

République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أبو بكر بلقايد – تلمسان
Université ABOUBEKR BELKAID – TLEMCEM
كلية علوم الطبيعة والحياة، علوم الأرض والكون
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, et des Sciences de la Terre et de l'Univers
Département des Sciences de la Terre et de l'Univers.
*Laboratoire N°25: « Promotion des ressources hydriques, minières et pédologiques : législation
de l'environnement et choix technologique ».*



MÉMOIRE

Présenté par

HASSI Soundousse

HATHOUT Selma

En vue de l'obtention du

Diplôme de MASTER

En Hydrogéologie.

Thème

**CONTRIBUTION A L'IDENTIFICATION DES ZONES POTENTIELLES DE
RECHARGE : CAS DU SOUS BASSIN VERSANT DE SIKKAK (NORD-OUEST
ALGERIEN).**

Président	Mr BENCHOUK.M	M.A.A	Université de Tlemcen.
Encadrant	Mme GUETTAIA.S	M.C.A	Université de Tlemcen.
Co-Encadrant	Mr BOUDJEMA.A	M.C.A	Université de Tlemcen.
Examineur	Mr CHIKH.M	M.A.A	Université de Tlemcen.

Année universitaire 2024 /2025.

Remerciements :

Tout d'abord, je remercie « Allah » qui nous a permis d'achever ce travail.

Nous tenons à exprimer nos plus sincères remerciements à toutes les personnes qui nous ont accompagnées, soutenues et encouragées tout au long de l'élaboration de ce mémoire.

*Nous remercions tout particulièrement Mr **BOUDJEMA Abderrezzak**, notre encadrant, pour sa disponibilité, ses conseils avisés et son accompagnement tout au long de ce travail. Nos remerciements vont également à Mme **GUETTAIA Sabrina** pour son soutien et ses orientations précieuses.*

*Nous exprimons aussi notre profonde gratitude à **Monsieur LAOUFI Abdesselam** pour son aide, sa bienveillance et ses remarques constructives qui nous ont permis d'enrichir notre travail.*

*Nous remercions **les membres de jury** et tous **les enseignants** qui ont contribué à notre formation tout au long de notre parcours universitaire, en prenant soin de notre apprentissage et de notre bien-être.*

*Nous remercions s'adressent également à **l'Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT)** et **AGIRE** pour les données et le soutien technique mis à notre disposition et sans oublier **monsieur le tuteur ZERROUKI Boumedienne**.*

Enfin, nous remercions chaleureusement nos familles et nos amis pour leur encouragement constant, leur patience et leur soutien moral tout au long de cette aventure académique.

Dédicaces :

Premièrement, je veux dire-**EL HAMDOUNILLAH**- ; Dieu qui m'a guidé tout au long de ce parcours et m'a donné la force et la persévérance pour surmonter tous les obstacles.

À l'âme pure de ma mère, Que Dieu lui fasse miséricorde, source de tendresse, patrie disparue mais toujours vivante dans le cœur. Ce travail modeste lui est dédié, à celle qui a semé en moi l'amour du savoir, malgré l'absence. Présente dans chaque détail de mes journées, dans chaque prière silencieuse et chaque larme discrète. Chaque réussite est le prolongement d'un amour éternel.

À mon cher père, Celui qui a porté mes peines avant même que je les ressente, qui a été ma force et mon appui. Gratitude pour sa patience, sa chaleur et sa constance, tel un roc face aux tempêtes de la vie. Que Dieu le préserve et fasse de sa présence une lumière éternelle.

À mes chères sœurs, « **Asmaa Aicha Chaïma et Roumaïssa** » ; battement du cœur, sources de force. Chaque geste de soutien, chaque sourire sincère a été un baume dans les moments difficiles. Une reconnaissance profonde leur est adressée, ainsi qu'un amour infini.

À l'âme bien-aimée de mon grand-père, ma chère grand-mère et mes chères tantes, merci pour la sincérité de leurs sentiments et la douceur de leurs paroles. Elles ont été un refuge dans les moments d'incertitude.

À mes amis de route,

Samiha ; Abdelkader ; Selma ; Hadjer ; Mounia ; Mouna ; Amira et Abir. Leurs sourires, leur patience et leur compagnie ont apaisé les jours d'effort.

Toute ma reconnaissance leur est adressée. Merci infiniment à vous tous pour votre contribution précieuse à ce travail.

