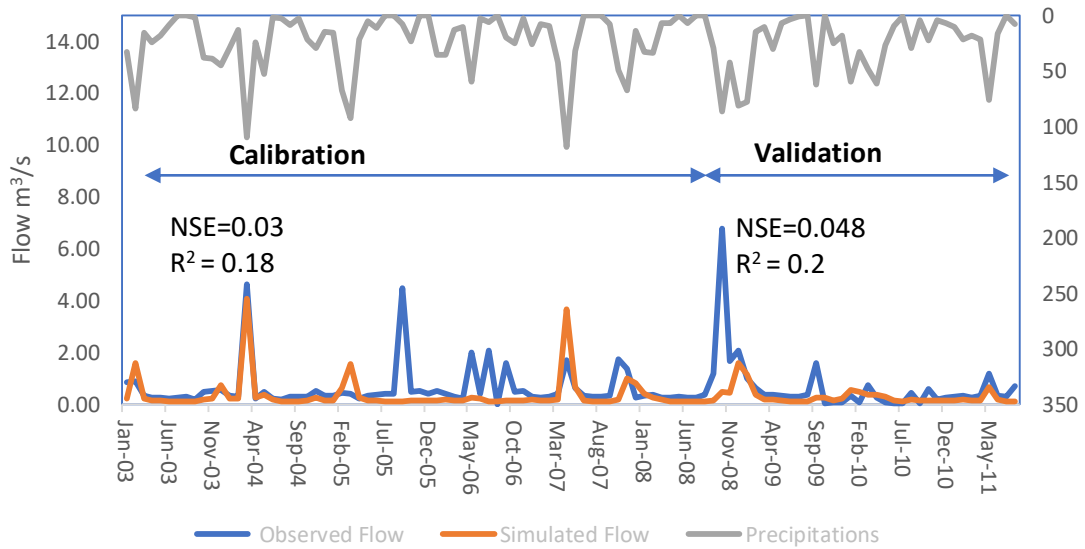


Figure 16: Calibration annuelle des débits observés et simulés dans le bassin versant Oued mouilah (2003-2011)

II. Le bilan hydrologique :

La figure (17) présente le bilan hydrologique qui a été modélisé à l'aide du modèle SWAT.

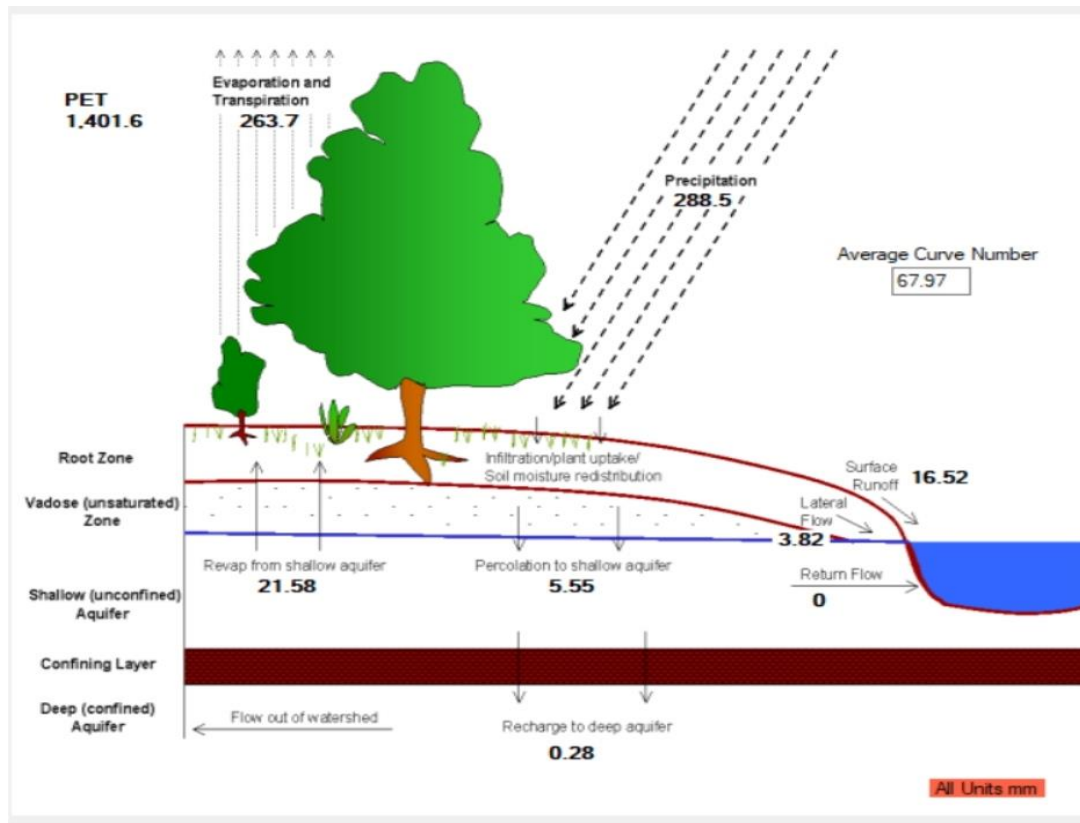


Figure 17 : bilan hydrologique modélisé par SWAT

La région de l'Oued Mouilah reçoit une quantité de 288,5 mm par an de précipitations, avec une évaporation de 263,7 mm et 1 401,6 mm d'évapotranspiration potentielle. L'infiltration vers la nappe peu profonde est de 5,55 mm. L'écoulement latéral représente une petite fraction de l'eau de surface à 3,82 mm et le ruissellement de surface présente 16,52 mm.

