

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة محمد بوضياف - المسيلة
Université Mohamed Boudiaf - M'Sila

FACULTE SCIENCES
DEPARTEMENT DES SCIENCES
AGRONOMIQUES
N° :20 / DSA/VCDPGR/2025



DOMAINE : SCIENCES DE LA NATURE
ET DE LA VIE
FILIERE : SCIENCES AGRONOMIQUES
OPTION : PRODUCTION VEGETALE

Mémoire présenté pour l'obtention
du diplôme de Master Académique

Par : **YAHIAOUI Ali Kamel**

Intitulé

**Application du modèle SWAT pour prédire le
ruissellement agricole et la perte de nutriments dans
une région semi-aride, cas du sous bassin versant de
Saida**

Soutenu devant le jury composé de:

Melle MADANI Djamila	MCA	Université Med BOUDIAF- M'SILA	Présidente
M. ABDELKEBIR Brahim	MCB	Université de Ghardaia	Promoteur
Mme. BEDDAL Dalila	MCB	Université Med BOUDIAF - M'SILA	Co-Promotrice
Mr GUESRI Mourad	MCB	Université Med BOUDIAF- M'SILA	Examineur

Année universitaire : 2024 /2025

Remerciements

Je souhaite tout d'abord exprimer ma profonde gratitude à Dieu Tout-Puissant, qui m'a accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce modeste travail.

J'exprime mes remerciements les plus sincères à mon encadrant, Dr Abdelkebir Ibrahim, pour son accompagnement précieux, ses conseils éclairés, sa disponibilité constante et son soutien bienveillant qui ont grandement facilité l'avancement de ce mémoire.

Je tiens également à remercier ma co-encadrante, Dr Beddal Dalila, pour son encadrement rigoureux, sa patience, ses remarques constructives et la confiance qu'elle m'a toujours accordée. Son implication a constitué une source d'inspiration et de motivation.

Mes remerciements s'adressent aussi à Dr Madani Djamila, présidente du jury, pour l'honneur qu'elle me fait d'évaluer ce travail et pour le temps consacré à son examen, ainsi qu'à Dr Guasri Mourad, examinateur, pour ses observations et suggestions qui contribueront à enrichir la qualité de ce mémoire.

Je n'oublie pas de remercier chaleureusement l'ensemble des enseignants de la Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université Mohamed Boudiaf – M'Sila, qui ont participé à ma formation et m'ont transmis leur savoir et leurs valeurs académiques.

Enfin, j'adresse ma gratitude à toutes les personnes qui, de près ou de loin, par un conseil, une aide, un encouragement ou une simple présence, ont contribué à l'accomplissement de ce travail.

dédicace

À mes chers parents, qui ont toujours été à mes côtés, me soutenant inlassablement tout au long de ces longues années d'études. Leur présence, leurs sacrifices et leur amour inconditionnel ont été les piliers de ma réussite. Ce travail n'est qu'un humble témoignage face à tout ce qu'ils m'ont offert durant ma vie. Merci du fond du cœur, et j'espère que cette réalisation saura exprimer, ne serait-ce qu'en partie, ma profonde gratitude.

À mes cinq frères bien-aimés, véritables piliers de ma vie, des rocs solides dans mon dos, dont la force, l'amour fraternel et le soutien n'ont jamais failli. Je vous remercie infiniment pour votre présence constante et vos encouragements précieux.

À mes deux sœurs chéries, étoiles qui illuminent mes jours, douces et rayonnantes, sources de réconfort et de joie. Merci d'être toujours là.

Et à mes amis qui ont marqué mon parcours universitaire d'une empreinte inoubliable :
À mon cher ami oualhi khalil, toujours présent avec sa gentillesse et sa noblesse,
À mon compagnon de route pendant deux ans, plus qu'un ami, un frère : Mohoun Abderraouf Amine,
À Mayouf Mohamed et Anis, lumières de l'âme durant nos années d'étude,
Recevez toute ma gratitude et mon affection pour chaque instant, chaque mot, chaque soutien sincère.

À toute ma famille, aux familles Yahiaoui et Guini,
À mes amis fidèles, à tous ceux que je connais et qui me connaissent,
À tous ceux qui ont été source de joie ou de soutien, par un mot, un geste, un sourire ou une prière... Merci infiniment.

Je n'oublie pas de rendre hommage, avec tout le respect et la piété, à mes grands-parents disparus. Que Dieu leur accorde Sa miséricorde et les accueille dans Son vaste paradis.

Et enfin, à tous ceux qui aiment le bien,
À ceux qui affrontent les épreuves de la vie avec dignité, sans jamais perdre espoir...
Je vous dédie ce travail avec tout mon respect et mon amour

Application du modèle SWAT pour prédire le ruissellement agricole et la perte de nutriments dans une région semi-aride, cas du sous bassin versant de Saïda

Résumé

Cette étude porte sur l'application du modèle SWAT (Soil and Water Assessment Tool) pour simuler le ruissellement agricole et la perte de nutriments dans une région semi-aride, en l'occurrence le sous-bassin versant de Saïda. L'approche méthodologique s'est appuyée sur l'intégration des données climatiques, pédologiques et d'occupation du sol dans un SIG, couplées au modèle ArcSWAT, afin d'évaluer les processus hydrologiques et leurs impacts sur les ressources naturelles.

Les résultats obtenus ont révélé une forte variabilité interannuelle des précipitations, oscillant entre 119 mm (1990) et 139 mm (1988), entraînant des fluctuations importantes des débits simulés, allant de 2,82 m³/s (1988) à 40,15 m³/s (1984). Le rendement en sédiments a atteint un maximum de 0,66 t/ha en 1984, traduisant une érosion hydrique marquée lors des épisodes pluvieux intenses, contre un minimum de 0,04 t/ha en 1989.

Concernant les pertes en nutriments, les nitrates (NO₃⁻) ont montré des valeurs comprises entre 16,6 g/ha (1990) et 125 g/ha (1986), tandis que le phosphore (P) a varié de 0 g/ha (1988) à 8,3 g/ha (1984). Ces résultats confirment l'influence directe des pratiques agricoles et du lessivage sur la qualité des eaux, mettant en évidence un risque de pollution diffuse accentué par les conditions semi-arides.

L'étude a démontré que le modèle SWAT constitue un outil performant d'aide à la décision, permettant d'identifier les zones sensibles, de quantifier les pertes en sol et nutriments, et de proposer des scénarios de gestion durable des terres et de l'eau. Toutefois, son application reste confrontée à plusieurs contraintes : la disponibilité limitée des données locales, la nécessité de campagnes de terrain pour la calibration et la validation, ainsi que la complexité technique de l'outil.

Mots clés : SWAT, ruissellement, nutriments, SIG, ArcSWAT, Saïda, climat semi-aride, érosion hydrique.

تطبيق نموذج SWAT للتنبؤ بالجريان السطحي الزراعي وفقدان المغذيات في منطقة شبه جافة. حالة الحوض الفرعي لولاية سعيدة

ملخص

تتناول هذه الدراسة تطبيق نموذج SWAT (أداة تقييم التربة والمياه) لمحاكاة الجريان السطحي الزراعي وفقدان المغذيات في منطقة شبه جافة، وبالتحديد في الحوض الفرعي لولاية سعيدة. اعتمد النهج المنهجي على دمج المعطيات المناخية والتربوية وبيانات استعمالات الأراضي داخل نظام المعلومات الجغرافية (SIG)، وربطها بنموذج ArcSWAT، بهدف تقييم العمليات الهيدرولوجية وأثارها على الموارد الطبيعية.

أظهرت النتائج المتحصل عليها وجود تباين كبير بين السنوات في كمية التساقطات المطرية، حيث تراوحت بين 119 ملم (1990) و 139 ملم (1988)، مما أدى إلى تذبذب ملحوظ في التصريفات المحسوبة التي تراوحت بين 2,82 م³/ثا (1988) و 40,15 م³/ثا (1984). كما بلغ معدل إنتاج الرواسب أقصى قيمة له 0,66 طن/هكتار سنة 1984، وهو ما يعكس شدة الانجراف المائي أثناء الفترات المطرية الغزيرة، مقابل أدنى قيمة 0,04 طن/هكتار سنة 1989.

أما فيما يتعلق بفقدان المغذيات، فقد تراوحت تراكيز النترات (NO_3^-) بين 16,6 غ/هكتار (1990) و 125 غ/هكتار (1986)، في حين تراوح الفوسفور (P) بين 0 غ/هكتار (1988) و 8,3 غ/هكتار (1984). تؤكد هذه النتائج التأثير المباشر للممارسات الزراعية وظاهرة الغسل على نوعية المياه، مما يبرز خطورة التلوث المنتشر خاصة في ظل الظروف المناخية شبه الجافة.

لقد برهنت الدراسة على أن نموذج SWAT يمثل أداة فعالة لاتخاذ القرار، إذ يتيح تحديد المناطق الحساسة، وقياس خسائر التربة والمغذيات، واقتراح سيناريوهات لإدارة مستدامة للأراضي والموارد المائية. ومع ذلك، فإن تطبيقه يواجه عدة عراقيل، منها محدودية توفر البيانات المحلية، والحاجة إلى حملات ميدانية للمعايرة والتحقق، فضلاً عن التعقيد التقني للأداة.

الكلمات المفتاحية: SWAT، الجريان السطحي، المغذيات، نظم المعلومات الجغرافية، ArcSWAT، سعيدة، مناخ

شبه جاف، الانجراف المائي.

Application of the SWAT Model to Predict Agricultural Runoff and Nutrient Loss in a Semi-Arid Region: Case of the Saïda Sub-Watershed

Abstract

This study focuses on the application of the SWAT model (Soil and Water Assessment Tool) to simulate agricultural runoff and nutrient loss in a semi-arid region, namely the Saïda sub-watershed. The methodological approach relied on the integration of climatic, soil, and land-use data into a GIS, coupled with the ArcSWAT model, in order to evaluate hydrological processes and their impacts on natural resources.

The results revealed a strong interannual variability in precipitation, ranging from 119 mm (1990) to 139 mm (1988), leading to significant fluctuations in simulated streamflows, from 2.82 m³/s (1988) to 40.15 m³/s (1984). Sediment yield reached a maximum of 0.66 t/ha in 1984, indicating marked water erosion during intense rainfall events, compared to a minimum of 0.04 t/ha in 1989.

Regarding nutrient losses, nitrate (NO₃⁻) values ranged between 16.6 g/ha (1990) and 125 g/ha (1986), while phosphorus (P) varied from 0 g/ha (1988) to 8.3 g/ha (1984). These results confirm the direct influence of agricultural practices and leaching on water quality, highlighting the risk of diffuse pollution exacerbated by semi-arid conditions.

The study demonstrated that the SWAT model is an effective decision-support tool, allowing the identification of sensitive areas, quantification of soil and nutrient losses, and proposal of sustainable land and water management scenarios. However, its application faces several constraints, including limited availability of local data, the need for field campaigns for calibration and validation, as well as the technical complexity of the tool.

Keywords: SWAT, runoff, nutrients, GIS, ArcSWAT, Saïda, semi-arid climate, water erosion.

Table des matières

Remerciements

Résumé

ملخص

Abstract

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Abréviations

Table des matières

Introduction Générale

Chapitre I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Cycle de l'eau.....	3
I.1.1 Définition.....	3
I.1.2 Eléments du cycle de l'eau.....	3
I.1.3 Cycle de l'eau en milieu semi-aride et aride.....	4
I.2 Ruissellement.....	5
I.2.1 Types de ruissellement.....	5
I.2.2 Facteurs influençant sur le ruissellement de l'eau.....	6
I.3 Le sol.....	6
I.3.1 Définition du sol.....	6
I.3.2 Composition du sol.....	6
I.3.3 Structure du sol.....	7
I.3.4 Impact du climat semi-aride sur le sol.....	8
I.4 Modélisation hydrologique.....	8

I.4.1 Définition du Modèle SWAT.....	8
I.4.2 Composantes du modèle SWAT.....	9
I.4.3 Exemples d'application du modèle SWAT pour la prédiction du ruissellement agricole.....	10
I.4.4 Etapes de modélisation par SWAT.....	10
I.4.5 Indicateurs d'évaluation.....	11
a. Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE).....	11
b. Coefficient de détermination (R2).....	11
c. Pourcentage de biais (PBIAS).....	12
d. Root Mean Square Error (RMSE).....	12
I.5 SIG et télédétection.....	12
I.5.1 Définition.....	12
I.5.2 Apport combiné de la télédétection et du SIG.....	13

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

II.1 Localisation géographique.....	14
II.2 Relief.....	15
II.3 Etude climatique.....	16
II.3.1 Données climatiques de la station météo de bassin versant.....	16
II.3.2 Précipitations.....	16
II.3.3 Température.....	17
II.3.4 Diagramme ombrothermique de Gaussen et Bagnouls.....	17
II.3.5 Climatogramme d'EMMBERGER (Q2).....	18
II.4 la pente terrestre de bassin versant de saida.....	20
II.5 Occupation du sol.....	21
II.6 Type de Sol.....	22

II.7 L'agriculture.....	23
-------------------------	----

Chapitre III: Application du modèle ArcSwat

III.1. Choix de la zone d'étude.....	24
III.2. Méthodologie.....	24
III.3 Données et outils utilisés.....	24
III.3.1 Données d'entrée.....	24
III.3.2 ArcSWAT.....	25
III.4 Mise en place du projet ArcSWAT.....	25
III.5 Analyse des résultats à l'échelle annuelle.....	32
III.6 Le débit.....	33
III.7 rendement en sédiments.....	34
III.8 Le nitrate (NO ₃).....	36
III.9 Le phosphore (P).....	37

Conclusion général

Liste des figures

Figure I.1: Schémas du cycle de l'eau (Source : Makhlouf, 2015).....	4
Figure I.2: Types de ruissellement de l'eau (Source: Musy et Higy, 1998).....	5
Figure I.3: Schémas de composition du sol (Source: https://espacepouurlavie.ca/structure-du-sol).....	7
Figure I.4: Types de structure du sol (Source: FAO, 2025).....	7
Figure I.5: Composantes du modele SWAT (Source: Laurant et al., 2007).....	10
Figure I.6: SIG et télédétection.....	13
Figure II.1: Localisation géographique du sous bassin versant de Saïda.....	14
Figure II.2: Modèle numérique du terrain et le réseau hydrographique de sous bassin versant Saïda.....	15
Figure II.3: Températures mensuelles moyennes, minimales et maximales à sous bassin versant de saïda.....	17
Figure II.4: Diagramme ombrothemique à sous bassin versant de saïda.....	18
Figure II.5: Quotient pluviométrique de station climatologiques utilisées sur le climatogramme d'EMBERGER.....	19
Figure II.6: Carte de la répartition des pentes du bassin versant étudié.....	20
Figure II.7 : Carte d'occupation du sol du sous bassin versant de saïda.....	21
Figure II.8: carte qui représente les types de sols du bassin versant.....	22
FigureIII.1: Hauteurs de précipitations pendant une durée de 24 ans.....	32
Fig III.2: Évolution temporelle du débit dans le bassin versant de Saïda.....	34
Figure III.3: Évolution temporelle du rendement en sédiments dans le bassin versant de Saïda.....	35
Fig III.4: Évolution temporelle du nitrate (NO ₃) dans le bassin versant de Saïda.....	37
Figure III.5: Évolution temporelle du phosphore (P) dans le bassin versant de Saïda.....	38

Liste des Tableaux

Tableau II 1: Caractéristiques des stations climatologiques.....	16
Tableau II.2 : Précipitations moyennes mensuelles du sous bassin versant de saida (1975-2015).....	16
Tableau II.3: Valeurs du quotient pluviométrique Q2.....	19
Tableau III.1: Hauteurs de précipitation durant l'année 1983 à 2006.....	32
Tableau III.2: Évolution temporelle du débit dans le bassin versant de Saïda.....	33
Tableau III.3: Évolution temporelle du rendement en sédiments dans le bassin versant de Saïda.....	35
Tableau III.4: Évolution temporelle du nitrate (NO ₃) dans le bassin versant de Saïda.....	36
Tableau III.4: Évolution temporelle du phosphore (P) dans le bassin versant de Saïda.....	38

Liste des abréviations

ArcSWAT : ArcGIS Soil and Water Assessment Tool

CN : Curve Number (Numéro de courbe – méthode SCS)

DEM : Digital Elevation Model (Modèle numérique d'élévation)

ETP : Évapotranspiration potentielle

ETR : Évapotranspiration réelle

FAO : Food and Agriculture Organization (Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture)

HRU : Hydrologic Response Unit (Unité de réponse hydrologique)

LULC : Land Use and Land Cover (Occupation et utilisation du sol)

NDVI : Normalized Difference Vegetation Index (Indice de végétation par différence normalisée)

NO₃⁻ : Nitrate

P : Phosphore

Q : Débit (m³/s)

SCS : Soil Conservation Service (Service de conservation des sols, USDA)

SIG : Système d'Information Géographique

SWAT : Soil and Water Assessment Tool

TSS : Total Suspended Solids (Matières en suspension totales)

USLE : Universal Soil Loss Equation (Équation universelle de perte en sol)

VHI : Vegetation Health Index (Indice de santé de la végétation)

Introduction générale

Introduction Générale

Actuellement, la raréfaction des ressources en eau et l'intensification des pressions anthropiques représentent des défis majeurs pour les systèmes agricoles, en particulier dans les zones arides et semi-arides. Le ruissellement, l'érosion et la perte des nutriments figurent parmi les problèmes environnementaux les plus préoccupants, car ils affectent directement la fertilité des sols, la productivité agricole et la durabilité des écosystèmes. En Algérie, les bassins versants agricoles connaissent une forte variabilité climatique marquée par des sécheresses récurrentes, une irrégularité des précipitations et une forte évapotranspiration. Ces conditions accentuent la dégradation des sols, la diminution des rendements agricoles et l'accroissement des risques liés à la pollution diffuse (Bakreti et al., 2013 ; Radjah, 2017 ; Saker, 2020).