Soundousse

Dédicaces :

Louange à **Dieu** qui rend possibles les commencements, parachève les fins, et accorde-les bénédictions grâce auxquelles les œuvres s'accomplissent. C'est avec gratitude et humilité que je rends hommage à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail.

Je dédie en premier lieu ce modeste travail à **moi-même**, à cette personne ambitieuse qui a commencé avec un rêve et a persévéré jusqu'à la réussite.

Je tiens à exprimer une reconnaissance infinie à **ma mère**, à celle qui a fait du paradis une promesse sous ses pieds, qui a su entourer mon cœur avant même mes mains, et dont les prières ont allégé les épreuves. Elle a été mon refuge dans les nuits sombres, la source de ma force et de ma réussite. Maman, tu es mon havre de paix, ma lumière et mon inspiration.

Mes pensées reconnaissantes s'adressent aussi à **mon père**, celui qui a honoré mon nom des plus beaux titres, m'a soutenue sans limite, m'a donné sans jamais attendre en retour. C'est lui qui m'a enseigné que la vie est un combat dont les armes sont le savoir et la connaissance.

Mon premier soutien, mon pilier, ma force et mon refuge après Dieu.

À **ma chère famille**, qui a toujours été une source d'amour et de sérénité. Merci pour vos cœurs sincères.

À **mon frère Younes et mes sœurs Aya et Ritedj**, vous êtes le véritable soutien et la joie constante dans ma vie.

À **Walid**, merci pour la présence a été un apaisement au milieu de la fatigue. Merci pour ton soutien discret et tes mots qui arrivaient toujours au bon moment.

À **ma chère famille**, qui a toujours été une source d'amour et de sérénité. Merci pour vos cœurs sincères.

À **mes amis Soundousse, Mounia, Hadjer, Amira, Tinhinane et Hanane**, pour votre appui sincère et votre présence à chaque étape.

Et enfin : « Celui qui dit je suis à la hauteur atteint son but, et moi, j'étais à la hauteur, même si parfois elle semblait me résister... C'est grâce à Toi, Seigneur, que j'ai pu faire tout cela. »

Selma

SOMMAIRE :

Remerciements :	
Dédicaces :	
Liste des Abréviations :	
Liste des tableaux :	
Liste des figures :	
ملخص:	
Résumé :	
Abstract:	
Introduction Générale :	2
Premier chapitre : Morphométrie-climatologie	4
Introduction :	5
I-Situation géographique de sous bassin versant de Sikkak :	6
II- Morphométrie du sous bassin versant de Sikkak :	7
II-1- Caractéristiques de forme :	7
II-1-1- L'indice de Compacité de Graveluis :	7
II-1-2- Rectangle équivalent :	8
II-1-3- Le coefficient de circularité du bassin :	9
III- Etude du réseau hydrographique :	9
III-1- Densité de drainage (Dd) :	11
III-2- Rapport de confluence :	13
III-3- La fréquence des cours d'eaux :	14
IV- Etude de relief :	15
IV-1- La courbe hypsométrique :	16
IV-2- Les indices de pente et relief :	20
IV-2--1- Etude des pentes :	20
a- Indice de pente de Roche Ip :	22
b- Indice de pente globale Ig :	22
c- Dénivelée spécifique Ds :	23
VI- Sol et végétation :	24
VII- Etude Climatologique :	26
VII-1- Les précipitations :	26
VII-1-1- Les précipitations moyennes annuelles :	28
VII-1-2- Les précipitations moyennes mensuelles :	29