III. Le débit :

Le débit de notre site d'étude varie entre 0,01 et 0,38 m³/s, comme indiqué dans la figure 18. Les valeurs les moins élevées (0,01-0,09 m³/s) se trouvent en amont, tandis que les valeurs les plus importantes (0,23-0,38 m³/s) se trouvent en aval à l'entrée du barrage de Hammam Boughrara.

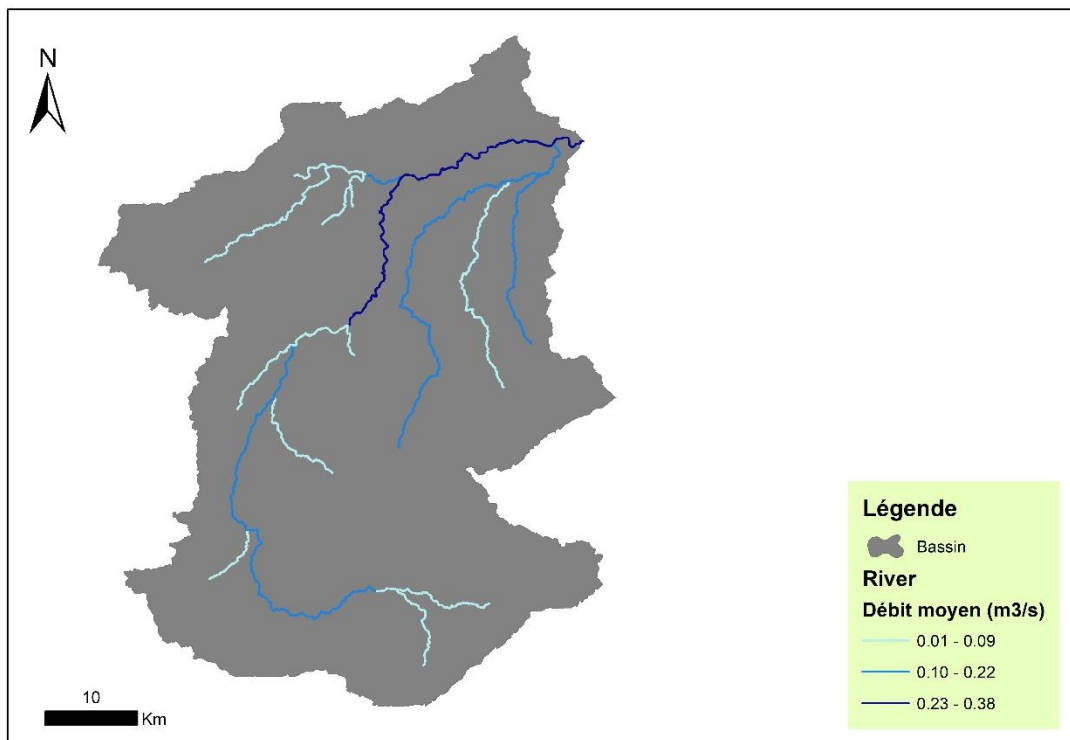


Figure 18: Carte de débit d'Oued mouilah pour la période (2003-2011).

IV. Spatialisation des précipitations

Les précipitations varient entre 270 et 416 mm par an, comme illustré dans la figure 19. La partie amont de la région d'étude reçoit la plus grande quantité de précipitations, avec des valeurs comprises entre 351 et 416 mm, tandis que la partie aval enregistre des valeurs de précipitations plus faibles, entre 279 et 350 mm.