Dans ce contexte, la gestion durable de l'eau et des sols est devenue une nécessité afin d'assurer la sécurité alimentaire et préserver les ressources naturelles. Les outils de modélisation hydrologique, tels que le Soil and Water Assessment Tool (SWAT), se présentent comme des approches scientifiques performantes permettant de simuler les processus hydrologiques, d'évaluer l'érosion et d'analyser le transport des nutriments dans les bassins versants. Ce modèle, largement utilisé à l'échelle internationale et nationale, constitue un appui stratégique pour l'élaboration de scénarios de gestion durable et l'aide à la décision.

Le sous-bassin versant de Saïda, situé dans une zone à climat semi-aride, illustre bien ces problématiques. Cette région est marquée par des précipitations faibles et irrégulières, une topographie contrastée et une forte pression agricole, qui accentuent les phénomènes de ruissellement et de perte des nutriments. L'application du modèle SWAT dans ce contexte vise à mieux comprendre la dynamique hydrologique et à évaluer l'impact des pratiques agricoles sur les ressources en eau et en sol.

Ainsi, le présent travail, intitulé « Application du modèle SWAT pour prédire le ruissellement agricole et la perte de nutriments dans une région semi-aride », a pour objectif principal de simuler et d'analyser les processus hydrologiques du sous-bassin versant de Saïda à l'aide du modèle SWAT. L'étude s'articule autour de trois (03) chapitres :

- Le premier chapitre constitue une synthèse bibliographique sur le cycle de l'eau, les processus hydrologiques, la modélisation avec SWAT ainsi que l'apport du SIG et de la télédétection.

- Le deuxième chapitre est consacré à la présentation de la zone d'étude, en mettant en évidence ses caractéristiques géographiques, climatiques, pédologiques et agricoles.
- Le troisième chapitre porte sur l'application du modèle ArcSWAT, la méthodologie adoptée, la simulation des processus hydrologiques et l'analyse des résultats obtenus en termes de ruissellement, de rendement en sédiments et de pertes en nutriments.

À l'issue de ce travail, des recommandations seront proposées pour améliorer la gestion des ressources agricoles, réduire les risques d'érosion et de pollution diffuse, et soutenir une exploitation durable et résiliente face aux changements climatiques.

Chapitre I:

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction

La modélisation hydrologique est un outil essentiel pour la gestion durable des bassins versants agricoles en particulier à simuler les processus hydrologiques, l'érosion et le transport des nutriments . Ce chapitre est une synthèse bibliographique sur la modélisation sol-eau avec le modèle SWAT qui constitue une aide précieuse pour planifier des stratégies de gestion intégrée à long terme des sols agricoles afin de garantir et de développer la production végétale.

I.1 Cycle de l'eau

I.1.1 Définition

Il désigne l'ensemble des acheminements de l'eau dans la nature en un circuit fermé. L'eau circule et se renouvelle dans la nature sous ses différents états physiques : liquide, solide et gazeux (**Makhlouf, 2015**).

I.1.2 Eléments du cycle de l'eau

Le cycle de l'eau n'a ni début ni fin, où l'eau circule continuellement entre ses différents états. Ce processus comprend plusieurs étapes essentielles (voir Fig. I.1) :

- **Évaporation** : Il s'agit du passage de l'eau de l'état liquide à l'état gazeux sous l'action de la chaleur. Ce phénomène se produit à partir des surfaces d'eau libre telles que les océans, les lacs, les rivières, ainsi que du sol (**Pare, 2006 in Bensaci et Bouzaine, 2018**). Egalement, en tenant compte de la transpiration végétale, on obtient donc l'évapotranspiration.
- **Précipitations** : Elles correspondent à toutes les eaux météorologiques qui atteignent le sol, qu'elles soient liquides (exemple: pluie ou la bruine) ou solides (neige, grésil, grêle) (**Bonnet et al., 1970 in Saad Allah, 2018**).
- **Infiltration** : Ce terme désigne le processus par lequel l'eau s'introduit dans le sol à partir de sa surface, pouvant atteindre les nappes souterraines profondes (**Roche, 1963**).
- **Ruissellement** : Il s'agit de l'écoulement de l'eau en surface, qui intervient lorsque le sol est saturé et ne peut plus absorber les précipitations (**Cosandey et Robinson, 2012**).

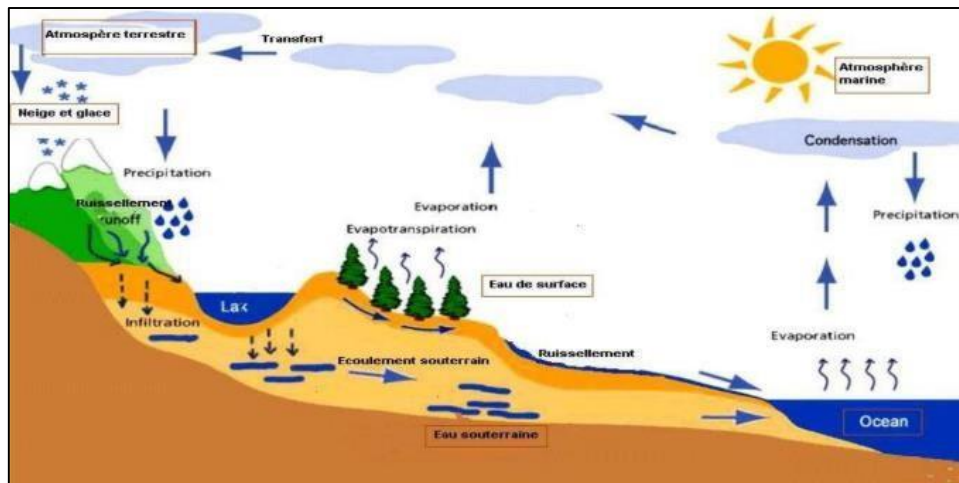


Figure I.1: Schémas du cycle de l'eau (Source : Makhlouf, 2015).

L'étude du cycle de l'eau et ses éléments se fait dans le bassin versant qui représente l'unité géographique où toutes les eaux de précipitation, ruissellement et infiltration sont drainées vers un point unique appelant l'exutoire. Le bassin versant est délimité par la topographie permettant de cerner l'ensemble des eaux météorologiques à l'intérieure du bassin (Derias et Toubal, 2013).

I.1.3 Cycle de l'eau en milieu semi-aride et aride

Le cycle hydrologique dans les zones arides et semi-arides est principalement marqué par la disponibilité limitée en ressources en eau, influencée par plusieurs facteurs majeurs :

✓ **Précipitations faibles et irrégulières:** Ces régions reçoivent généralement un cumul annuel de précipitations de moins de 400 mm. Leur répartition spatiale et temporelle est imprévisible et très variable, ce qui complique considérablement la planification et la gestion efficace des ressources hydriques (Nicholson, 2013).

✓ **Taux élevé d'évapotranspiration:** L'ensoleillement intense et les températures élevées favorisent une forte évaporation, réduisant de manière significative la quantité d'eau disponible pour les plantes et les systèmes naturels de stockage. Par conséquence, les espèces végétales développent des adaptations physiologiques, notamment des cycles de croissance alignés sur les périodes humides afin de minimiser les pertes hydriques (Lund et al., 2018).

✓ **Evènements hydrologiques courts mais intenses:** Ces événements, souvent brefs et localisés, engendrent un ruissellement rapide et important lors des rares averses intenses, provoquant une érosion accélérée des sols et la formation de ravines (Chaponnière, 2005 ; Lund et al., 2018).

✓ **Infiltration limitée** : En raison de la faible perméabilité des sols souvent dégradés et des précipitations insuffisantes, l'infiltration de l'eau reste très réduite, affectant négativement la recharge des nappes phréatiques.

✓ **Adaptation des pratiques agricoles**: Les stratégies culturales développées dans ces milieux incluent l'utilisation de techniques économes en eau telles que l'irrigation localisée (goutte à goutte) et la sélection de cultures résistantes à la sécheresse, permettant d'optimiser l'usage des ressources en eau disponibles (Morton, 2011).

I.2 Ruissellement

I.2.1 Types de ruissellement

Le ruissellement est généré par une combinaison de processus reposant sur la notion de capacité d'infiltration du sol. Selon la figure I.2, On distingue :

- ✓ **Ruissellement de surface (Hortonien)**, apparait lorsque l'intensité de la pluie dépasse la capacité maximale du sol à absorber l'eau (Musy et Higy, 1998).
- ✓ **Ruissellement souterrain**, après percolation, l'eau transite à travers l'aquifère pour rejoindre le cours d'eau souvent par le biais d'un phénomène de résurgence de la nappe (Musy et Higy, 1998).
- ✓ **Ruissellement de subsurface (hypodermique)**, apparait dans les couches peu profondes du sol, et se caractérise principalement par un mouvement latéral de l'eau suite à un processus d'infiltration (Musy et Higy, 1998).
- ✓ **Ruissellement sur surfaces saturées**, qui se produit lorsque la capacité du sol à stocker et à transmettre latéralement le flux de l'eau est épuisée. Par conséquent, l'eau va s'écouler en surface (Musy et Higy, 1998).

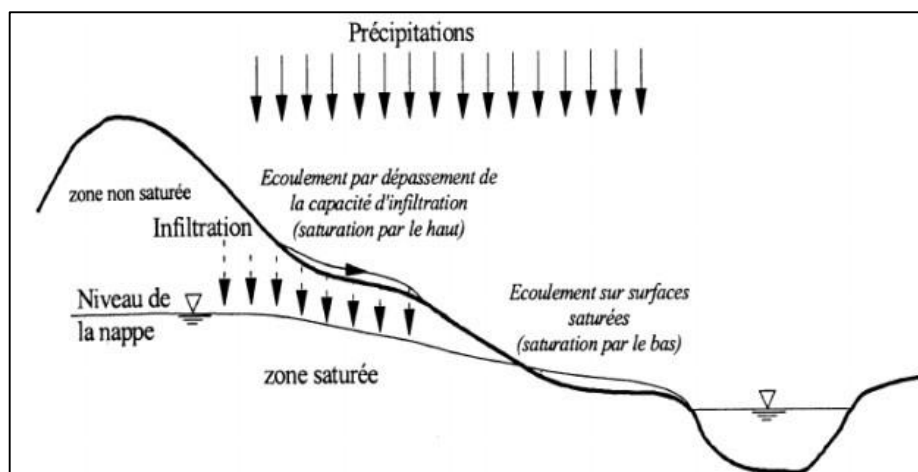


Figure I.2: Types de ruissellement de l'eau (Source: Musy et Higy, 1998)

I.2.2 Facteurs influençant sur le ruissellement de l'eau

Plusieurs paramètres affectent le ruissellement de l'eau sur la sol, à savoir:

- Etats de surface du sol comme la nature du sol , relief, et la couverture végétale.
- Humidité initiale du sol qui influencent la productivité des écoulements de l'eau.
- L'importance des précipitations.
- Les activités agricoles (pédologie, travail du sol, pente, choix des cultures)

I.3 Le sol

I.3.1 Définition du sol

Il représente la couche supérieure de l'écorce terrestre, souvent meuble, résultant de la transformation, la décomposition et l'altération de la roche mère au contact des processus climatiques, biologiques et physico-chimiques (**Touré, 2023**).

I.3.2 Composition du sol

Le sol est composé des éléments suivants:

- ✧ **Les minéraux** : Ils proviennent de la roche-mère par érosion et dégradation, formant des particules de tailles variées, comme le sable, le limon et l'argile.
- ✧ **La matière organique** : Il s'agit de débris végétaux et animaux en décomposition, qui forment l'humus. Cet humus enrichit le sol et le rend fertile pour la croissance des plantes.
- ✧ **L'eau** : Elle remplit les pores du sol, retenant les nutriments et étant indispensable à la vie.
- ✧ **L'air** : Il circule dans les interstices du sol et contient de l'azote, de l'oxygène et du dioxyde de carbone, essentiels à la respiration des micro-organismes et des racines des plantes.

La composition d'un sol définit les propriétés physiques et chimiques du sol, sa capacité à retenir l'eau, son aération, sa fertilité et, par conséquent, les types de plantes qu'il peut accueillir.

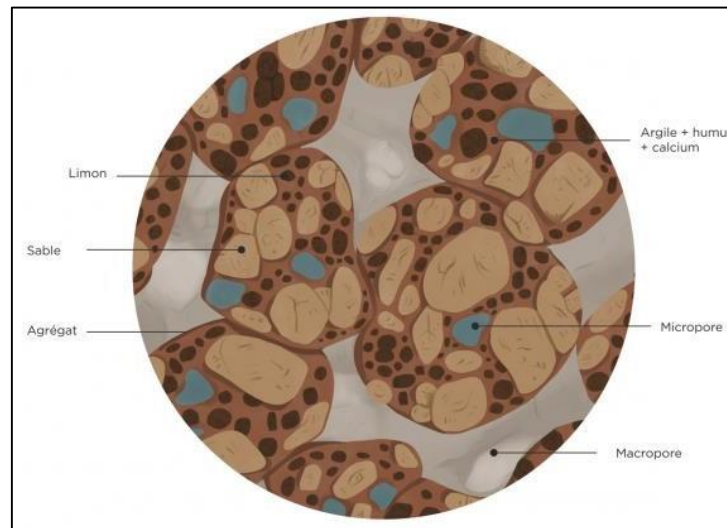


Figure I.3: Schémas de composition du sol (Source: <https://espacepouurlavie.ca/structure-du-sol>)

I.3.3 Structure du sol

Est le mode d'organisation des différentes particules de sable, de limon et d'argile entre elles. Les particules peuvent s'agréger de différentes façons, ce qui donne diverses structures de sol (mauvaise ou bonne). La structure du sol permet de renseigner sur la circulation de l'eau ou la perméabilité (FAO, 2025).