VII-1-3- Les précipitations saisonnières:	30
VII-2- Les températures :	31
VII-3- Etude de climat :	33
VII-3- 1- Les indices climatiques :.....	34
a- L'indice d'aridité annuelle :	34
b- L'indice d'aridité mensuelle :.....	35
VII-4- Evapotranspiration et deficit d'écoulement :	37
Conclusion :.....	43
Deuxième chapitre : Géologie-hydrogéologie.....	44
Introduction :	44
I- Synthèse géologique et hydrogéologique régionale :	44
I.1. Les formations secondaires :	44
I.2. Les formations Tertiaires :	45
I.3. Les formations quaternaires :	46
I-2. Contexte hydrogéologique :.....	48
II-Contexte géologique, hydrogéologique et structural de la zone d'étude :	49
Conclusion :	53
Troisième chapitre :application des systèmes SIG pour l'élaboration de la carte des potentialité hydriques	55
Introduction :	55
I-Rôle du système SIG dans la protection et la gestion des potentialités hydriques :	55
II-Technique d'élaboration de la carte des potentialités hydriques :	56
III-Analyse multicritères :	61
III-1. Cadre théorique de l'analyse :	62
III-2. Attribution des poids aux facteurs :	62
III-3. Méthode de notation des classes :	62
III-4. Calcul détaillé de l'influence de chaque classe :	62
A. Géologie (Poids = 20%):	62
B. Densité de drainage (Poids = 5%) :	63
C. Précipitations (Poids = 20%):	63
D. Pente (Poids = 20%):	64
E. Occupation du sol (Poids = 10%) :	64
F. Altitude (Poids = 20%):	65
G. Densité de linéament (Poids = 5%) :	65
III-5. Calcul du potentiel final de recharge :	66

VI-Interprétation de la carte des potentialités hydriques dans le sous-bassin versant de Sikkak :	69
Conclusion et recommandations :	71
CONCLUSION GENERALE :	70
ANNEXES:	72
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :	77
ملخص:	
Résumé :	
Abstract:	

Liste des Abréviations :

P : Précipitation.

T : Température.

AHP : (Analytic Hierarchy Process): analyses multicritères.

SIG : Système d'Information Géographique.

MNT : Modèle Numérique de Terrain.

Liste des tableaux :

Chapitre I :

Tableau.I. 1 : Caractéristiques de forme de la zone d'étude.	8
Tableau.I.2 : Classification des fréquences des cours d'eau et leurs interprétations (MORISAWA, M.E .1985).	14
Tableau.I. 3 : Rapport de confluence.	14
Tableau.I. 4 : Classification des fréquences des cours d'eau et leurs interprétations (MORISAWA, M.E .1985).	15
Tableau.I. 5 : Répartition hypsométrique du bassin d'oued Sikkak.	16
Tableau.I. 6 : Classification du relief selon Ig par l'ORSTOM.....	23
Tableau.I. 7 : Classification du relief selon Ds par l'ORSTOM.....	24
Tableau.I. 8 : Coordonnées de la station climatologique de Sikkak.	28
Tableau.I. 9 : Les précipitations moyennes annuelles (1999-2024).....	28
Tableau.I. 10 : Précipitations moyennes mensuelles (1999-2024).	29
Tableau.I. 11 : Les précipitations saisonnières.	30
Tableau.I. 12 : Valeurs des températures mensuelles moyennes, maximales et minimales.	32
Tableau.I. 13 : Précipitations et Températures moyennes mensuelles.....	33
Tableau.I. 14 : : Classification de DE Martonne.....	35
Tableau.I. 15 : Indice d'aridité de Martonn.	35
Tableau.I. 16 : Indices d'aridité mensuelle de DE Marton	35
Tableau.I. 17 : Indice d'Emberger.	36
Tableau.I. 18 : Evapotranspiration réelle.	38
Tableau.I. 19 : Valeurs de l'ETP corrigée et l'ETP non corrigée du sous bassin versant de Sikkak.	41
Tableau.I. 20 : Bilan hydrologique.	42

Chapitre III:

Tableau.III. 1 : Critères et pondérations utilisés.	68
--	----

Liste des figures :

Chapitre I :

Figure. I. 1 : Localisation de la zone d'étude	6
Figure. I.2 : Réseau Hydrographique du sous bassin versant d'Oued Sikkak.	10
Figure.I.3 : Carte de densité de drainage.....	12
Figure.I.4 : Courbe Hypsométrique et histogramme des fréquences altimétriques de sous bassin versant du Sikkak.	17
Figure.I.5 : Carte des altitudes.	19
Figure.I.6 : Carte des pentes du sous bassin versant de Sikkak.	21
Figure.I.7 : Carte d'occupation du sol dans le sous bassin de Sikkak.	25
Figure.I.8: Carte des précipitations.	27
Figure.I.9 Variation des précipitations moyennes annuelles du sous bassin de Sikkak	29
Figure.I.10 : Variation des précipitations moyennes mensuelles (1999-2024).....	30
Figure.I.11 : Variations des précipitations saisonnières.....	31
Figure.I.12 Variations des températures moyennes mensuelles, minimales et maximale.	32
Figure.I.13 : Diagramme pluvio-thermique de Bagnouls et Gaussen.	34
Figure.I.14 : Climagramme d'EMBERGER.	36
Figure.I.15 : Evapotranspiration.	37
Figure.I.16 : Abaque de P.Verdeil.	40