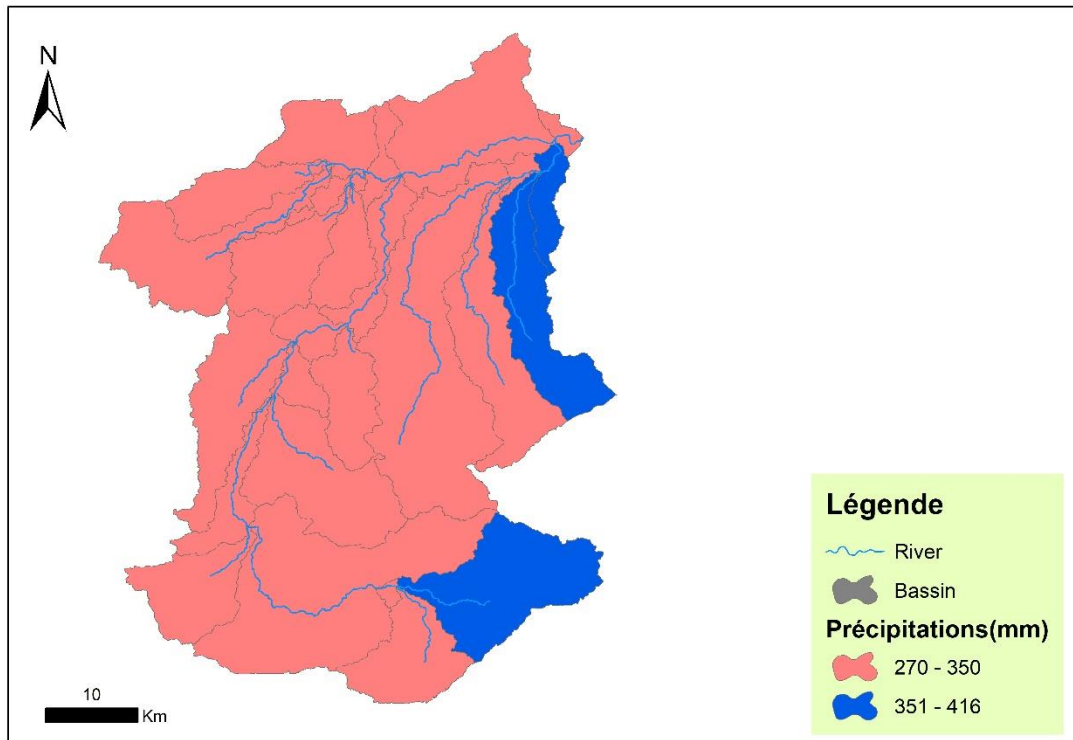


Figure 19: Carte des précipitations moyennes annuelles d’oued mouilah entre (2003 - 2011)

V. quantité d'eau dans le sol

Pendant la période étudiée, le ruissellement de surface présente une variation annuelle comprise entre 21 et 48 mm (voir figure 20). Les valeurs les plus élevées sont observées dans la partie amont du bassin, atteignant 33 et 48 mm, tandis que les valeurs les plus faibles se situent en aval, entre 21 et 32 mm.

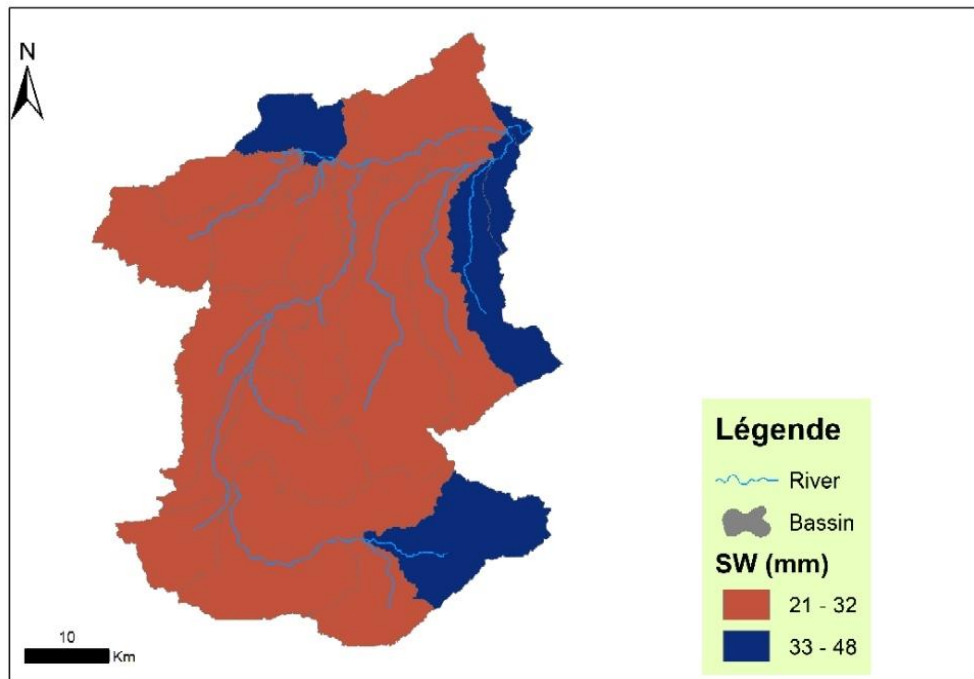


Figure 20 : carte quantité d'eau dans le sol a oued mouillah(2003-2011).

VI. Evapotranspiration

L'évapotranspiration présente une variation de 226 à 349 mm (figure 21) dans le bassin versant. Les valeurs les plus élevées sont localisées dans la partie amont, allant de 267 à 349 mm, tandis que les valeurs les plus faibles se trouvent dans la partie aval, variant de 226 à 266 mm.