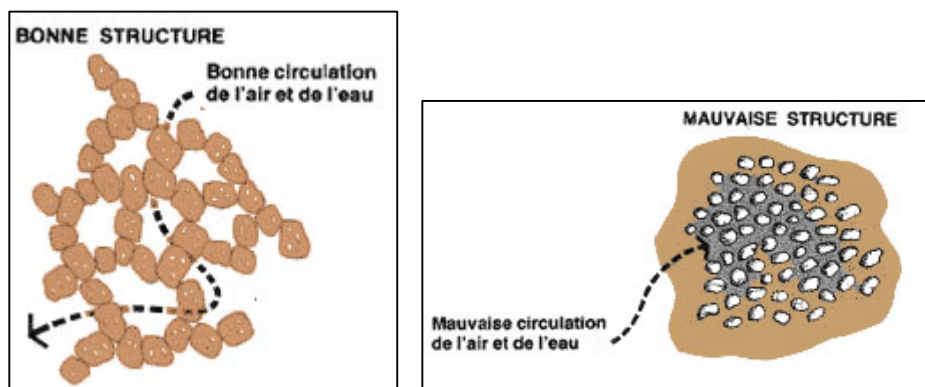


Figure I.4: Types de structure du sol (Source: FAO, 2025)

La formation d'agrégats stables, favorise une meilleure rétention des nutriments et une distribution homogène de l'eau, facilitant ainsi l'absorption des éléments nutritifs par les plantes. Une structure bien développée améliore également l'activité biologique du sol, ce qui contribue à la minéralisation de la matière organique et à la libération des nutriments (Zineb, 2018).

I.3.4 Impact du climat semi-aride sur le sol

Le climat semi-aride est caractérisé par une saison sèche la majeure partie du temps et par une saison humide. Ainsi, les précipitations moyenne annuelle sont comprises entre 200 et 400 mm avec une forte variabilité interannuelle (**Peel et al., 2007**).

Cependant, l'intensité de l'évapotranspiration, combinée à des périodes de sécheresse, contribue à la formation de croûtes superficielles sur les sols, ce qui limite l'infiltration de l'eau et accroît la salinisation, réduisant ainsi la capacité de rétention d'eau et la fertilité du sol. De plus, les sols des zones semi-arides sont particulièrement vulnérables à la dégradation physique, avec une perte de structure du sol et une compaction accrue, ce qui augmente le risque d'érosion (**Benali, 2016**).

Le climat semi-aride aggrave également la lixiviation des éléments nutritifs dans les sols par le lessivage des cations nutritifs tels que le potassium (K^+), le calcium (Ca^{2+}), et le magnésium (Mg^{2+}), ainsi que des éléments nutritifs comme le nitrate (NO_3^-) (**Sivakumar et Ndiang., 2007**). la lixiviation réduit ainsi la capacité du sol à retenir ces éléments essentiels pour la croissance des plantes et nécessite l'usage d'amendements et de fertilisants pour maintenir la productivité agricole (**Kherfi, 2018**).

I.4 Modélisation hydrologique

Est une figuration rapprochée des systèmes hydrologiques réels complexes, basée sur la représentation mathématique ou physique des processus hydrologique (**Ardoin, 2000**). la modélisation permet la simulation et la prévision d'un phénomène hydrologique pour des fins environnementale ou agricoles.

I.4.1 Définition du Modèle SWAT

Soil Water Assesment Tool (SWAT) est un modèle physique qui simule et prédire les flux d'eau, des nutriments, des pesticides et des sédiments à la surface du sol, dans la zone racinaire, dans la nappe souterraine et dans les cours d'eau (**Neitsch et al., 2002**). Ce modèle fonctionne à plusieurs échelles temporelle allant du pas de temps journalier jusqu'à plusieurs dizaines d'années. le modèle SWAT a été développé à l'USDA (Agricultural Research Service) et a été conçu pour des bassins versants de quelques centaines à plusieurs milliers de kilomètres carrés (**Arnold et al. 1998**).

Le modèle SWAT est semi-distribué; il combine des composantes globalisées et il prend en compte la variabilité spatiale pour assurer une représentation réaliste des processus naturels (**Thiebault, 2010**).

I.4.2 Composantes du modèle SWAT

Le modèle SWAT permet de simuler le ruissellement en intégrant des données climatiques, pédologiques et de couverture du sol (Fig I.4). Les précipitations constituent la principale source d'énergie entraînant les mouvements de l'eau à la surface et dans le sol, ainsi que le transport des nutriments et des sédiments. L'eau issue des précipitations est d'abord répartie entre ruissellement de surface et infiltration à l'aide de la méthode du numéro de courbe (Curve Number - CN), développée par le Soil Conservation Service (SCS). Cette méthode permet d'estimer le ruissellement de surface en fonction de l'usage des terres, du type de sol et de l'humidité initiale (**Bouderbala, 2019**).

L'unité spatiale de base aux calculs de SWAT est la HRU (Hydrologic Response Unit). Chaque unité de réponse hydrologique (HRU) est attribué à un CN, calculé en fonction du type de sol, de l'occupation du sol et des pratiques agricoles appliquées dans l'entité géographique. La valeur du CN est ensuite ajusté quotidiennement en tenant compte du numéro de courbe du jour précédent et du niveau d'humidité du sol (**Michaud et al., 2006 in Ben Salah Chaabane, 2017**). Le modèle SWAT suppose que chaque HRU présente un comportement agro-hydrologique homogène. Les transferts estimés pour chaque HRU sont alors sommés par sous bassin de manière à obtenir un transfert global transmis entre les sous bassins. Les données d'entrée sont donc spatialisées: la topographie, la météorologie, les sols. L'occupation du sol. Le modèle combine à ces données spatialisées des données descriptives comme les pratiques agricoles associées aux successions culturales pour estimer les transferts hors de la zone racinaire (en surface ou en profondeur), dans les nappes et les cours d'eau (**Michaud et al., 2006 in Ben Salah Chaabane, 2017**).

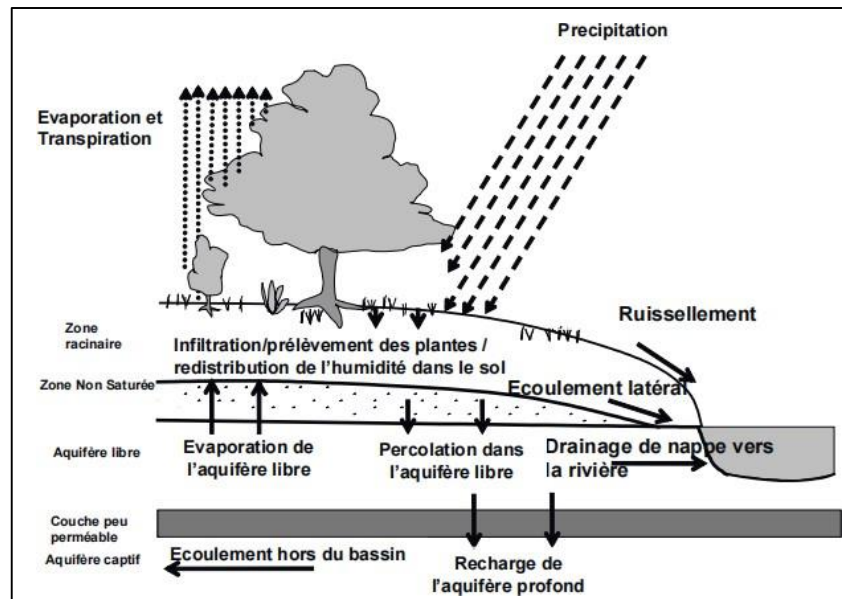


Figure I.4: Composantes du modèle SWAT (Source: Laurant et al., 2007)

I.4.3 Exemples d'application du modèle SWAT pour la prédiction du ruissellement agricole

Le modèle SWAT a été appliquée avec succès dans plusieurs études en Algérie pour prédire le ruissellement agricole et évaluer l'impact des pratiques de gestion des terres dans un contexte d'un climat semi-aride. Nous citons quelques exemples; une étude menée sur le bassin versant de Bouhamdane par (Saker 2020) pour simuler le processus pluie-débit par le modèle SWAT. Les résultats ont montré que les événements de fortes précipitations entraînaient des pics de ruissellement significatifs, mettant en évidence la sensibilité du bassin aux variations pluviométriques. Une autre étude faite par (Radjah 2017) dans le bassin versant de Chélif, l'application du modèle SWAT a permis d'évaluer l'effet de différentes pratiques de gestion des terres sur le ruissellement. Les résultats ont indiqué que l'augmentation de la couverture végétale, notamment par l'implantation de cultures pérennes, réduisait le ruissellement de surface et améliorait l'infiltration de l'eau.

I.4.4 Etapes de modélisation par SWAT

La modélisation par SWAT est effectuée en deux (02) étapes: calibration et validation. Elles permettent de vérifier la capacité du modèle à reproduire les conditions réelles par la précision et la fiabilité des simulations hydrologiques.

a. Calibration : Elle consiste à ajuster les paramètres du modèle pour que les sorties simulées. Les résultats trouvés correspondent le plus possible aux données observées. Cette étape est cruciale pour réduire les incertitudes et améliorer la précision des simulations.

b. Validation : Après la calibration, la validation teste la performance du modèle sur un ensemble de données indépendant. Cela permet de vérifier que le modèle peut prédire avec précision les conditions hydrologiques sans ajustements supplémentaires.

I.4.5 Indicateurs d'évaluation

Pour évaluer la performance du modèle SWAT lors de la calibration et de la validation, plusieurs indicateurs statistiques sont couramment utilisés :

a. Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)

Il mesure la capacité du modèle à prédire les valeurs observées. Une valeur proche de 1 indique une bonne performance.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - \bar{X}_{obs})^2} \dots\dots\dots(1)$$

Avec:

$X_{obs,i}$: valeur observé à la date i

$X_{sim,i}$: valeur simulée à la date i

\bar{X}_{obs} = moyenne des valeurs observés

n = nombre total d'observations

b. Coefficient de détermination (R^2)

Il Indique la proportion de la variance des observations expliquée par le modèle. Une valeur élevée (proche de 1) suggère une forte corrélation entre les données simulées et observées.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - \bar{X}_{obs})(X_{sim,i} - \bar{X}_{sim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - \bar{X}_{obs})^2 \sum_{i=1}^n (X_{sim,i} - \bar{X}_{sim})^2}} \right)^2 \dots\dots\dots(2)$$

Avec:

$X_{obs,i}$: valeur observée à l'instant i .

$X_{sim,i}$: valeur simulée à l'instant i .

\bar{X}_{obs} : moyenne des valeurs observées.

\bar{X}_{sim} : moyenne des valeurs simulées.

n : nombre total d'observations.

c. Pourcentage de biais (PBIAS)

Il Évalue la tendance du modèle à surestimer ou sous-estimer les observations. Une valeur proche de 0% indique un bon ajustement.

$$\text{PBIAS} = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{sim,i})}{\sum_{i=1}^n X_{obs,i}} \dots\dots\dots (3)$$

Avec:

$X_{obs,i}$: valeur observée à l'instant i .

$X_{sim,i}$: valeur simulée à l'instant i .

n : nombre total d'observations.

d. Root Mean Square Error (RMSE)

Il Mesure la moyenne des écarts quadratiques entre les valeurs simulées et observées. Une valeur plus faible indique une meilleure précision du modèle.(Soufyane, 2017)

$$\text{RMSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{sim,i} - X_{obs,i})^2 \dots\dots\dots (4)$$

Avec:

$X_{obs,i}$: valeur observée à l'instant i .

$X_{sim,i}$: valeur simulée à l'instant i .

n : nombre total d'observations.

I.5 SIG et télédétection

I.5.1 Définition

Le système d'information géographique (SIG) est un ensemble d'opérations structuré , le plus souvent informatisées, ayant pour objectif de représenter et d'exploiter des données géographiques sur un territoire donné. Ce système vise à intégrer de manière optimale diverses sources d'information (bases de données, expertises, capacités de traitement) (Caloz et Collet, 2011).

La télédétection est une discipline scientifique regroupant l'ensemble des techniques permettant l'acquisition et le traitement à distance d'informations issues du rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi par tout objet présent à la surface terrestre (Caloz et Collet, 2001 ; Caloz, 2006 ; Guillet, 1991 ; Kergomard, 1990).

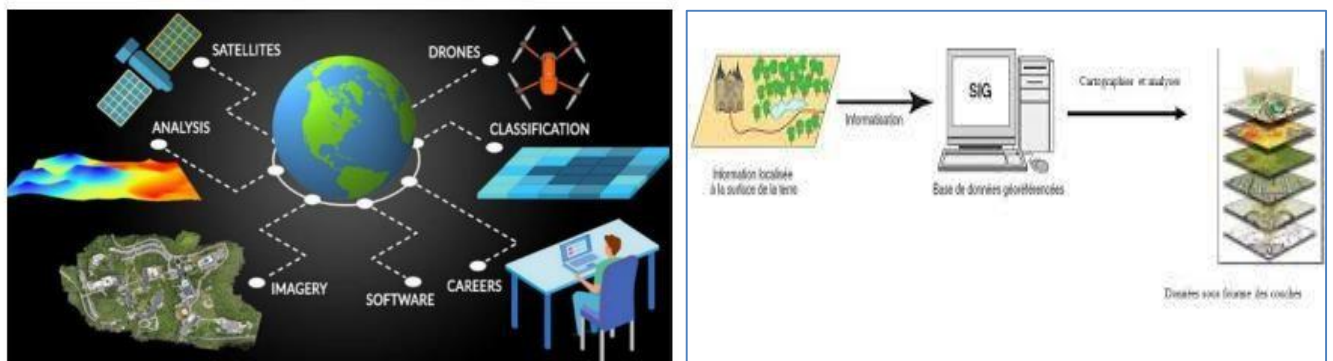


Figure I.5: SIG et télédétection

I.5.2 Apport combiné de la télédétection et du SIG

Le SIG et la télédétection sont des outils complémentaires pour analyser la surface terrestre permettant une meilleure compréhension des phénomènes naturels. La télédétection capte des informations à distance via des satellites ou avions, tandis que le SIG intègre les images satellites aux données exogènes pour le traitement, la modélisation et la synthèse gère et visualise des données géographiques.

Cette intégration SIG–télédétection permet également la modélisation de scénarios d'évolution future des terres agricoles, en tenant compte de facteurs climatiques ou socio-économiques (Djellouli,2020)

Chapitre II:

PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

Introduction

Une compréhension approfondie du milieu physique de la zone d'étude constitue un élément clé pour mieux appréhender le phénomène analysé et interpréter de manière pertinente les résultats obtenus. Ce chapitre propose une synthèse des principales caractéristiques du sous bassin versant de Saïda, en abordant ses aspects géographiques, hydrographiques, climatiques, géologiques et l'occupation du sol.