Chapitre II:

Figure.II. 1 : Colonne lithostratigraphique des Monts de Tlemcen jusqu'aux hautes plaines	47
Figure.II. 2 : Formations réservoirs dans la région de Tlemcen (Collignon.B,1984 in Benmoussat.A,2012).	48
Figure.II. 3 : Carte géologique.	50
Figure.II. 4 : Carte de linéaments.....	52

Chapitre III :

Figure.III. 1 :Délimitation sous bassin versant de Sikkak selon(https://mghydro.com/watersheds/).	57
Figure.III. 2 : extraction des données manquantes selon (https://www.climateengine.org/).	58
Figure.III. 3 : Extraction des images satellitaires selon (https://earthexplorer.usgs.gov/).	59
Figure.III. 4: images satellitaires.....	60
Figure.III. 5 : carte géologique interprétative ANRH (1/20000).	61
Figure.III.6 : Organigramme pour l'élaboration de la carte des potentialités hydriques.	67

ملخص:

تُعدّ تحديد مناطق تزويد المياه الجوفية من القضايا الأساسية لتحقيق إدارة مستدامة للموارد المائية، خاصةً في المناطق شبه الفاحلة مثل شمال غرب الجزائر. يهدف هذا البحث إلى تحديد ورسم خرائط المناطق ذات الإمكانية العالية للتزويد في الحوض الفرعي لسد سڭاك. ولتحقيق ذلك، تم اعتماد منهجية تعتمد على نظم المعلومات الجغرافية (GIS) والاستشعار عن بعد (RS) لتحليل عدة عوامل تؤثر على التزويد مثل الجيولوجيا، التساقطات، الارتفاع، الانحدار، استعمالات الأرض، الغطاء الأرضي، شبكة التصريف وكثافة الخطوط البنيوية.

تم استخدام طريقة التحليل الهرمي (AHP) لتحديد الأوزان النسبية لكل عامل وترتيب الطبقات حسب تأثيرها على قابلية المنطقة للتزويد. مكّنت هذه الطريقة من إنتاج خريطة موضوعية تُميز بين خمس فئات من الإمكانية: ضعيفة جداً، ضعيفة، متوسطة، جيدة وجيدة جداً.

أظهرت النتائج أن المناطق ذات الإمكانية العالية للتزويد تتواجد بشكل أساسي في المناطق التي تتوفر على نفاذية عالية، وكثافة مرتفعة للخطوط البنيوية، وانحدارات منخفضة، وغطاء نباتي ضعيف.

توفر الخرائط المنتجة أداة قيمة لصانعي القرار ومُدبري الموارد المائية في إطار التخطيط ووضع استراتيجيات لحماية واستغلال الموارد الجوفية. كما يُمكن أن تُشكّل هذه الدراسة قاعدة لأبحاث مستقبلية أكثر تفصيلاً في مجال النمذجة الهيدرولوجية أو الهيدرولوجية.

الكلمات المفتاحية: الحوض الفرعي لسد سڭاك؛ نظم المعلومات الجغرافية؛ الاستشعار عن بعد؛ إمكانيات التزويد؛ الإدارة المستدامة.

Résumé :

La localisation des zones de recharge des eaux souterraines est un enjeu majeur pour une gestion durable des ressources en eau, en particulier dans les régions semi-arides, comme le Nord-Ouest de l'Algérie. Le présent mémoire a pour objectif d'identifier et de cartographier les zones potentielles de recharge dans le sous-bassin versant de Sikkak. Pour cela, une approche combinant les Systèmes d'Information Géographique (SIG) et la télédétection (RS) a été utilisée afin d'analyser plusieurs paramètres influençant la recharge : géologie, précipitations, altitude, pente, occupation du sol, utilisation du sol, drainage et densité des linéaments. La méthode du Processus Hiérarchique Analytique (AHP) a été appliquée pour attribuer des pondérations aux différents facteurs et hiérarchiser les classes, selon leur influence sur le potentiel de recharge. Les résultats ont permis de produire une carte thématique distinguant cinq classes de potentiel de recharge : très faible, faible, modéré, bon et très bon.