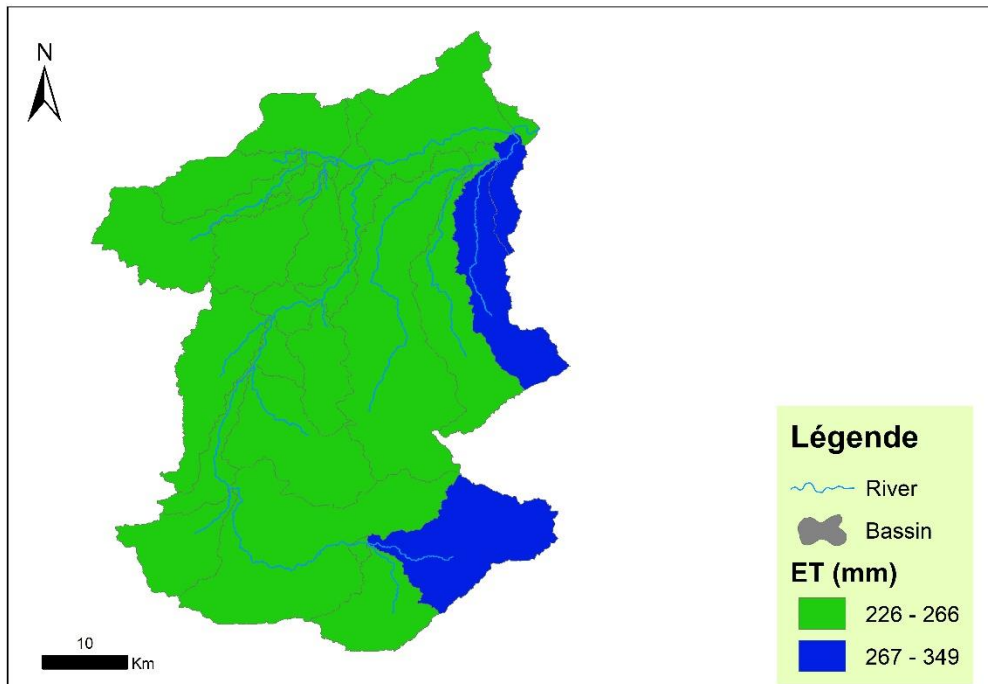


Figure 21 : Carte d'évapotranspiration d'oued mouilah pour la période (2003- 2011).

VII. L'évapotranspiration potentielle :

L'évapotranspiration potentielle dans le bassin variait entre 1367 et 1410 mm par an (22). La quantité la plus élevée était observée dans la partie amont, allant de 1407 à 1410 mm, tandis que la valeur la plus basse était dans la partie aval, variant de 1367 à 1370 mm.

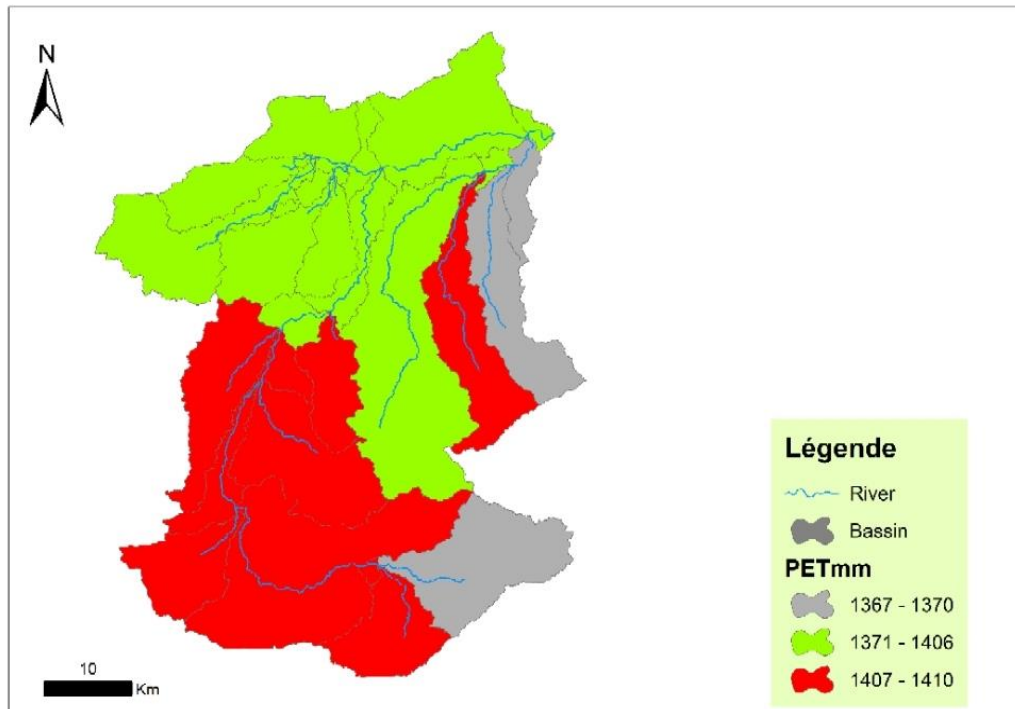


Figure 22: Carte d'évapotranspiration potentielle d'oued mouilah (2003 -2011).

VIII. Ruissellement de surface :

Au cours de la période étudiée, les mesures du ruissellement de surface ont montré une variation annuelle comprise entre 0 et 45 mm (figure23). Les quantités les plus importantes ont été relevées sur la côte est du bassin, avec des valeurs atteignant 25 et 45 mm. En revanche, les mesures les plus basses ont été enregistrées sur les côtés nord et sud, avec respectivement 0 et 11 mm.