II.1 Localisation géographique

Le sous bassin versant de Saïda se présente comme un bassin montagneux dominé. Il s'étend dans les Monts de Daïa et les Mont de Saïda, au Sud comme à l'Est, par les hautes crêtes séparant de grand bassin du Cheliff. Au Nord et à l'Ouest, par le Djebel Abdelkrim (1203m) et à l'Est par Djebel de Guemroud (1157 m), dans les prolongements des Monts de Saïda. (Fig II.1). Le sous bassin, présentant une forme circulaire légèrement allongée, est orienté vers le Nord géographique. La sous basin de Saïda est localisé entre les latitudes 34°52' N et entre les longitudes 0°00' et 0°09'E. Il couvre une superficie globale de 621,20 Km² pour un périmètre de 131,2 Km (Khaldi, 2005)

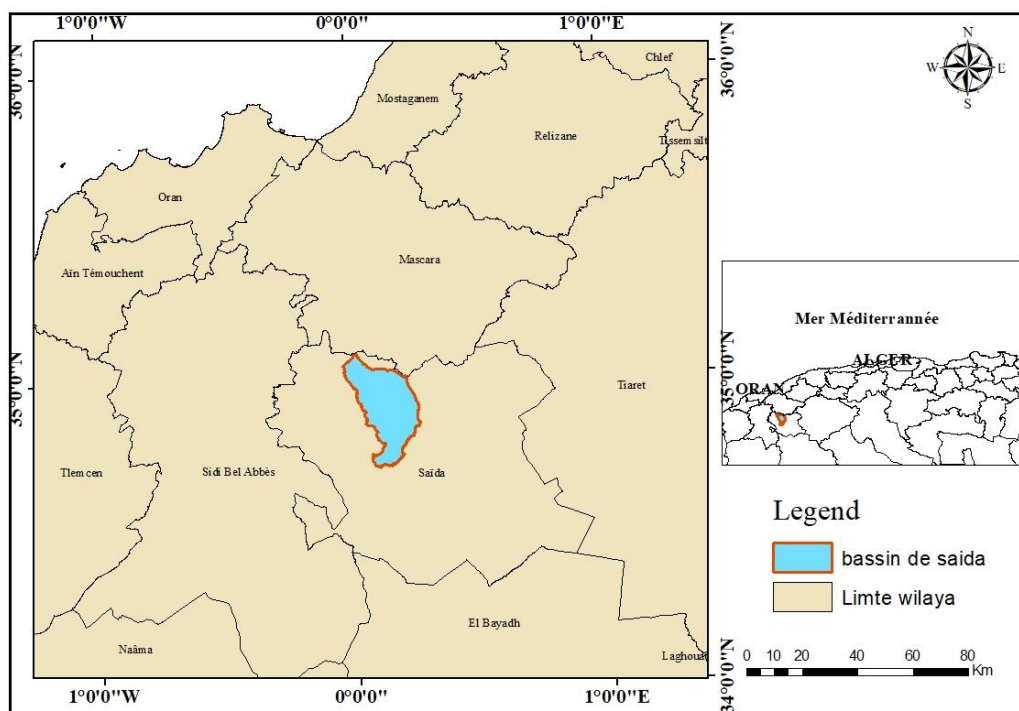


Figure II.1: Localisation géographique du sous bassin versant de Saïda

II.2 Relief

Le sous-bassin versant de Saïda, bien que faisant partie de la wilaya de Saïda, possède une topographie distincte et diversifiée qui influence directement son régime hydrologique. Comme une zone de transition, il est caractérisé par un relief très contrasté (fig II.2). Le nord et le nord-est du bassin sont dominés par les montagnes des monts de Daïa, où les altitudes culminent à environ 1250 m. C'est dans cette partie escarpée que le réseau hydrographique, drainé par l'Oued Saïda, prend sa source. En contraste, les altitudes diminuent progressivement vers les vastes plaines du sud-ouest, où elles atteignent un minimum d'environ 501 m. Ce passage des zones montagneuses aux plaines crée un paysage varié et un profil de pente qui favorise le ruissellement et le transport solide. (Yles et al., 2014)

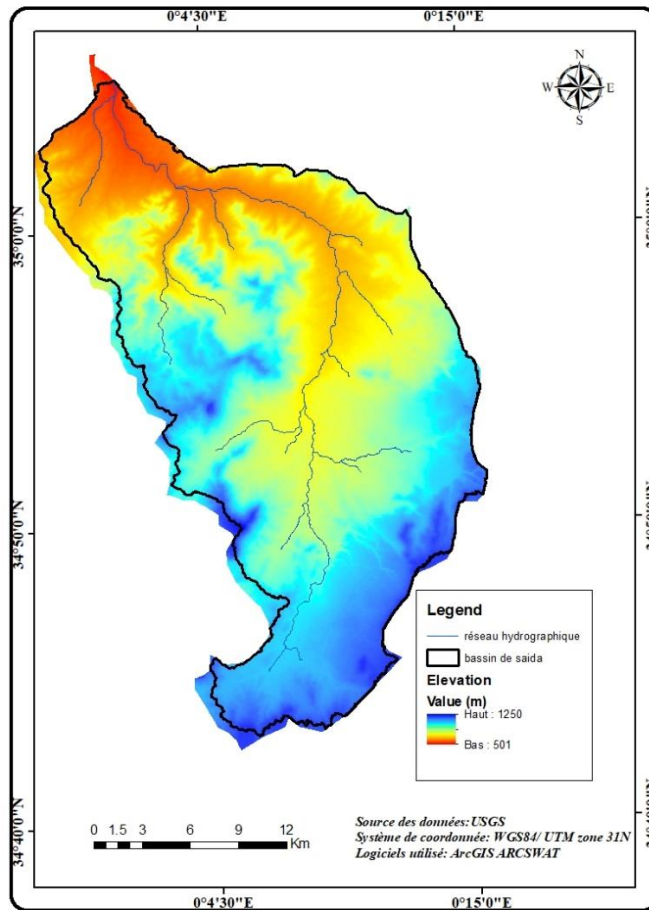


Figure II.2: Modèle numérique du terrain et le réseau hydrographique de sous bassin versant Saïda

II.3 Etude climatique

II.3.1 Données climatiques de la station météo de bassin versant

Le bassin versant de Saïda est influencé par la diversité de son relief et sa position au sein des Hauts Plateaux occidentaux. Afin d'identifier son régime climatique, station climatologique ont été utilisée. Leurs localisations géographiques ainsi que leurs principales caractéristiques climatiques sont présentées dans le tableau II.1

Tableau II 1: Caractéristiques des stations climatologiques

Nom	Coordonnées			Année de mise en service	Période d'observation
	Lat. (°)	Long. (°)	Z (m)		
SBV de Saida	34°52 N	00°09 E	750	1977	1977-2015

Avec :

Lat. : latitude, **Long.** : Longitude et **Z** : Altitude.

II.3.2 Précipitations

C'est un facteur essentiel dans la caractérisation du régime climatique du bassin versant de Saïda. Les données climatiques utilisées dans cette étude proviennent de la station climatologique de Saïda, dont la localisation et les principales caractéristiques sont présentées dans le Tableau II.2

L'analyse des données de cette station montre que les précipitations moyennes annuelles enregistrées atteignent environ 345,4 mm, ce qui correspond à un climat semi-aride ($200 \text{ mm} < P < 400 \text{ mm}$). Ce régime pluviométrique influence directement la disponibilité en eau, ainsi que les processus hydrologiques au sein du bassin versant de Saïda.

Tableau II.2 : Précipitations moyennes mensuelles du sous bassin versant de saida (1975-2015):

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	annuel
P(mm)	23,0	42,3	45,1	37,2	40,5	37,6	39,6	37,7	29,9	11,6	5,4	8,4	358,2

II.3.3 Température

La température est un paramètre incontournable ayant un impact considérable sur le climat, car elle intervient dans l'estimation du bilan hydrologique, en complément des précipitations. Dans le cadre de cette étude, les données de température utilisées proviennent de la station climatologique de Saïda. La figure II.3 présente les températures mensuelles minimales, moyennes et maximales enregistrées à cette station. Ces données ont été fournies par les services de l'Office National de Météorologie (O.N.M) d'Alger.

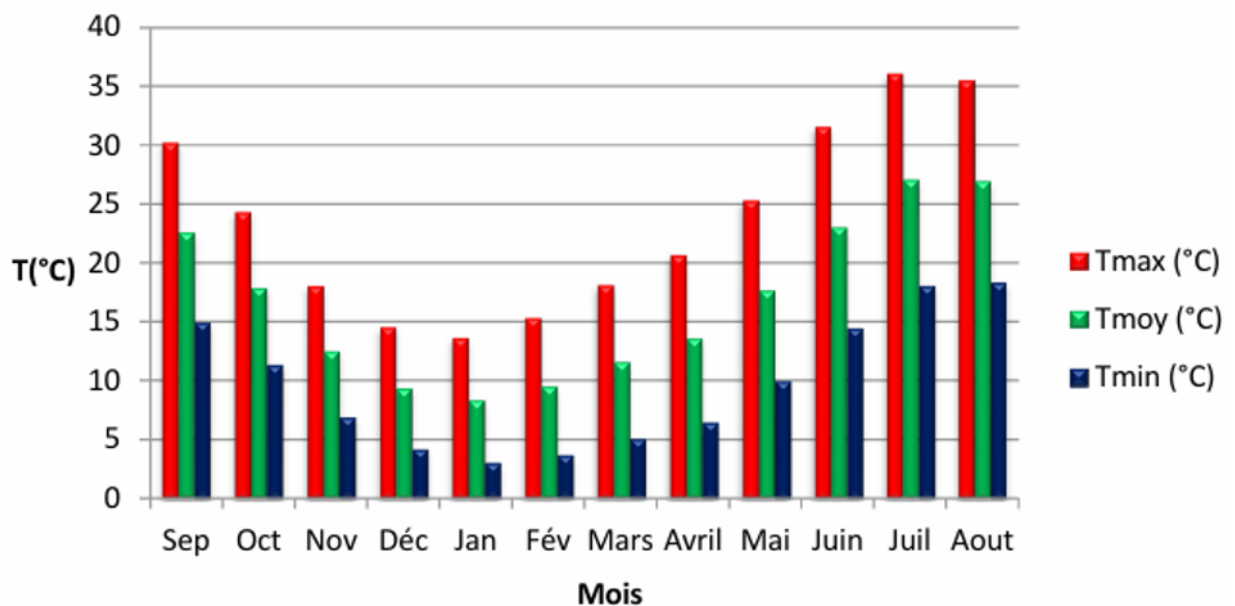


Figure II.3: Températures mensuelles moyennes, minimales et maximales à sous bassin versant de saïda.

Selon la figure II.3, la température moyenne minimale à la station de Saïda s'abaisse jusqu'à 3,1°C au mois le plus froid (Janvier), alors que la température moyenne maximale augmente jusqu'à 36,1 °C pendant les mois les plus chauds (Juillet, Aout).

II.3.4 Diagramme ombrothermique de Gaussen et Bagnouls

Le diagramme ombrothermique de Gaussen et Bagnouls permet de visualiser la durée et l'intensité des saisons sèches, en analysant la position relative de la courbe des températures moyennes par rapport à celle des précipitations (Hadj-Said, 2008). Un mois est considéré comme sec lorsque la moyenne des précipitations mensuelles, exprimée en millimètres, est inférieure ou égale au double de la température moyenne du même mois ($P \leq 2T$) (Hadj-Said, 2008). Le

diagramme ombrothermique établi à partir des données de la station climatologique de Saïda est présenté dans la figure II.4.

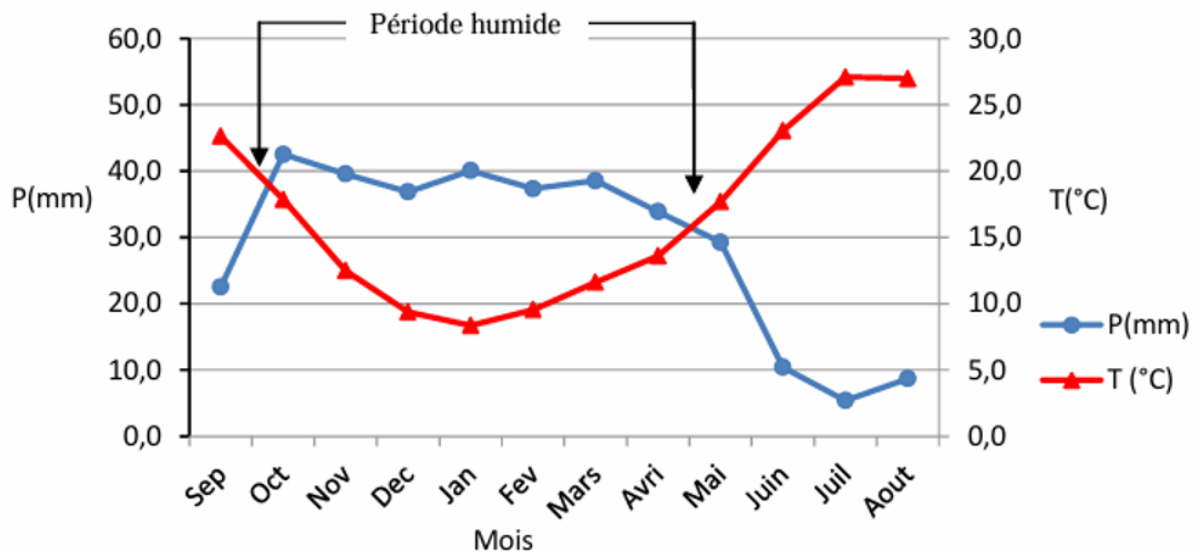


Figure II.4: Diagramme ombrothermique à sous bassin versant de saïda

L'analyse de figure II.4 montre :

- L'existence de deux périodes au cours de l'année, une période déficitaire caractérisée par des températures élevées et des précipitations minimales et une autre période humide traduite par l'abondance des précipitations.
- la période humide est de sept (07) mois (du mois d'Octobre jusqu'au mois d'Avril).

II.3.5 Climatogramme d'EMMBERGER (Q2)

Le quotient pluviothermique "Q2" d'EMMBERGER est une expression synthétique du climat méditerranéen en tenant compte de la moyenne annuelle des précipitations et des températures (maximale et minimale) (Gouaidia, 2008).

Q2 est calculé par la relation suivante :

P : Précipitation moyenne annuelle (mm).

M : Moyenne des maxima du mois le plus chaud en ° Kelvin (°K).

m : Moyenne des minima du mois le plus froid en ° Kelvin (°K).

Les résultats de calcul du quotient pluviométrique Q2 de station climatologiques sont donnés au tableau II.3

Tableau II.3: Valeurs du quotient pluviométrique Q2

Nom de la station	P (mm)	M (°K)	m (°K)	m (°C)	Q2
SBV DE Saida	345,4	309,2	276,2	3,1	35,8

Les valeurs de Q2 et la moyenne des minima m du mois le plus froid ainsi obtenus sont en suite portées sur le climatogramme d'EMMBERGER (Figure II.5).

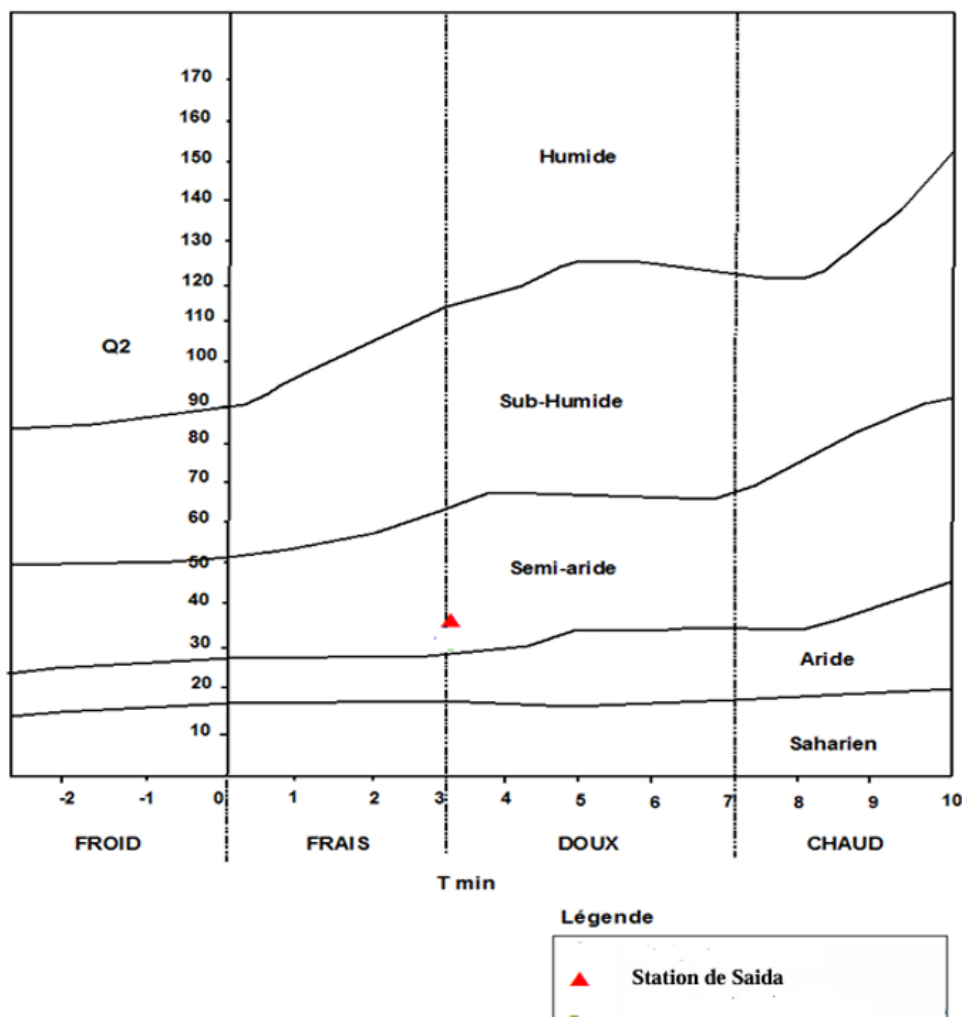


Figure II.5: Quotient pluviométrique de stations climatologiques utilisées sur le climatogramme d'EMMBERGER

D'après la figure II.5, les stations climatologiques sont situées dans l'étage bioclimatique semi-aride à la limite frais et doux.