L'analyse a révélé que les zones à potentiel de recharge élevé se situent principalement dans les secteurs caractérisés par une perméabilité favorable, une forte densité de linéaments, des pentes faibles et une couverture végétale réduite.

Les cartes produites offrent un outil précieux pour les décideurs et les gestionnaires de l'eau dans le cadre de la planification et de la mise en place de stratégies de préservation et de valorisation des ressources en eaux souterraines. Ce travail servira également de base pour des recherches futures, notamment dans le cadre de modélisations hydrogéologique ou hydrologique plus détaillées.

Mots-clés : Sous-bassin de Sikkak ; SIG ; Télédétection ; Potentiel de recharge ; Gestion durable.

Abstract:

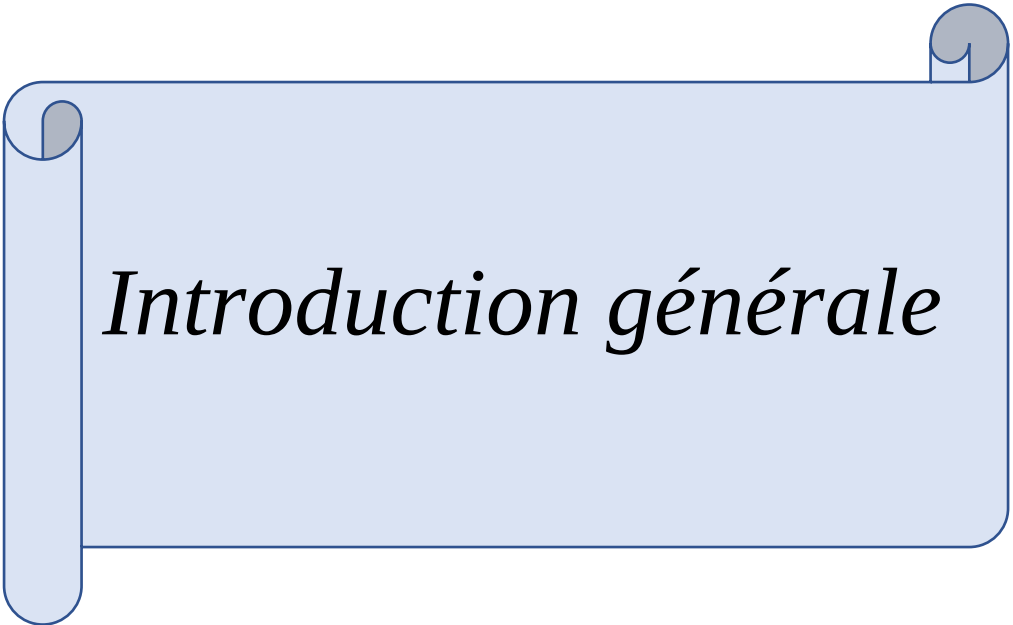
Identifying groundwater recharge zones is a key challenge for sustainable water resource management, especially in semi-arid regions like northwestern Algeria. This study aims to identify and map the potential recharge zones in the Sikkak sub-watershed. To achieve this, a combined approach using Geographic Information Systems (GIS) and Remote Sensing (RS) was employed to analyze several parameters influencing recharge: geology, precipitation, elevation, slope, land use, land cover, drainage, and lineament density.

The Analytic Hierarchy Process (AHP) method was applied to assign weights to the various factors and prioritize the classes based on their influence on recharge potential. The results allowed the production of a thematic map distinguishing five classes of recharge potential: very low, low, moderate, good, and very good.

The analysis revealed that areas with high recharge potential are mainly located in zones characterized by favorable permeability, high lineament density, gentle slopes, and low vegetation cover.

The produced maps provide a valuable tool for decision-makers and water managers in planning and implementing strategies for the protection and sustainable use of groundwater resources. This work also serves as a basis for future studies, particularly in more detailed hydrogeological or hydrological modeling.

Keywords: Sikkak sub-watershed; GIS; Remote Sensing; Recharge Potential; Sustainable Management.



Introduction générale

Introduction Générale :

L'eau souterraine est une ressource vitale, en particulier dans les zones semi-arides comme le Nord-Ouest de l'Algérie, où les précipitations sont irrégulières et faibles. Dans ces conditions, l'exploitation des ressources en eau souterraine devient une nécessité pour répondre aux besoins croissants en eau potable, en irrigation et pour l'industrie. Toutefois, l'identification des zones favorables à la recherche et à l'exploitation des eaux souterraines repose sur une compréhension approfondie des caractéristiques morpho-métriques, géologiques, structurales et des autres facteurs influençant la recharge des nappes.