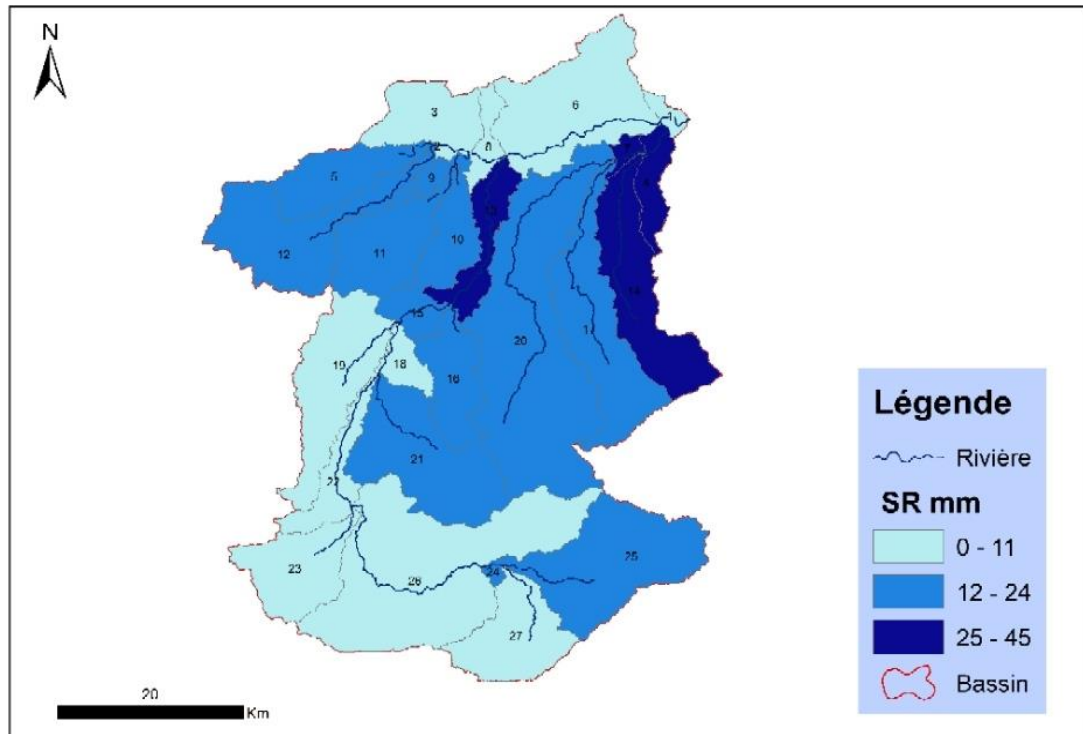


Figure 23 : carte ruissellement de surface d’oued mouilah (2003,2011)



Discussion

Discussion

Cette étude est basée sur l'utilisation de Modèle SWAT (soil and water assessment tool) pour la simulation du cycle de l'eau dans le bassin versant de l'Oued Mouilah qui est un bassin transfrontalier entre l'Algérie et le Maroc entre 2003-2011. Le modèle SWAT a été largement utilisé en Afrique où il a démontré son efficacité, comme au Nil (2,9 millions de km²) qui couvre 10 % du continent africain (A. van Griensven et al.,2012), au bassin du lac Tchad est le plus grand bassin endoréique du monde, avec une première superficie de 2 500 000 km² (Ali.B et l.,2022), à Medjerda, le principal fleuve tunisien, qui prend sa source dans les montagnes semi-arides de l'Atlas de l'Est de l'Algérie, avec une superficie 24 000 km², dont 7700 km² situés en Algérie (Bouraoui, F et al.,2005).

Nous avons calibré manuellement à un pas de temps mensuel sept (07) paramètres (Tableau 03), le CN2.mgt (Numéro de la courbe de ruissellement initiale du SCS pour la condition d'humidité),ALPHA-BF.gw (Coefficient d'évaporation à partir de la nappe souterraine),CH-K2.rte (Perméabilité des berges des canaux principaux),GW.DELAY.gw (Délai de recharge de l'aquifère),GW.REVAP.gw (Coefficient d'évaporation à partir de la nappe souterraine),ESCO.hru (facteur sol d'évaporation du sol en fonction de la profondeur) et OVN.hru (Coefficient de Manning d'ensemble du réseau hydrographique). Les indices de performance NSE <0.5, R² <0.5 étaient insatisfaisantes (Moriassi et al, 2007), mais les données observées et simulées étaient dans le même intervalle. NSE entre 0,03 à 0,048, tandis que le coefficient R² varie de 0,18 à 0.2.(figure16). Cela est dû à plusieurs raisons, la calibration manuelle (on a pas fait la calibration automatique), nous avons pas assez d'information sur la rivière dans la territoire du Maroc (on a pas assez de données sur la station d'épuration d'Oujda), la précision de la carte sol (FAO) qui est une carte à très grande résolution (une carte des sols plus précise aurait peut être amélioré les résultats de la calibration), la calibration dans le milieu semi-aride nord-africain est très difficile (Zettam et al.,2017 ; Briak al.,.,2019 ; Khelifa et al.,2021. Bouanani, 2004. Mourad et al (2019) au Maroc ont calibrés 6 paramètres le bassin versant de Laou située

dans la partie nord et couvre une superficie d'environ 940 km² ont trouvé le NSE 0.76 à 0.84 et le R² comprise entre 0.74 à 0.82, J. Daramola et al., (2019) au Nigéria ont calibrés 11 paramètres, au Shiroro (32 125 km²), au centre-nord du Nigéria, en Afrique de l'Ouest ont trouvé les NSE entre 0.01 à 0.91 et le R² 0.53 à 0.93, Zettam et al., (2020) au Algérie dans le bassin semi-aride de Tafna (7200 km²) ont trouvé le NSE entre 0.42 et 0.75 et le R² entre 0.25 et 0.84. Nos résultats de simulation ont permis d'estimer et de spatialiser les différentes composantes du cycle hydrologique, les précipitations qui ont une valeur moyenne inter annuelle de 288.5 mm/an, elles varient entre 270 à 416 mm/an, tandis que (ANRH) a estimé une variance de 200 à 300 mm/an ; le ruissellement varie entre 0 à 45 mm/an et selon (ANRH) il varie de 5 à 20 mm/an et l'évapotranspiration potentielle obtenue par SWAT est de 1367 à 1410 mm/an et (ANRH) Bouanani 2004 a marqué une valeur qui varie de 1400 à 1500 mm/an.