II.4 la pente terrestre de bassin versant de saïda

Dans le bassin versant de Saïda, la pente terrestre est une caractéristique physiographique majeure qui influence fortement les processus hydrologiques et d'érosion. La figure II.6 suivante montre que le bassin de Saïda se caractérise par une topographie variée avec une distinction claire entre ses parties nord et sud. La grande majorité du bassin, couvrant les zones centrales et sud (colorées en jaune sur la carte), présente une pente douce inférieure à 25 %. En revanche, la partie nord du bassin est beaucoup plus accidentée. Elle montre une concentration de zones avec des pentes fortes à très fortes, allant de 25 % à plus de 75 % (indiquées en violet, rouge et bleu). Ces zones escarpées sont à l'origine des principaux cours d'eau du bassin versant et sont particulièrement sujettes à l'érosion et aux glissements de terrain. Le contraste marqué de la pente est une caractéristique déterminante de la géomorphologie du bassin, influençant directement le ruissellement de l'eau et la formation de son réseau hydrographique.

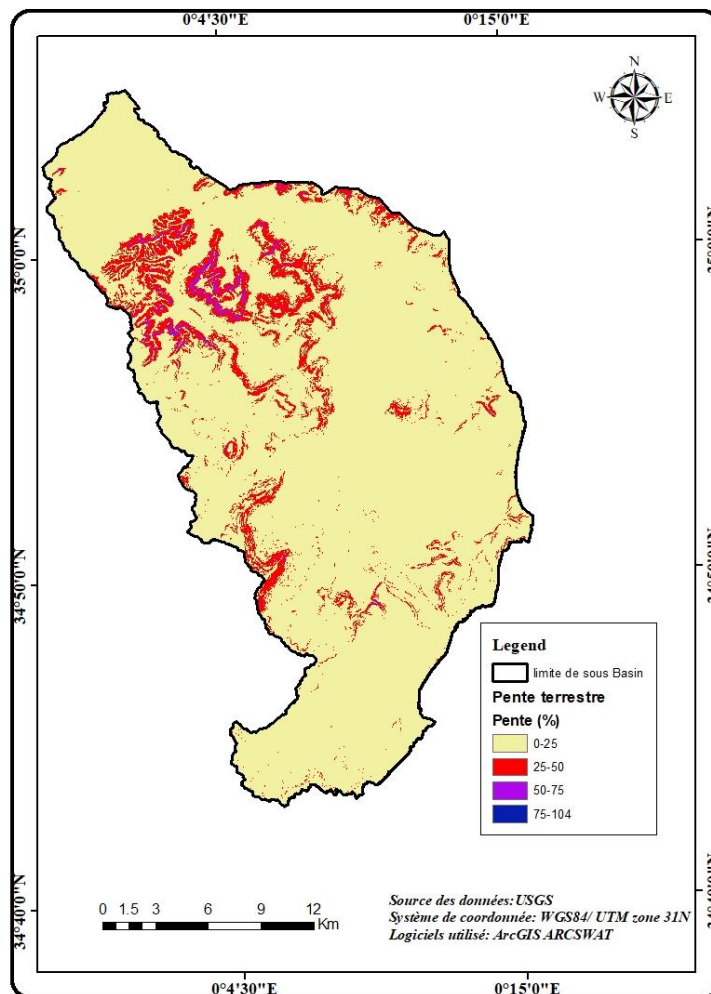


Figure II.6: Carte de la répartition des pentes du bassin versant étudié

II.5 Occupation du sol

La carte d'occupation des sols (Fig II.7) est une répartition spatiale des différentes formes de couverture terrestre qui est directement influencée par son relief et son climat. Elle a été établie par télédétection en utilisant le logiciel « Arc Gis 10.3 », selon les étapes suivantes :

- Acquisition des images satellitaires de la région de sous bassin versant de saida par le capteur LANDSAT, avec une résolution de 30 m.
- Extraction de la zone d'étude.
- Une classification non supervisée est établie.

Cette carte d'occupation du sol illustre Cette représentation cartographique met en évidence une mosaïque de formations, dont la prédominance des zones de sol de pâturage (en beige) qui reflète le caractère semi-aride de la région. On note également une concentration de forêts (en vert) dans les zones d'altitude, au nord du bassin, là où les conditions climatiques et l'humidité sont plus favorables.

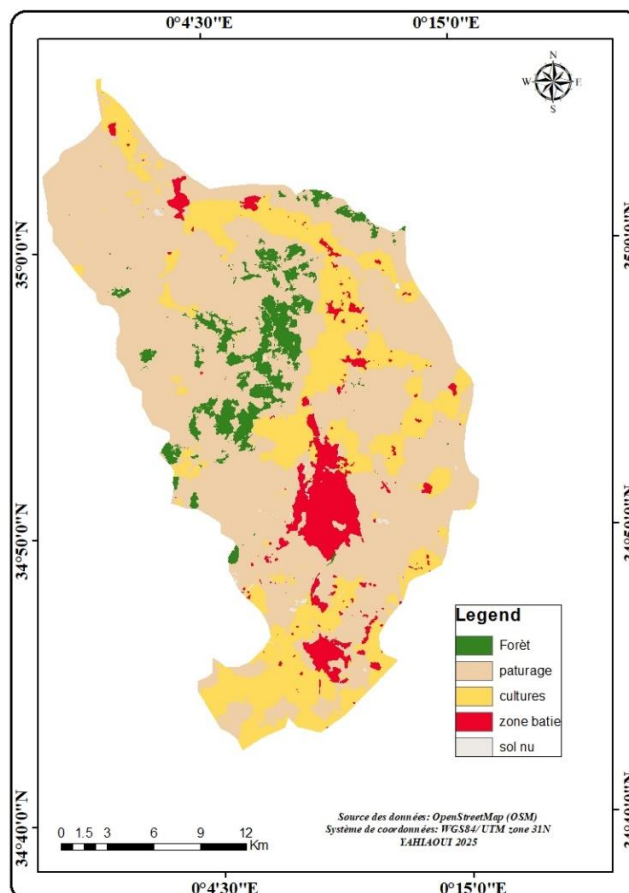


Figure II.7 : Carte d'occupation du sol du sous bassin versant de saida

La couverture végétale est d'une importance capitale, car elle réduit considérablement l'énergie cinétique des gouttes de pluie et ralentit le flux de ruissellement, minimisant ainsi les

perdes de sol. Malheureusement, la dégradation du couvert végétal due à des facteurs climatiques et anthropiques est un problème sérieux dans la région, contribuant à l'envasement du barrage d'Ouizert et à la perte de terres fertiles (Kazi-Tani et al., 2016). Les formations forestières dégradées et des parcours steppiques soumis au surpâturage reflète une forte pression anthropique, accentuant les risques de ruissellement et d'érosion hydrique (Yles et al., 2014). Les terres cultivées (en jaune) sont disséminées dans les plaines et les vallées, traduisant les efforts agricoles concentrés là où les ressources en eau sont accessibles. La zone bâtie (en rouge), qui correspond principalement à l'agglomération de la ville de Saïda, forme un noyau urbain central, tandis que le reste du territoire est majoritairement occupé par des activités pastorales et des terres dénudées.

II.6 Type de Sol

Dans le sous-bassin versant de Saïda, la nature du sol est un facteur essentiel influençant les phénomènes hydrologiques et l'utilisation des terres. La cartographie pédologique de la région révèle la prédominance de deux types de sols (fig II.8) (Yles et al., 2014)

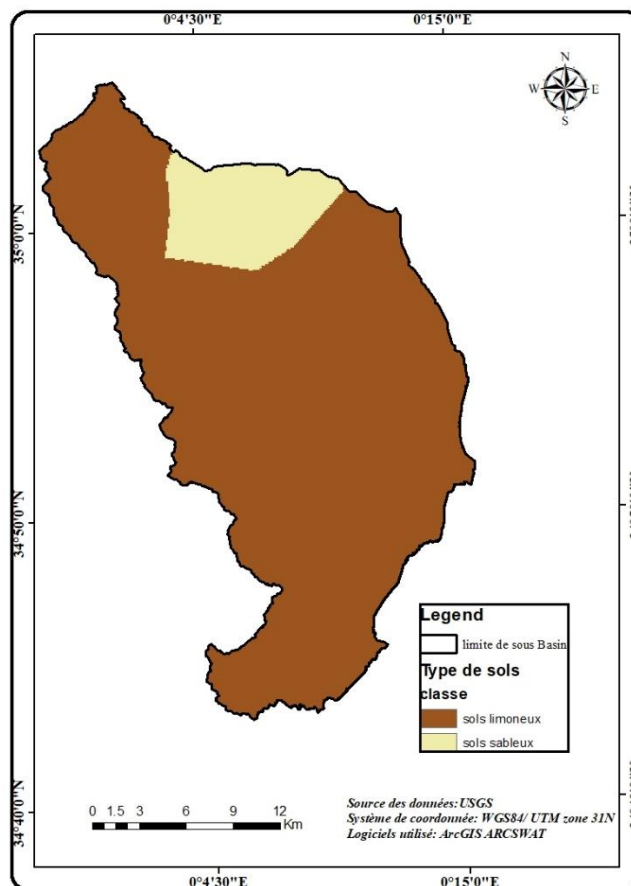


Figure II.8: carte qui représente les types de sols du bassin versant

Le type des sols dans le sous-bassin versant de Saïda est le résultat de plusieurs facteurs naturels, notamment la topographie, le climat et la composition des dépôts sédimentaires. La carte des sols du bassin, issue de données de l'USGS, révèle deux types de sols dominants. Les sols limoneux à limono-argileux, qui couvrent la majorité du territoire, sont prédominants dans les vastes zones de plaines et les cuvettes, là où les sédiments fins se sont accumulés. En revanche, les sols sableux à limoneux-sableux sont principalement localisés dans la partie nord du bassin, une zone qui correspond aux reliefs plus escarpés et aux montagnes. Cette répartition spatiale des sols influence directement les pratiques agricoles et la gestion de l'eau dans le bassin. La diversité de ces sols témoigne de l'influence combinée du climat aride et de la géomorphologie, qui façonnent la nature des formations pédologiques.

II.7 L'agriculture

Comme la région d'étude est une zone steppique, les terres agricoles du sous bassin versant de Saida sont cultivées par les grandes cultures céréalières (blé, orge) ainsi que des cultures maraîchères et arboricoles (olivier, amandier)

L'agriculture du sous-bassin versant de Saïda est caractérisée par :

- Prédominance des cultures de céréales et de l'élevage : L'économie agricole locale est principalement basée sur le couple céréaliculture-élevage ovin . Le blé dur, le blé tendre et l'orge sont les principales cultures.
- Agriculture pluviale : L'agriculture dans la région est presque entièrement dépendante des précipitations. L'irrigation est très limitée en raison du climat semi-aride et du manque de ressources en eau.(Bouanani et Yles, 2016)

Chapitre III:

APPLICATION DU MODELE ARCSWAT

Chapitre III: Application du modèle ArcSwat

III.1. Choix de la zone d'étude

Le choix du sous-bassin versant de Saïda s'explique par son importance hydrologique et environnementale au sein du bassin de la Macta, dans le Nord-Ouest de l'Algérie. Ce bassin occupe une superficie d'environ 1 152 km² et constitue une zone stratégique pour l'approvisionnement en eau de la région. Il présente une grande hétérogénéité topographique, allant de 500 m d'altitude dans les plaines du nord jusqu'à plus de 1 200 m dans les reliefs méridionaux.

La diversité des sols (principalement de type Lyme et Lyman) et l'occupation des terres (céréales, maraîchage, olivier, steppes pastorales et formations forestières dégradées) en font un terrain d'étude pertinent pour analyser l'impact des pratiques agricoles et de l'érosion hydrique. De plus, le sous-bassin de Saïda est soumis à un climat semi-aride marqué par une forte variabilité interannuelle des précipitations, ce qui accentue les problèmes de ruissellement, de crues rapides et de dégradation des ressources naturelles.

L'ensemble de ces caractéristiques justifie l'utilisation du modèle ArcSWAT pour simuler les processus hydrologiques et évaluer la réponse du bassin aux différents scénarios de gestion des terres.

III.2. Méthodologie

La méthodologie adoptée s'appuie sur l'utilisation du modèle ArcSWAT intégré à un SIG. Elle comprend la délimitation du bassin versant de Saïda, la définition des unités de réponse hydrologique (HRU) à partir des données de sol, de pente et d'occupation des terres, ainsi que l'intégration des données climatiques et hydrologiques. Le modèle a été ensuite exécuté pour simuler les écoulements, puis évalué à l'aide d'indicateurs statistiques afin de valider sa performance.

III.3 Données et outils utilisés

III.3.1 Données d'entrée

Dans cette étude, nous avons mobilisé les données nécessaires au fonctionnement du modèle ArcSWAT appliqué au sous-bassin versant de Saïda. Un modèle numérique de terrain (MNT) à une résolution de 30 m a été utilisé pour la délimitation du bassin et l'extraction des caractéristiques topographiques (altitude, pentes, réseau hydrographique). Les données d'occupation des sols proviennent des cartes d'utilisation des terres, permettant de distinguer les

principales classes : cultures céréalières, oliveraies, parcours steppiques, zones forestières dégradées et espaces urbains. Les données pédologiques décrivent les types de sols dominants (Lyme et Lyman) ainsi que leurs propriétés physiques et hydrologiques.

Les données climatiques (précipitations, températures maximales et minimales, humidité relative, rayonnement solaire, vitesse du vent) ont été collectées auprès de la station météorologique de Saïda et complétées, le cas échéant, par des bases de données climatiques régionales. Enfin, les débits observés à l'exutoire du bassin ont été utilisés pour la calibration et la validation du modèle.