L'évolution du climat accentue la précarité hydrique, particulièrement dans les régions arides et semi-arides. En effet, les conséquences du changement climatique se manifestent par une réduction des précipitations conjuguée à une intensification de l'évapotranspiration. Cette double contrainte détériore significativement le bilan hydrique territorial et renforce l'urgence d'adopter des stratégies de gestion durable des ressources en eau. Face à cette vulnérabilité accrue, la mise en place de politiques de préservation et d'utilisation raisonnée de l'eau devient non seulement prioritaire, mais indispensable pour assurer la résilience des écosystèmes et des communautés humaines dans ces zones fragiles.

Le sous-bassin versant de Sikkak, situé dans la wilaya de Tlemcen est une zone sensible pour la gestion des eaux souterraines. Face à la demande croissante et les changements du climat, une problématique se pose : comment identifier et valoriser durablement les zones à fort potentiel hydrogéologique, afin de répondre aux besoins en eau, tout en préservant la ressource ?

Pour répondre à cette problématique, cette étude adopte une approche intégrée, combinant la télédétection et les Systèmes d'Information Géographique (SIG). Ces outils permettent d'analyser plusieurs critères environnementaux et de produire une cartographie des zones favorables à l'exploration et à la gestion durable des eaux souterraines. L'identification des zones prioritaires repose sur l'analyse croisée de plusieurs cartes thématiques. Grâce à l'utilisation du SIG et de la télédétection, cette étude permet d'établir des cartes précises des zones favorables à la recharge. Ces résultats offrent des outils d'aide à la décision pour les gestionnaires et autorités locales.

Les objectifs spécifiques de cette étude sont les suivants :

1. Délimiter le sous-bassin versant de Sikkak à l'aide des outils géomatiques et des données topographiques disponibles.
2. Analyser les caractéristiques hydrogéologiques et géomorphologiques pour mieux comprendre les processus d'infiltration et de recharge.
3. Repérer les zones naturelles de recharge, en étudiant la perméabilité des sols, la pente, la couverture végétale et les précipitations.
4. Cartographier les zones favorables à la recharge des nappes, à l'aide d'une méthode multicritère sous SIG.

5. Formuler des recommandations pour la gestion durable des ressources en eau, en insistant sur les zones à préserver ou à valoriser.

***Premier chapitre :
Morphométrie-climatologie.***

Premier chapitre : Morphométrie-climatologie

Introduction :

Le sous-bassin versant de Sikkak qui fait l'objet de notre étude est situé dans la région de Tlemcen, présente des caractéristiques naturelles variées qui influencent son fonctionnement hydrologique. Une analyse approfondie de sa situation géographique, de sa morphométrie, de ses formes ainsi que de son climat est essentielle pour comprendre les dynamiques hydrologiques qui s'y développent.

Ce chapitre vise ainsi à présenter les principaux traits géographiques et morphométriques de la zone d'étude, à analyser ses caractéristiques de forme, à étudier les facteurs climatiques dominants et à dresser un premier bilan hydrologique. Cette approche permettra de mieux cerner le comportement du sous-bassin et d'orienter la recherche des zones d'intérêt hydrogéologique.

Cette zone d'étude est un sous-bassin versant du bassin de la Tafna, ce dernier est situé dans le Nord-Ouest de l'Algérie, et joue un rôle important sur le plan hydrologique et socio-économique. Il constitue une ressource essentielle en eau pour l'alimentation en eau potable, l'irrigation et les activités industrielles.

Avec une superficie de d'environ 7250m², Le bassin de la Tafna s'étale sur une deux wilayas (Tlemcen et Témouchent) et une partie au Maroc. Caractérisé par un climat Méditerranéen, semi-aride avec des précipitations irrégulières, le principal cours d'eau de ce bassin est la Tafna, prend naissance dans les montagnes de Tlemcen (près de Sebdou) avant de se jeter dans la mer Méditerranée.

Son réseau hydrographique comprend plusieurs affluents, citons par exemple:

- L'Oued Sikkak.
- L'Oued Isser.
- L'Oued Boukiou.
- L'Oued Chouly.
- L'Oued Sebdou.
- L'Oued Mouillah.