Ces résultats, ainsi que ceux des autres chercheurs, confirment que SWAT est un outil très efficace pour la gestion de la ressource en eau dans les zones arides et semi arides de l'Afrique (Mourad et al., 2019 Daramola et al., 2019 Zettam et al., 2020).



Conclusion

Conclusion générale

Notre travail a permis de tester et appliquer la modélisation hydrologique à l'échelle d'un bassin versant méditerranéen semi-aride en Afrique du Nord (oued mouilah). Le modèle hydro-agro-environnemental SWAT utilisé dans cette étude a été appliqué au bassin versant semi-aride situé dans le nord-ouest de l'Afrique entre l'Algérie et le Maroc. La calibration réalisée pour la période de 2004 à 2011. Le modèle a ainsi reproduit le bilan hydrologique au niveau des différentes entités de la zone d'étude. Les résultats obtenus sont le fruit d'une longue étape de préparation et de structuration des données à une échelle spatio-temporelle à l'aide d'un système d'information géographique, ainsi que d'une étape de calage du modèle qui a été réalisée.

Le calibrage du modèle a été sur une période de sept ans (2004-2011). Cependant, en raison d'un manque important d'informations et de l'utilisation d'une calibration manuelle, on n'a pas pu obtenir des résultats meilleurs., mais nous avons réussi à estimer les débits à différentes parties du réseau hydrographique, ainsi que les précipitations, le ruissellement de surface, l'humidité du sol, l'évaporation et l'évapotranspiration à l'échelle du bassin d'étude. De plus, les résultats montrent que l'eau de surface est principalement alimentée par le ruissellement.

Enfin, notre étude a montré que dans que ce modèle est un outil très efficace pour la modélisation et la compréhension des performances hydrologiques et de la gestion des ressources en eau dans les bassins versants semi-arides.



Références Bibliographiques

Référence :

1. Ait M'barek, S., Rochdi, A., Bouslihim, Y., Miftah, A. (2021). Multi-site calibration and validation of SWAT model for hydrologic modeling and soil erosion estimation: A case study in El Grou watershed. Morocco. *Ecological Engineering and Environmental Technology* 2021,22(6),45-52.
2. ANCTIL, F. (2004). "Description du projet de recherche - Modélisation hydrologique des petits bassins versants en milieu rural." Financement : Fonds Québécois de la Recherche sur la Nature et les Technologies (FQRNT), 19 ,357–368.
3. Andro, L . (2019). Modélisation hydrologique SWAT du bassin versant de la Charente du traitement des données au calage du modèle. *Sciences de l'environnement*. 2019. fhal-02609674f .31p.
4. Aqnouy, M., El Messari, J. E. S., Ismail, H., Bouadila, A., Moreno Navarro, J. G., Loubna, B., & Mansour, M. R. A. (2019). Assessment of the SWAT model and the parameters affecting the flow simulation in the watershed of Oued Laou (Northern Morocco). *Journal of Ecological Engineering*, 20(4).
5. Arnold, J.G., Srinivasan R., Muttiah R.S., Williams J.R. (1998). Large-area hydrologic modeling and assessment: Part I. Modèle development. *J. Am. Water Res. Assoc.*34, 73–89.
6. Bennis. S, *Hydrologie et hydraulique*, 2eme edition.2009, p 230.
7. Boithias, L., 2011, *Modélisation des transferts de pesticides à l'échelle des bassins versants en période de crue*, Thèse de Doctorat, Université Toulouse III Paul Sabatier, 220 p.
8. BOUANANI, A. (2004). *HYDROLOGIE, TRANSPORT SOLIDE ET MODELISATION Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW–Algérie)* (Doctoral dissertation).
9. Boudhraa H. (2007). *Modélisation pluie - débit à base géomorphologique en milieu semi-aride rural Tunisien : Association d'approches directe et inverse*. Thèse de Doctorat, Univ. 7 novembre Carthage (Tunisie), 227 p., 129 fig.
10. Bouzid-Lagha, S., & Djelita, B. (2012). Etude du phénomène d'eutrophisation dans le Barrage de Hammam Boughrara (Wilaya de Tlemcen, Algérie). *Hydrological sciences journal*, 57(1), 186-201.
11. Briak, H., Mrabet, R., Moussadek, R., & Aboumaria, K. (2019). Use of a calibrated SWAT model to evaluate the effects of agricultural BMPs on sediments of the Kalaya River basin (North of Morocco). *International Soil and Water Conservation Research*, 7(2), 176-183.
12. Chaponnière A., 2005. *Fonctionnement hydrologique d'un bassin versant montagneux semi-Aride. Cas du bassin versant du Rehraya (Haut Atlas Marocain)*. Thèse, Institut National Agronomique Paris-Grignon, France, 268p.
13. Cunningham, C. N., & Rutter, J. (2020). 20,000 picometers under the OMM : diving into the vastness of mitochondrial metabolite transport. *EMBO reports*, 21(5), e50071.
14. Daniel, C., Le Boeuf, P, Dobbins et Abkowitz, 2011. Watershed modeling and its applications: A state-of-the-art review. *Open Hydrology Journal*, 5 (2): pp. 26-50.