III.3.2 ArcSWAT

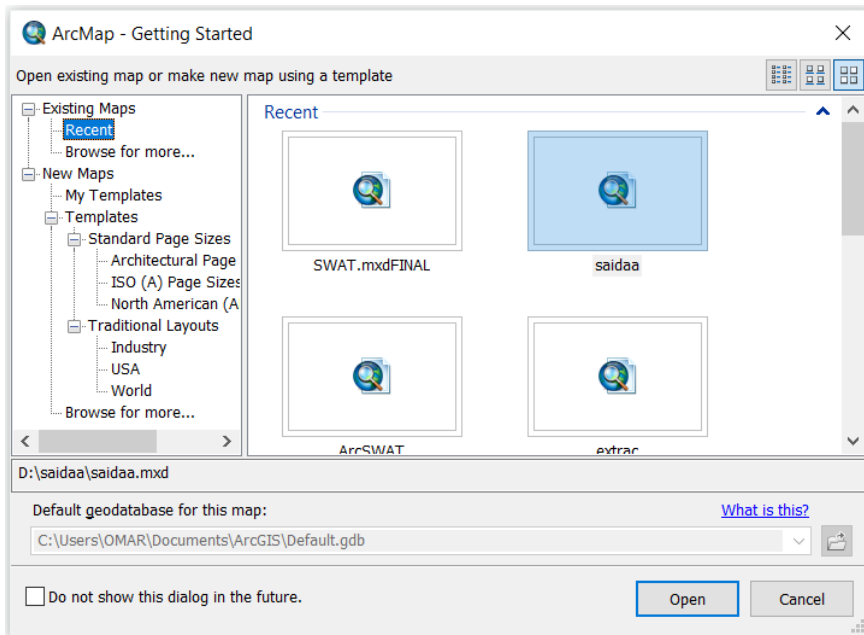
ArcSWAT est une extension pour le logiciel ArcGIS qui facilite l'application du modèle hydrologique SWAT (Soil and Water Assessment Tool) en intégrant ses fonctionnalités dans un environnement SIG (Système d'Information Géographique). Il permet aux chercheurs et aux ingénieurs d'étudier des bassins versants en combinant des données spatiales (Modèle Numérique de Terrain, cartes d'utilisation des sols, types de sols) et des données de terrain (pluviométrie, débits). En Algérie, l'utilisation d'ArcSWAT est répandue dans les études sur la gestion des ressources en eau, la prédiction de l'érosion hydrique et l'envasement des barrages, particulièrement dans les régions semi-arides. Le programme aide à simuler divers processus hydrologiques et de transport de sédiments, ce qui est crucial pour la prise de décision en matière d'aménagement du territoire et de conservation des sols. (Touati, 2010)

III.4 Mise en place du projet ArcSWAT

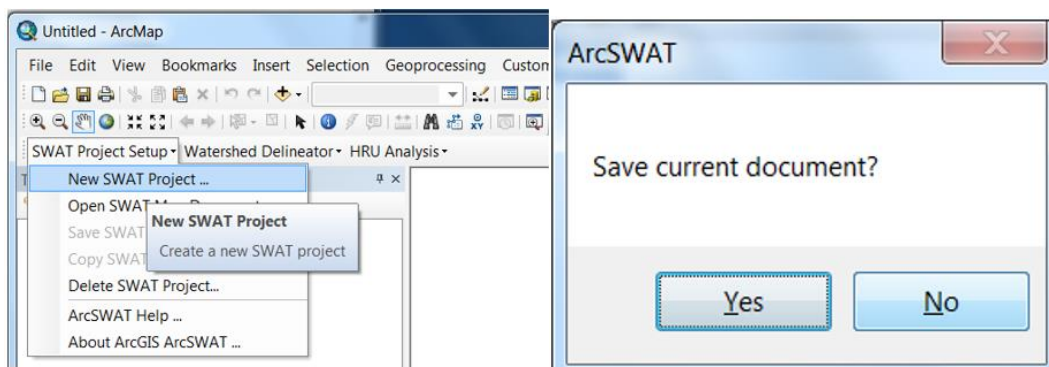
Lancer ArcGIS:

Démarrer → Tous les programmes → dans le dossier ArcGIS → cliquer sur ArcMap 10.x.

Cliquer sur « Annuler » lorsque la fenêtre *ArcMap – Démarrage* s'affiche.




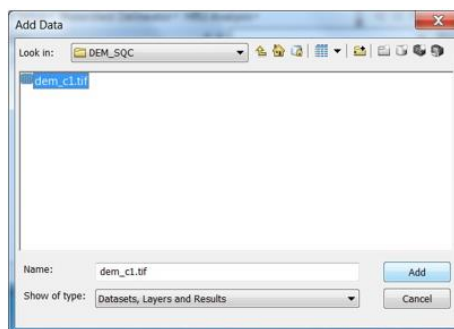
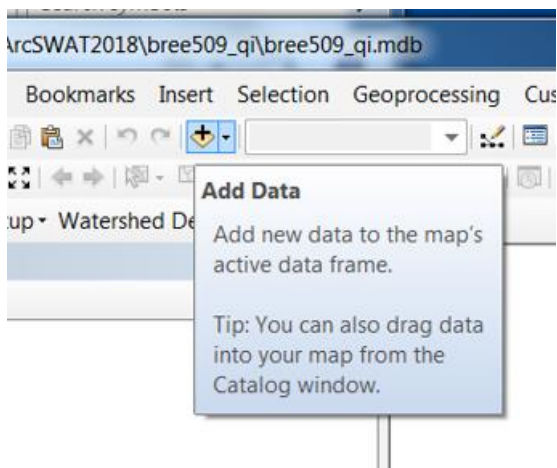
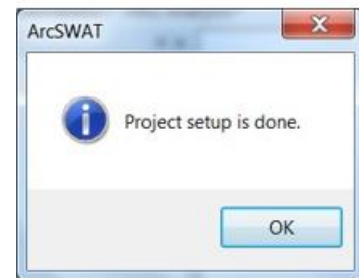
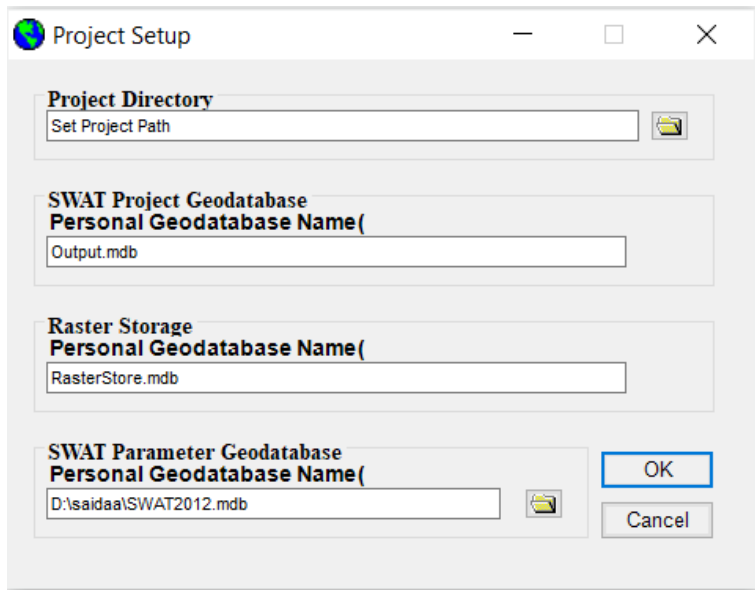
- Cliquer sur « SWAT Project Setup » → « New SWAT Project » ;
À la question « Save current document ? » sélectionner « No ».



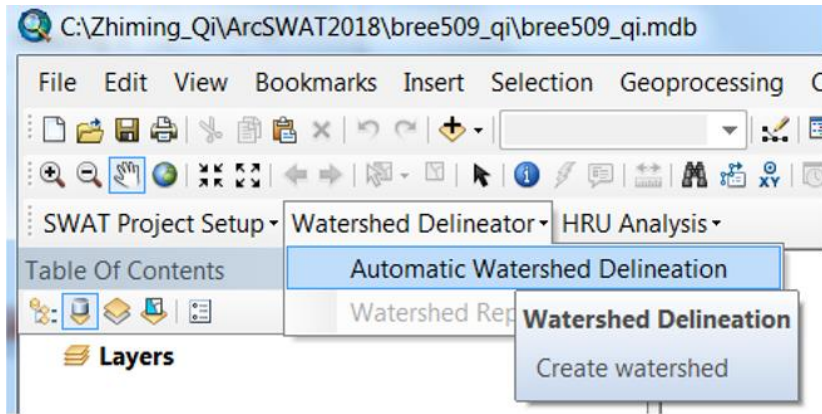
Configuration du projet: Choisir le chemin où vous souhaitez enregistrer le projet. Par exemple, un dossier nommé « saida » a été créé sous le chemin ****D:\yahiaoui\ArcSWAT2025****, de sorte que tous les fichiers du projet ArcSWAT seront sauvegardés dans ce dossier. Cliquer sur OK. Le message « *La configuration du projet est terminée* » s'affichera. Cliquer de nouveau sur OK.

- **Délimitation du bassin versant**

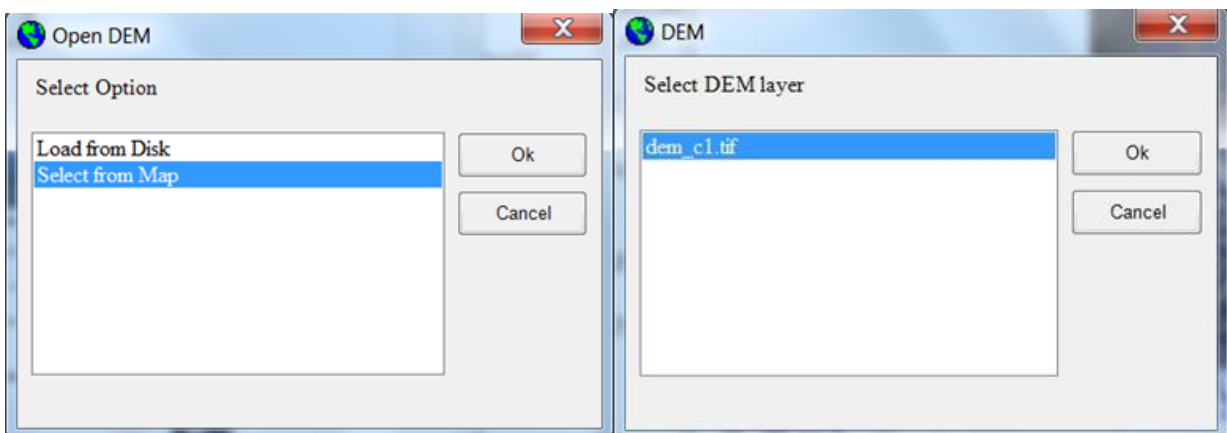
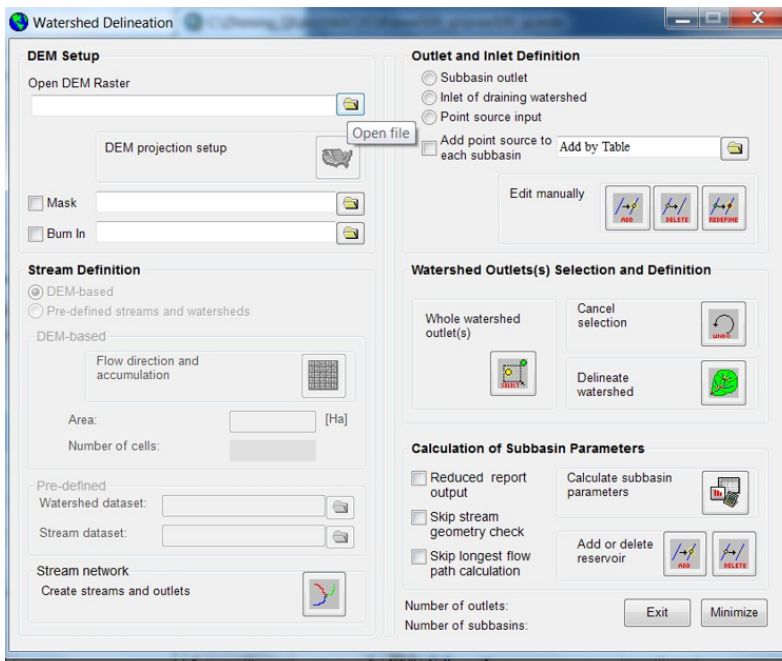
Charger le DEM (Digital Elevation Map) en cliquant sur « adding data» .. Le DEM est placé dans le dossier “ saida data”. Trouvez le chemin du dossier“ saida data ” sur votre ordinateur et chargez le fichier “dem_c1.tif” dans ArcSWAT en cliquant sur « Add ».




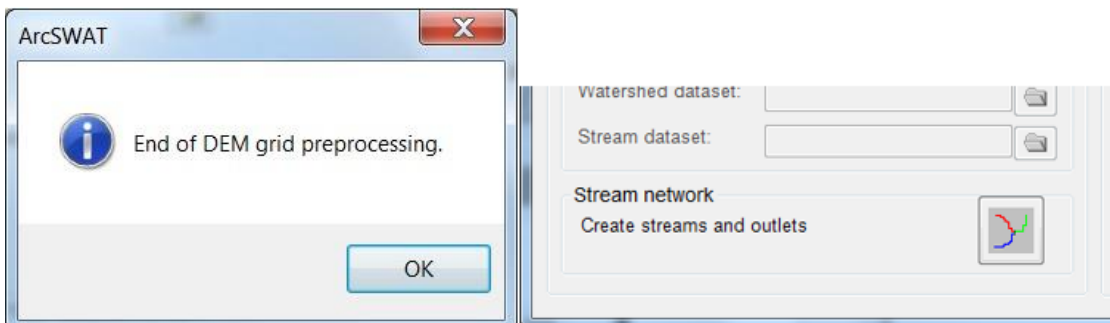
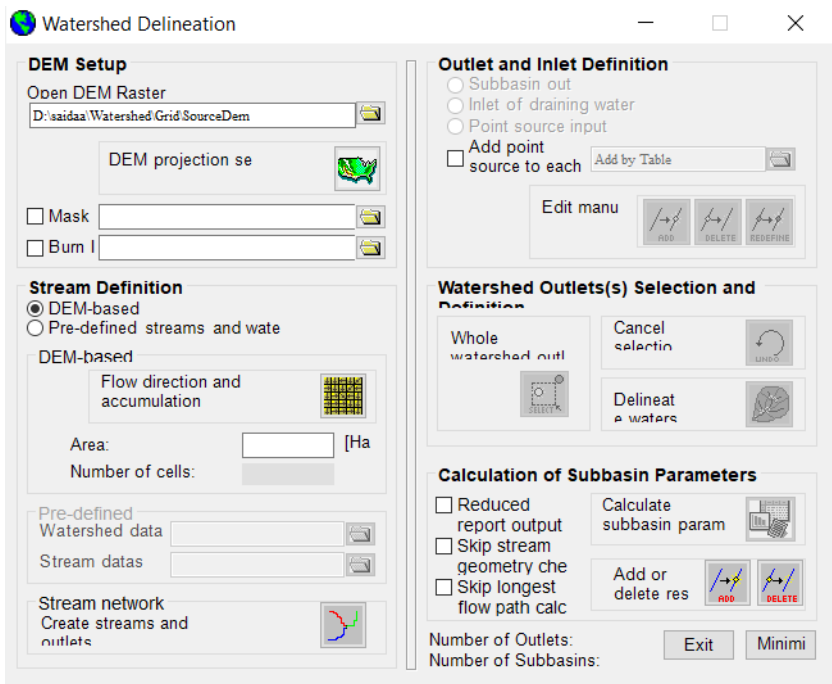
Sélectionnez « Watershed Delineator » -> « Automatic Watershed Delineation».



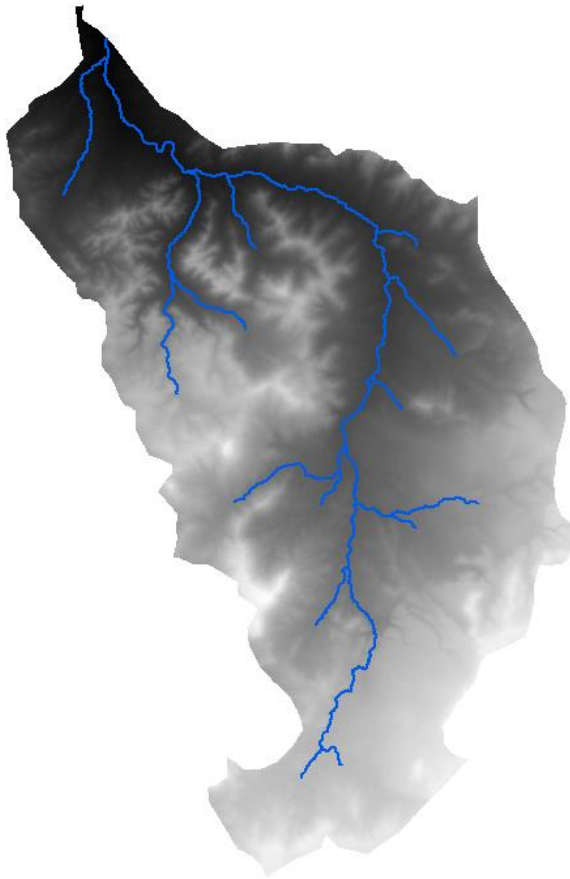
Cliquez sur « Open DEM Raster », choisissez « Select from Map », sélectionnez « saida dem », puis OK.