I-Situation géographique de sous bassin versant de Sikkak :

Le sous bassin versant de Sikkak est situé au Nord-Ouest de l'Algérie avec $1^{\circ} 20' 28,27''$ Ouest de longitude, $35^{\circ} 02' 50,29''$ Nord de latitude et 605 m d'altitude.

Il est limité :

- Au Sud : par les Djebels Nador Bouladour.
- A l'Est : par les Djebels Er Ramlya, Ouakrif et Tabelaout.
- A l'Ouest : par le Djebel Tiffatisset et le plateau de Zenata.
- Au Nord : par le Djebel Fout Hait.

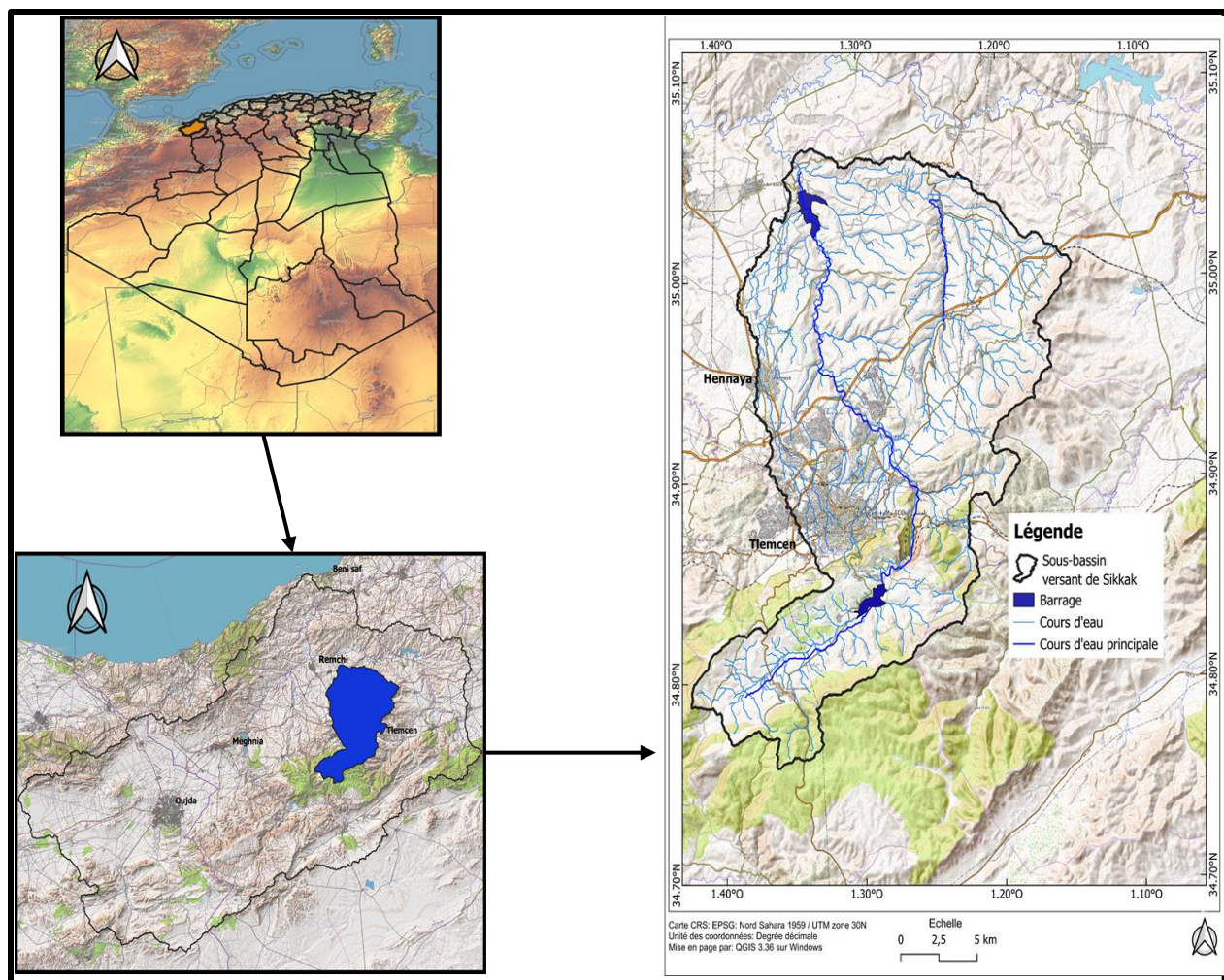


Figure. I. 1 : Localisation de la zone d'étude.