15. Daramola, J., Ekhwan, T. M., Mokhtar, J., Lam, K. C., & Adeogun, G. A. (2019). Estimating sediment yield at Kaduna watershed, Nigeria using soil and water assessment tool (SWAT) model. *Heliyon*, 5(7), e02106.
16. Dingman, S. (2002). *Physical hydrology*. 2^{ème} Edition • El-Hadef-El-Okki, M. (2016). Etude des relations Lumbricidae-élément traces métalliques en conditions naturelles et contrôlées. Thèse de doctorat option Pollution et Ecotoxicologie. Université Frère Mentouri Constantine. 272p.
17. Ferrah, N. (2017). Simulation des écoulements mensuels par le modèle GR2M Cas du bassin de l'Isser. Master en Hydraulique option alimentation en eau potable. Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique. 60p.
18. Furusho, C., (2011). Modélisation hydrologique des bassins versants périurbains. Thèse de doctorat. École centrale de Nantes .235p
19. Gnouma, R., 2006, Aide à la calibration d'un modèle hydrologique distribué au moyen d'une analyse des processus hydrologiques : application au bassin versant de l'Yzeron, thèse de doctorat, institut nationale des sciences appliquées de Lyon- France, 448p .
20. Gray D. M., 1972. Manuel des principes d'hydrologie. Comité National Canadien de la Décennie Hydrologique Internationale. Ottawa.
21. Grusson, Y., 2016, modélisation de l'évolution hydro climatique des flux et stocks d'eau verte et d'eau bleue du bassin versant de la Garonne, thèse de doctorat, Institut National P.de Toulouse, 382p.
22. Hamed, K. B., & Bouanani, A. (2016). Caractérisation d'un bassin versant par l'analyse statistique des paramètres morphométriques : Cas du bassin versant de la Tafna.(Nord-ouest algérien). *Geo-Eco-Trop*, 40(4), 277-286.
23. HARRAR, S., & Souhila, G. H. O. M. A. R. I. (2016). Le secteur industriel algérien : Analyse des facteurs de compétitivité des petites et moyennes industries. Cas de la wilaya de Tlemcen. *Les cahiers du MECAS*, N, 13.
24. Hingray, A, L 2009, in Labbas, M, 2015. Modélisation hydrologique de bassins versants périurbains et influence de l'occupation du sol et de la gestion des eaux pluviales. Doctorat. Spécialité Océan, Atmosphère, Hydrologie. Université de Grenoble. 389.
25. Ketrouci, K., Meddi, M., & Abdesselam, B. (2012). Etude des crues extrêmes en Algérie : cas du bassin-versant de la Tafna.
26. Khelifa, W. B., Hermassi, T., Strohmeier, S., Zucca, C., Ziadat, F., Boufaroua, M., & Habaieb, H. (2017). Parameterization of the effect of bench terraces on runoff and sediment yield by SWAT modeling in a small semi-arid watershed in Northern Tunisia. *Land Degradation & Development*, 28(5), 1568-1578.
27. Kouane, E, C, G. (2019). Application du modèle SWAT pour la modélisation de l'écoulement dans un bassin versant peu jauge en zone Soudano-Sahélienne (Burkina-Faso). Diplôme de master. Spécialité infrastructure et réseaux hydrauliques. Institut International d'Ingénierie Burkina-Faso. 95p.
28. Laborde J.P., 2009. Eléments d'hydrologie de surface. Cours : Cycle d'ingénieur Hydroprotech. Ecole polytechnique de l'université de Nice. 202p.

- 29.** Laborde J.P., 2009. Eléments d'hydrologie de surface. Cours : Cycle d'ingénieur Hydroprotech. Ecole polytechnique de l'université de Nice. 202.
- 30.** Laurent, F. (1996). Outils de modélisation spatiale pour la gestion intégrée des ressources en eau: Application aux Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux (Doctoral dissertation, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris; Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne).
- 31.** Mami, A., Raimonet, M., Yebdri, D., Sauvage, S., Zettam, A., & Sánchez-Pérez, J. M. (2021). Future climatic and hydrologic changes estimated by bias-adjusted regional climate model outputs of the Cordex-Africa project: case of the Tafna basin (North- Western Africa). *International Journal of Global Warming*, 23(1), 58-90.
- 32.** Marchandise A. 2007. Modélisation hydrologique distribuée sur le gardon d'Anduze : étude comparative de différents modèles pluie-débit, extrapolation de la normale à l'extrême et tests d'hypothèses sur les processus hydrologiques. Thèse de Doctorat, Univ. Montpellier II, Sciences et Techniques du Languedoc, 214 p., 26 fig.
- 33.** Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- 34.** Musy A., 2005. Note de cours "Hydrologie générale" de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). URL: <http://echo2.epfl.ch/e-drologie>.
- 35.** Neitsch, S, L., Arnold, J, G., Kiniry, J, R., Williams, J, R. (2005). "Soil and Water Assessment Tool theoretical documentation, version 2005." Grassland, Soil and Water Research Laboratory - Agricultural Research Service. Blackland Research Center –Texas Agricultural Experiment Station. P. 494.
- 36.** Perrin, C. Vers une amélioration d'un modèle pluie-débit au travers d'une approche comparative. 2000. PhD Thesis. Ph. D. Thesis, INP Grenoble/Cemagref Antony, France.
- 37.** Piens, B. (1970). Cour d'hydrologie ; chargé de cour à l'université de paris VI Hingray, B., Picouet, C., Musy, A. (2009) ; livre, Hydrologie2 une science pour l'ingénieur.
- 38.** Piens, B. (1970). Cour d'hydrologie ; chargé de cour à l'université de paris VI Hingray, B., Picouet, C., Musy, A. (2009) ; livre, Hydrologie2 une science pour l'ingénieur • Sahli, L. (2012). Etude du comportement de quelques espèces floristiques et faunistiques des écosystèmes aquatiques vis-à-vis des éléments traces métalliques par des bioessais Loglithostratigraphique. Thèse de doctorat. Université Frères Mentouri onstantine .286P.
- 39.** Roche, F. M. Dictionnaire francais d'hydrologie de surface (avec équivalents en anglais, espagnol, allemand). 1986.
- 40.** Roche, P. A. Les modèles. Gestion des Eaux : Automatisation, Information et Télégestion, F.Valiron (Ed.), Presses de l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées, 1988, 138-166. Roche, P.A ; MIQUEL, Jacques .