Cliquez sur « Calculating flow direction and accumulation ». L'opération prendra quelques secondes. Une fenêtre « End of DEM grid preprocessing » apparaîtra. Cliquez sur OK. Ensuite, cliquez sur l'icône dans « Stream network \ Create streams and outlets» 



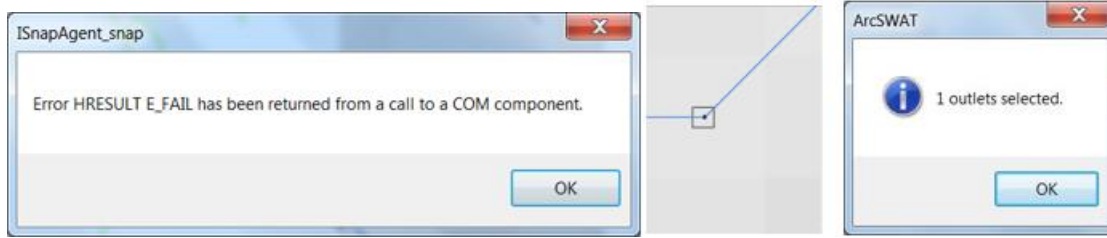
Le réseau hydrographique du sous-bassin versant de Saïda est présenté ci-dessous. Il est bien connecté et correspond à la structure fluviale de la région. Chaque point du réseau représente soit une confluence (jonction de cours d'eau), soit un exutoire du bassin versant, illustrant ainsi l'organisation hydrologique caractéristique de cette zone semi-aride.



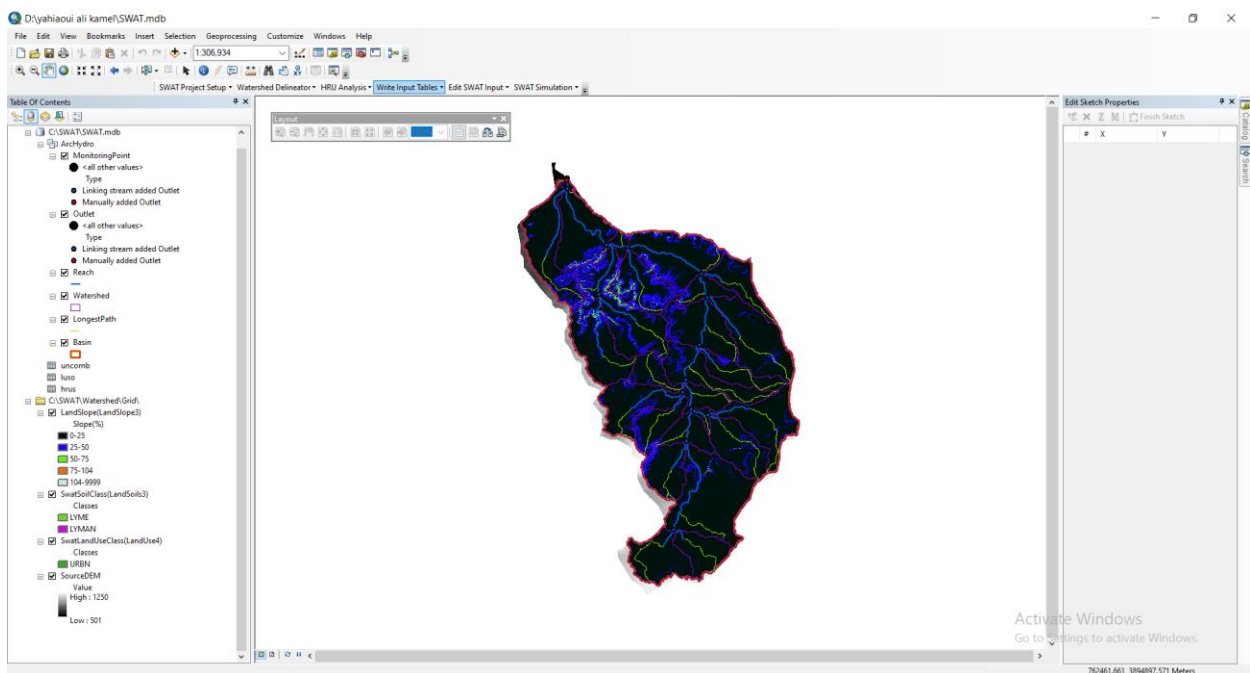
Aucune action ne sera effectuée pour « Définition des exutoires et des apports ». Nous utiliserons un point sur la carte comme exutoire pour le sous-bassin versant de Saïda. Si vous souhaitez définir votre propre exutoire, un point peut être ajouté en cliquant sur « Edit manually ». Il n'y a pas non plus d'apports (c.-à-d. rejets d'eaux usées municipales).



Si un message comme celui-ci apparaît, cela signifie que vous devez effectuer un zoom avant supplémentaire :



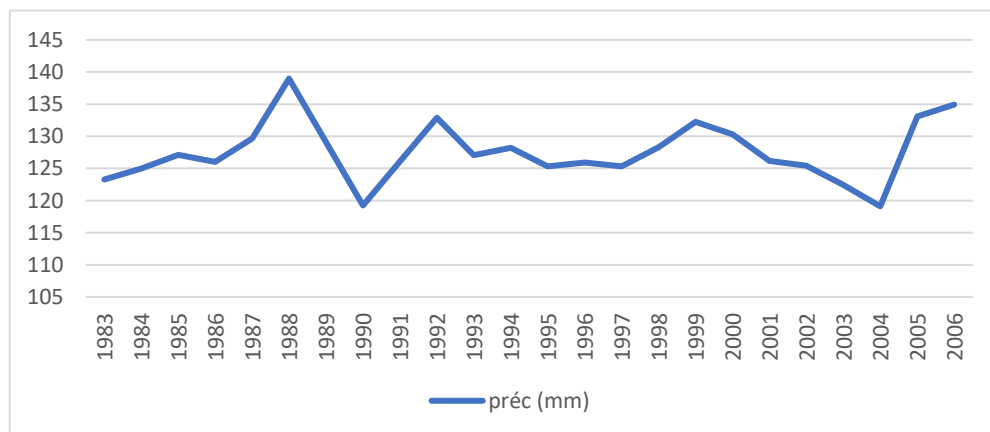
Ensuite, cliquez sur « Delineate watershed». L'opération prendra quelques secondes. Réduisez le zoom dans ArcMap : le bassin versant apparaît comme ci-dessous.



III.5 Analyse des résultats à l'échelle annuelle

Tableau III.1: Hauteurs de précipitation durant l'année 1983 à 2006

Temps (ans)	Précipitation (mm)	Temps (ans)	préc (mm)
1983	123.28	1995	125.33
1984	124.97	1996	125.93
1985	127.12	1997	125.31
1986	126.02	1998	128.33
1987	129.68	1999	132.23
1988	138.98	2000	130.28
1989	129.08	2001	126.19
1990	119.23	2002	125.44
1991	126.12	2003	122.44
1992	132.88	2004	119.11
1993	127.08	2005	133.11
1994	128.19	2006	134.96

**Figure III.1:** Hauteurs de précipitations annuelle dans période de 1983 à 2006

La courbe met en évidence la variabilité temporelle des précipitations sur le bassin versant de Saïda. On remarque une distribution irrégulière caractérisée par des épisodes pluvieux intenses suivis de longues périodes sèches, ce qui traduit le régime climatique semi-aride de la région. Cette

dynamique influe directement sur le ruissellement, la recharge des nappes et la disponibilité en eau pour les activités agricoles.

III.6 Le débit

Le rendement en eau désigne le rapport entre la quantité d'eau effectivement utilisée par la plante (évapotranspiration utile) et la quantité totale d'eau fournie (précipitations, irrigation). Il mesure donc l'efficacité de l'utilisation de l'eau par rapport à la production agricole ou biologique recherchée.

Tableau III.2: Évolution temporelle du débit dans le bassin versant de Saïda

Temps (ans)	Débit (m ³ /s)	Temps (ans)	Débit (m ³ /s)
1983	8.69	1995	15.27
1984	40.15	1996	8.32
1985	30.24	1997	9.10
1986	18.90	1998	5.90
1987	6.85	1999	8.34
1988	2.82	2000	8.86
1989	3.23	2001	9.17
1990	4.67	2002	5.57
1991	12.62	2003	8.51
1992	7.08	2004	11.80
1993	5.97	2005	5.85
1994	10.38	2006	3.31

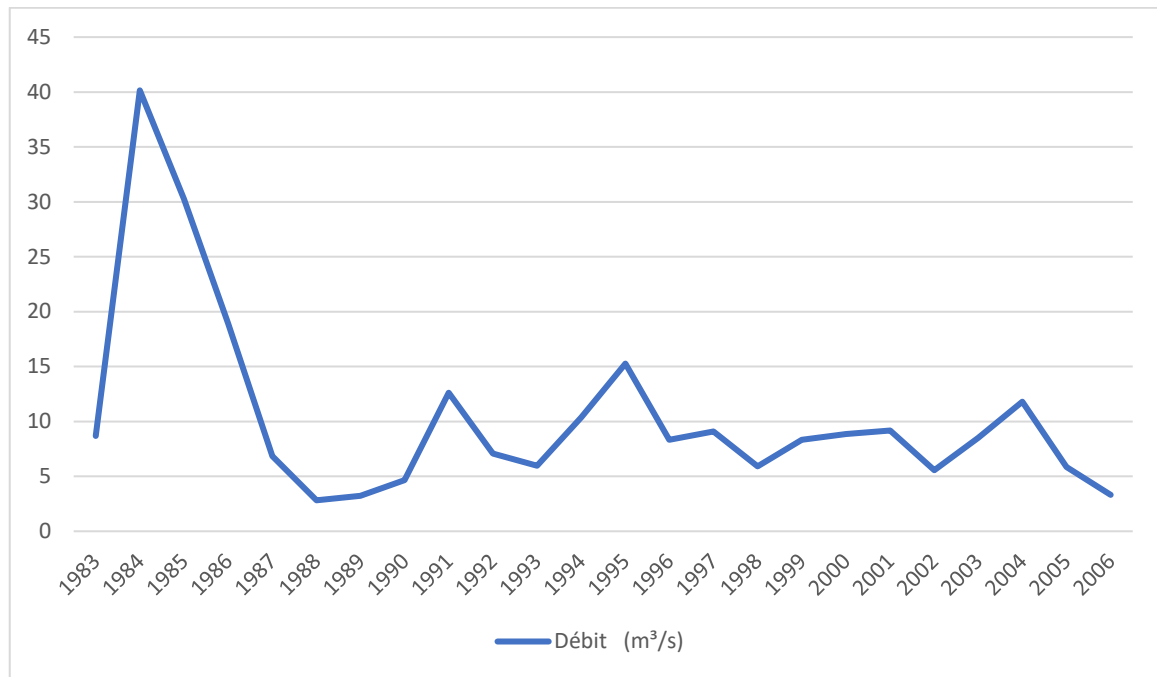


Fig III.2: Évolution temporelle du débit dans le bassin versant de Saïda

La courbe illustre la variation temporelle du rendement en eau dans le bassin versant de Saïda. On observe une fluctuation notable selon les années, reflétant l'influence directe de la variabilité climatique et de la disponibilité hydrique sur la productivité agricole. Les pics indiquent des périodes d'efficacité hydrique accrue, tandis que les baisses traduisent des conditions de stress hydrique et une faible valorisation de l'eau. Cette dynamique souligne la vulnérabilité du système agricole local face aux irrégularités pluviométriques typiques du climat semi-aride.

III.7 rendement en sédiments

Le rendement en sédiments correspond à la quantité de matériaux solides (particules de sol, sable, limon, argile) exportée par un bassin versant vers son exutoire, généralement exprimée en tonnes par hectare et par an (t/ha/an). Il représente l'efficacité des processus d'érosion et de transport sédimentaire et constitue un indicateur clé de la dégradation des sols et de la durabilité des ressources hydriques.

Tableau III.3: Évolution temporelle du rendement en sédiments dans le bassin versant de Saïda

Temps (ans)	rendement en sédiments (t/ha)	Temps (ans)	rendement en sédiments (t/ha)
1983	0.17	1995	0.37
1984	0.66	1996	0.13
1985	0.45	1997	0.15
1986	0.29	1998	0.10
1987	0.10	1999	0.15
1988	0.06	2000	0.16
1989	0.04	2001	0.19
1990	0.06	2002	0.10
1991	0.23	2003	0.11
1992	0.12	2004	0.21
1993	0.16	2005	0.12
1994	0.19	2006	0.05

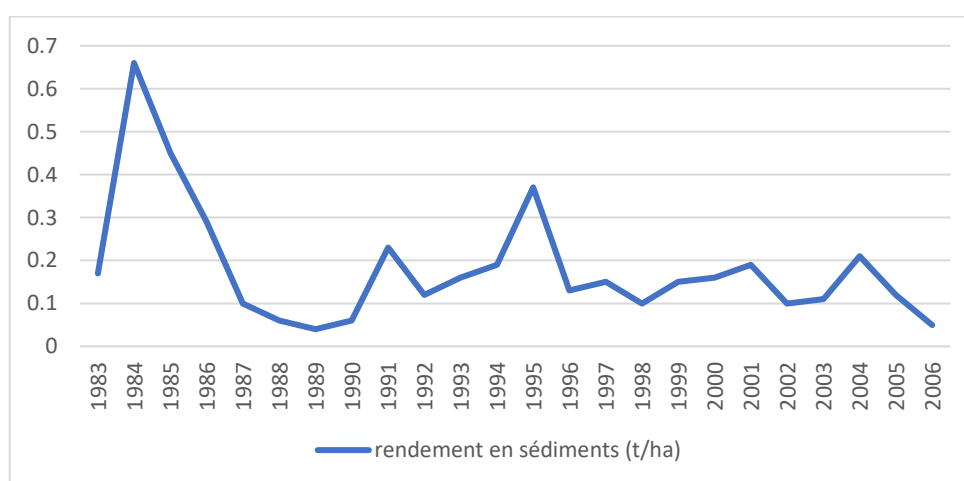


Figure III.3: Évolution temporelle du rendement en sédiments dans le bassin versant de Saïda

La courbe illustre la dynamique du rendement en sédiments dans le bassin versant de Saïda. On observe une variabilité interannuelle importante, étroitement liée aux épisodes de fortes précipitations et aux caractéristiques topographiques et pédologiques de la zone. Les pics correspondent aux périodes de ruissellement intense favorisant l'érosion des sols, tandis que les valeurs plus faibles traduisent des conditions de stabilité relative. Cette évolution met en évidence la sensibilité du bassin à l'érosion hydrique et la nécessité d'adopter des pratiques de gestion durable des terres.

III.8 Le nitrate (NO₃)

Le nitrate (NO₃⁻) est une forme oxydée de l'azote minéral, très soluble dans l'eau et facilement transportée par les écoulements de surface et les eaux souterraines. Dans un bassin versant, il constitue un indicateur essentiel de la fertilisation agricole et de la qualité de l'eau, car un excès de nitrates peut entraîner la pollution des nappes phréatiques et favoriser les phénomènes d'eutrophisation dans les milieux aquatiques.