- 41.** Roche, P. A. Les modèles. Gestion des Eaux: Automatisation, Information et Télégestion, F. Valiron (Ed.), Presses de l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées, 1988, 138-166.
- 42.** Szczypt, C, 2012. Hydrologie spatiale pour le suivi des sécheresses du bassin méditerranéen. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 197p.
- 43.** Szczypt, C, 2012. Hydrologie spatiale pour le suivi des sécheresses du bassin méditerranéen. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 197p.
- 44.** Terfous, A., Megnounif, A., & Bouanani, A. (2001). Etude du transport solide en suspension dans l'Oued Mouilah (Nord Ouest Algérien). *Revue des Sciences de l'Eau*, 14(2), 173-185.
- 45.** Van Griensven, A., Ndomba, P., Yalew, S., & Kilonzo, F. (2012). Critical review of SWAT applications in the upper Nile basin countries. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3371-3381.

*Mise en œuvre du modèle agro-Hydrologique SWAT dans
le bassin Transfrontalier de Mouilah*

الملخص

تتمحور الدراسة حول المحاكاة الهيدروليكية وتقدير حوض وادي مويلح، وهو حوض مائي في شمال غرب قارة إفريقيا على الحدود مع المغرب. على الرغم من عدم توفر معلومات كافية، تم استخدام نموذج سواط لتحليل الحوصلة المائية للفترة ما بين 2003 و 2011، حيث أظهر توافق في التحليل الزمني والمكاني للحوصلة المائية، و أظهر كفاءة عالية في النتائج المستخلصة. وأظهرت الدراسة أن كمية التدفق في الحوض تتراوح بين 0.01 و 0.38 متر مكعب في الثانية، و كمية الأمطار تتراوح بين 270 و 416 ملم في السنة، ومعدل الجريان يتراوح بين 0 و 45 ملم في السنة، و كمية التبخر تتراوح بين 226 و 349 ملم في السنة، والتبخر المحتمل يتراوح بين 1368 و 1410 ملم في السنة، و كمية الماء في التربة تتراوح بين 21 و 48 ملم في السنة.

الكلمات المفتاحية : المحاكاة الهيدروليكية -سواط -واد مويلح -شمال غرب الجزائر

Abstract

The main objective of this study is the hydraulic modeling and estimation of water availability in the Oued Mouilah watershed (2650 km²), located in northwest Africa on the border with Morocco. The analysis revealed concurrence within the same interval between 2003 and 2011 (NSE=0.048, R²=0.2), and the SWAT model demonstrated high effectiveness in the study's results. It was shown that the flow rate ranges between 0.01 and 0.38 m³/s, precipitation between 270 and 416 mm/year, runoff between 0 and 45 mm/year, evaporation between 226 and 349 mm/year, potential evapotranspiration between 1368 and 1410 mm/year, and soil water content between 21 and 48 mm/year.

Key words : hydraulic simulation, SWAT, Oued Mouilah, northwest Algeria.

Résumé

L'objectif principal de cette étude est la modélisation hydraulique et l'estimation de la disponibilité en eau du bassin versant de l'oued Mouilah (2650 km²), situé dans le nord-ouest de l'Afrique, à la frontière avec le Maroc. L'analyse a révélé une concordance entre les débits simulés et observés entre 2003 et 2011 (NSE=0.048, R²=0.2), le modèle SWAT a montré une efficacité élevée dans les résultats de l'étude. Les résultats montrent que le débit se situe entre 0.01 et 0.38 m³/s, les précipitations entre 270 et 416 mm/an, l'écoulement entre 0 et 45 mm/an, l'évaporation entre 226 et 349 mm/ans, l'évapotranspiration potentielle entre 1368 et 1410 mm/ans, et la quantité d'eau dans le sol entre 21 et 48 mm/ans.

Mots-clés : simulation hydraulique, SWAT, Oued Mouilah, Nord-ouest de l'Algérie.