Tableau III.4: Évolution temporelle du nitrate (NO₃) dans le bassin versant de Saïda

Temps (ans)	Le nitrate (NO ₃) (g/ha)	Temps (ans)	Le nitrate (NO ₃) (g/ha)
1983	31.66	1995	42.50
1984	101.66	1996	107.50
1985	46.66	1997	57.50
1986	125	1998	29.16
1987	43.33	1999	67.50
1988	88.33	2000	48.33
1989	22.5	2001	56.66
1990	16.66	2002	55.00
1991	60.83	2003	47.50
1992	33.33	2004	69.16
1993	17.5	2005	43.33
1994	52.5	2006	31.66

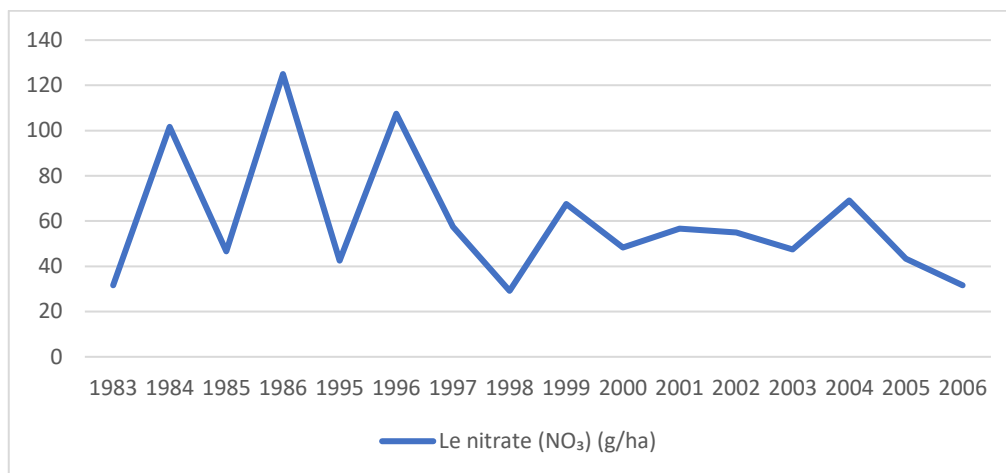


Fig III.4: Évolution temporelle du nitrate (NO_3) dans le bassin versant de Saïda

La courbe met en évidence une variabilité spatiale des concentrations en NO_3^- dans le sous-bassin versant de Saïda. Les valeurs élevées traduisent l'impact des apports agricoles et du lessivage, tandis que les valeurs faibles reflètent des zones plus stables. Cette dynamique souligne la vulnérabilité du sous-bassin à la pollution diffuse et la nécessité d'une gestion durable des intrants azotés.

III.9 Le phosphore (P)

Le phosphore (P) est un élément nutritif essentiel au développement des plantes et des organismes vivants. Dans un bassin versant, il se présente sous différentes formes (dissoute ou particulaire) et provient principalement des engrais agricoles, du lessivage des sols et des rejets domestiques ou industriels. Bien qu'il soit indispensable à la fertilité des sols, un excès de phosphore dans les eaux superficielles peut entraîner des phénomènes d'eutrophisation, affectant la qualité écologique des écosystèmes aquatiques.

Tableau III.4: Évolution temporelle du phosphore (P) dans le bassin versant de Saïda

Temps (ans)	phosphore (P) (g/ha)	Temps (ans)	phosphore (P) (g/ha)
1983	0.83	1995	3.33
1984	8.33	1996	1.66
1985	3.33	1997	1.66
1986	2.50	1998	0.83
1987	0.83	1999	1.66
1988	0.00	2000	1.66
1989	0.83	2001	1.66
1990	0.83	2002	0.83
1991	2.50	2003	1.66
1992	1.66	2004	2.50
1993	0.83	2005	0.83
1994	2.50	2006	0.83

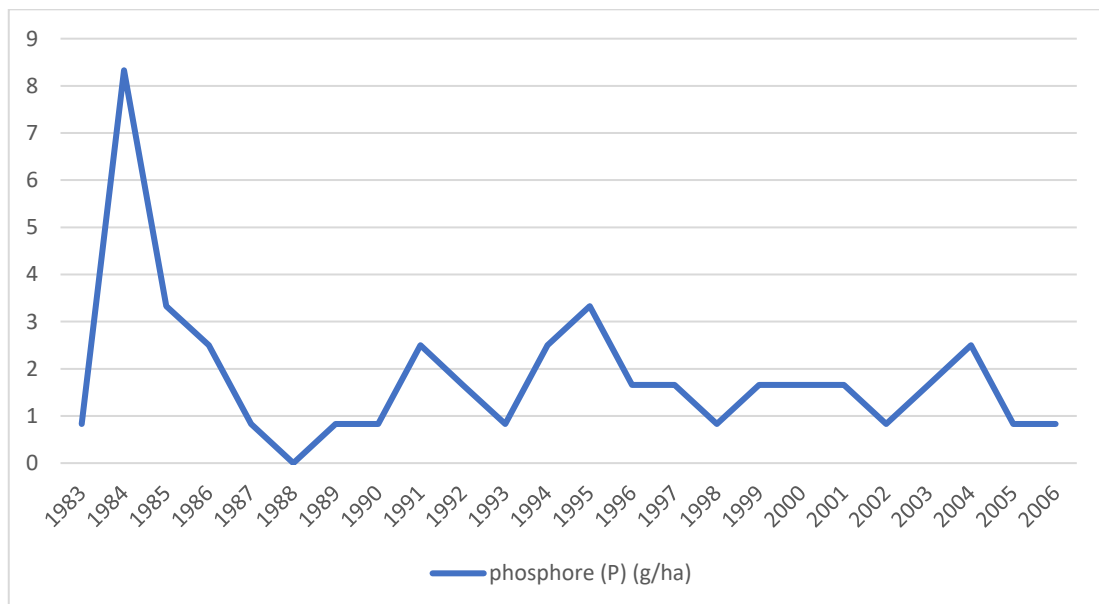


Figure III.5: Évolution temporelle du phosphore (P) dans le bassin versant de Saïda

La courbe représente la variabilité spatiale moyenne des concentrations en phosphore (P) dans le sous-bassin versant de Saïda. On observe des fluctuations notables qui traduisent l'hétérogénéité des apports et des processus de transfert. Les pics indiquent des zones potentiellement soumises à une forte pression anthropique (fertilisation, ruissellement), tandis que les valeurs faibles correspondent à des secteurs relativement stables. Cette dynamique met en évidence la sensibilité du sous-bassin à la pollution diffuse d'origine agricole et l'importance d'une gestion durable des ressources.

Conclusion

L'application du modèle ArcSWAT au sous-bassin versant de Saïda a permis de simuler la dynamique hydrologique, l'érosion et la pollution diffuse, confirmant son importance stratégique et sa vulnérabilité face au climat semi-aride. L'étude a révélé une forte variabilité des précipitations, du débit d'eau et du rendement en sédiments, ce qui met en évidence l'impact direct du climat sur la disponibilité des ressources. De plus, les fluctuations notables des concentrations de nitrate et de phosphore soulignent l'influence des pratiques agricoles sur la qualité de l'eau. En définitive, les résultats confirment que ce bassin est sensible à l'érosion et à la pollution, ce qui rend indispensable l'adoption de stratégies de gestion durable des terres et de l'eau pour sa préservation.

Conclusion générale

Conclusion générale & recommandations

Au terme de ce travail, qui a porté sur l'application du modèle SWAT au sous-bassin versant de Saïda, nous avons pu analyser en profondeur la dynamique hydrologique, l'érosion et la pollution diffuse dans ce milieu semi-aride. L'étude a confirmé le rôle crucial de la modélisation comme outil d'aide à la décision pour la gestion des ressources en eau et en sol.

Les résultats obtenus ont mis en évidence plusieurs éléments clés :

- Les précipitations annuelles présentent une forte variabilité, oscillant entre 119 mm (1990) et 139 mm (1988), traduisant l'irrégularité caractéristique des zones semi-arides.
- Le débit simulé a montré des fluctuations importantes, allant de 2,82 m³/s (1988) à 40,15 m³/s (1984), ce qui confirme la vulnérabilité du bassin aux crues rapides lors des pluies intenses.
- Le rendement en sédiments varie entre 0,04 t/ha (1989) et 0,66 t/ha (1984), soulignant la sensibilité du bassin à l'érosion hydrique et la perte de sols fertiles.
- Les concentrations en nitrates (NO₃) atteignent des pics notables avec 125 g/ha en 1986, traduisant l'impact direct des pratiques agricoles et du lessivage, tandis que les valeurs minimales descendent à 16,6 g/ha en 1990.
- Le phosphore (P) oscille entre 0 g/ha (1988) et 8,3 g/ha (1984), révélant une variabilité importante liée aux apports agricoles et aux conditions climatiques.

Ces résultats confirment que le sous-bassin versant de Saïda est un environnement fragile, fortement exposé à l'érosion hydrique et à la pollution diffuse d'origine agricole. L'approche SWAT, couplée aux outils SIG, a démontré son efficacité pour comprendre les dynamiques hydro-agricoles et identifier les zones critiques à cibler en priorité.

Recommandations

En vue d'une gestion intégrée et durable du sous-bassin versant de Saïda, les recommandations suivantes sont formulées :

- **Promouvoir des pratiques agricoles durables** : encourager l'utilisation raisonnée des engrais pour réduire les apports en NO₃ et P (limiter les pics de 125 g/ha de nitrates et 8,3 g/ha de phosphore) et favoriser les rotations culturales.

- **Lutter contre l'érosion et la dégradation des sols** : adopter des techniques de conservation (courbes de niveau, haies végétales, reboisement des zones dégradées) afin de réduire le rendement en sédiments qui atteint actuellement 0,66 t/ha/an dans certaines années.
- **Mettre en place un système de suivi continu** : établir un réseau d'observation hydrologique pour collecter des données fiables sur les débits (pouvant dépasser 40 m³/s) et la qualité de l'eau.
- **Intégrer les résultats de la modélisation dans la planification** : utiliser SWAT pour simuler l'impact de futurs scénarios agricoles et urbains, et orienter les politiques d'aménagement.
- **Renforcer la sensibilisation locale** : informer les agriculteurs et les habitants sur la vulnérabilité du bassin et sur les bonnes pratiques pour préserver l'eau et les sols face aux sécheresses récurrentes et aux pressions anthropiques.

Limites et défis de l'utilisation du modèle SWAT

Bien que performant et adapté à la modélisation hydrologique, l'utilisation du modèle SWAT présente certaines contraintes dans le contexte algérien :

- **Données climatiques et hydrologiques limitées** : la rareté et parfois la discontinuité des séries de données réduisent la précision des simulations.
- **Besoin de données pédologiques et agricoles précises** : la qualité des résultats dépend fortement de la disponibilité de bases de données locales détaillées.
- **Calibrage et validation exigeants** : ces étapes nécessitent des mesures de terrain continues, parfois difficiles à obtenir dans des zones isolées.
- **Complexité technique** : la maîtrise du modèle SWAT, des outils SIG et des méthodes de calibration demande des compétences spécifiques encore peu généralisées.

En somme, bien que le modèle SWAT et les SIG offrent des perspectives solides pour la gestion intégrée des ressources en eau et en sols, leur efficacité en Algérie dépendra d'un meilleur accès aux données, du renforcement des capacités techniques et d'une intégration systématique dans les politiques de développement durable.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Benali, N. (2016). Étude de l'impact de l'eau sur la perte des éléments nutritifs dans les sols agricoles de la région de Tlemcen. Thèse de doctorat, Université de Tlemcen.
- Bonnet, M. et al. (1970). Calcul automatique des bilans d'eau mensuels et annuels par les méthodes de Thornthwaite et de Turc, BRGM, Paris, p.21. in Saad Allah, 2018.
- Bouanani, A., & Yles, F. (2016). Évaluation de l'érosion hydrique et la dynamique d'occupation du sol dans le sous-bassin versant de l'oued Saida (Nord-Ouest Algérien). *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 29(4), 381–392.
- Bouderbala, A. (2019). Simulation du processus pluie-débit à l'aide du modèle SWAT dans le bassin versant de Bouhamdane, Algérie.
- Derias, T., & Toubal A., C. (2013). Hydrogéologie du bassin versant de l'Oued Ksob (Tébessa). (Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumédiène – Alger).
- Hadj-Said, S. (2008). Contribution à l'étude hydrogéologique d'un aquifère en zone côtière : cas de la nappe de Guerbes. Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhta, Annaba, Algérie, 215 p.
- KAMEL, S. (2005). Cours Télédétection ECO. Laboratoire d'Ecophysiologie Végétale, Université Paris-Sud XI-91405 Orsay, France.
- Kazi-Tani, A., Bouchefra, A., & Chems Eddine, A. (2016). Sédiments en suspension et typologie des crues dans le bassin versant de l'oued Saïda (Hauts plateaux algériens). *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 29(3).
- Khaldi, A. (2005). Impact de la sécheresse sur le régime des écoulements souterrains dans les massifs calcaires de l'Ouest algérien "Monts de Tlemcen-Saïda". Thèse de doctorat d'État, Université d'Oran.
- Kherfi, M. (2018). Impact du climat semi-aride sur les propriétés physico-chimiques des sols agricoles dans les régions de l'ouest algérien. Thèse de doctorat, Université de Sidi Bel Abbès.
- Lacroix, A., Laurent, F., Ruelland, D., & Sauboua, E. (2005). Nitrate pollution risk assessment: from the model to the indicator. *Int. J. Agricultural Resources, Governance and Ecology*, 5(2/3), 206-223.
- Laurent, F., Ruelland, D., & Chapdelaine, M. (2007). Simulation de l'effet de changements de pratiques agricoles sur la qualité des eaux avec le modèle SWAT.

Revue des Sciences de l'Eau, 20(4), 395-408.

- Madani, D. (2023). Étude d'impacts de la dégradation des terres liée à la désertification sur le paysage et le volet socio-économique dans la région de M'Sila, Algérie Est. Université Mohamed Khider de Biskra.
- Makhlouf, N. (2015). Cours cycle hydrologique. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumédiène, Faculté des Sciences de la Terre, Mémoire de Magister en hydraulique, Université Kasdi Merbah, Ouargla, Algérie, 176 p.
- Michaud, A., Deslandes, J., & Beaudin, I. (2006). Modélisation de l'hydrologie et des dynamiques de pollution diffuse dans le bassin versant de la Rivière aux Brochets à l'aide du modèle SWAT. IRDA report, 117 p.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Srinivasan, R., & Williams, J.R. (2002). *Soil and Water Assessment Tool, User's Manual*. Blackland Research Center, USDA-ARS, Temple.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5), 1633-1644.
- Radjah, S. (2017). Modélisation pluie-débit par le modèle S.W.A.T (application au bassin versant des Issers). Thèse, École Nationale Polytechnique d'Alger.
- Roche, M. (1963). *Hydrologie de surface*. Office de la recherche scientifique et technique Outre-mer, Paris, 430 p.
- Roche, S. (1998). L'appropriation sociale des technologies de l'information géographique. *L'Espace géographique*, 317-327.
- Sivakumar, M. V. K., & Ndiang'ui, N. (2007). *Climate and Land Degradation*. Springer, Dordrecht. ISBN: 978-1-4020-5516-7.
- Thiebault, M. (2010). Modélisation hydrologique d'un scénario de changement climatique sur le bassin-versant du Bani avec SWAT. Mémoire d'ingénieur, ENGEES, 55 p.
- Touré, B. (2023). Gestion des sols salés et désertification dans une cuvette endoréique du Nord du Mali : cas de la cuvette de Nara. Thèse de doctorat, Université d'Alger.
- Yles, R., Benkedadra, M., & Yassine, B. (2014). Hydrologie – modélisation pluie-débit et transport solide dans le bassin versant de l'oued Saida (Ouest Algérien). Thèse de doctorat, Université de Tlemcen.

- Zineb, Z. (2018). Rôle de la structure du sol dans son fonctionnement hydrique. Sa quantification par la courbe de retrait. Thèse de doctorat, Université de Chlef.