II- Morphométrie du sous bassin versant de Sikkak :

L'écoulement naturel des eaux dans un bassin versant est influencé à la fois des conditions climatiques et des propriétés physiques du bassin. Parmi ces caractéristiques, la forme, le relief et le réseau hydrographique, ils occupent une place essentielle et sont pris en compte dans l'analyse morphométrique. En plus de cette analyse, d'autre paramètre comme la densité de drainage, la fréquence des cours d'eaux, ainsi que leur allongement et leur profil, sont également considéré.

II-1- Caractéristiques de forme :

La forme d'un bassin versant joue un rôle déterminant dans la dynamique hydrologique. En effet, la morphologie du bassin versant, caractérisée par sa géométrie, son étendu, ses contours et ses subdivisions, exerce une influence directe sur les processus hydrologiques. La manière dont les eaux pluviales sont collectées, stockées et évacuées dépend fortement de la forme du bassin, qui conditionne la vitesse et le volume des débits. Une forme allongée, par exemple, favorise une concentration plus lente des écoulements, tandis qu'une forme plus compacte ou arrondie accélère la réponse hydrologique. Par ailleurs, la répartition des précipitations, la topographie et la connectivité des sous-bassins sont également des éléments

clés qui, en interaction avec la forme générale, régissent la dynamique de l'eau dans l'écosystème aquatique. Ainsi, comprendre la relation entre la morphologie du bassin versant et ses réponses hydrologiques est essentiel pour la gestion des ressources en eau, la prévention des inondations et l'aménagement du territoire.

II-1-1- L'indice de Compacité de Graveluis :

C'est le rapport entre le périmètre du bassin et la circonférence d'un cercle de même superficie (MERKACHE.S), il est exprimé par la relation suivante.

$$Kc = \frac{P}{\sqrt{A}} \times 0.28 \quad (01)$$

$$Kc = 2,16.$$

Kc : Indice de compacité de Gravelius.

P : Périmètre du bassin versant (km).

A : Aire du bassin versant (km²).

Si Kc = 1 pour un bassin versant de forme quasiment circulaire

Si Kc > 1 le bassin est de forme allongée

Si Kc < 1 le bassin est de forme ramassé

Le report des paramètres morphométriques (A,P) sur cet indice nous a montré que le bassin de Sikkak est de forme allongée, ce qui favorise l'érosion linéaire et régressive.

II-1-2- Rectangle équivalent :

C'est une notion introduite pour pouvoir comparer les bassins entre eux du point de vue influence de la forme sur l'écoulement. On détermine la longueur et la largeur du rectangle donnant la même superficie et le même indice de compacité que ceux du bassin versant considéré (Ghenim.O).

Longueur du rectangle équivalent

$$L = \frac{kc\sqrt{A}}{1,12} \left[1 + \sqrt{\left(1 - \frac{1,12}{kg}\right)^2} \right] \quad (02)$$

L : Longueur du rectangle équivalent

Largeur du rectangle équivalent :

$$l = \frac{kg\sqrt{A}}{1,12} \left[1 - \sqrt{\left(1 - \frac{1,12}{kg}\right)^2} \right] \quad (03)$$

l: Largeur du rectangle équivalent

Le report des paramètres morphométriques (A,P) sur cet indice nous a montré que la longueur du rectangle équivalent est de le bassin de 61,07Km et la largeur l es de 21,37km Sikkak.

Tableau.I. 1 : Caractéristiques de forme de la zone d'étude.

Sous Bassin	Surface (Km ²)	Périmètre (Km)	KC	Rectangle équivalent	
				Longueur (Km)	Largeur (Km)
Sikkak	456,964	165,496	2,16	61,07	21,37

II-1-3- Le coefficient de circularité du bassin :

Le coefficient de circularité du bassin correspond au rapport entre la superficie du bassin versant et celle d'un cercle ayant le même périmètre (BOUANANIA, 2004).

Il est défini par la relation suivante

$$Rci = \frac{4\pi \times A}{P^2} \quad (4)$$

Rci = 0,20. Donc la forme est allongée.

Avec :

Rci : Coefficient de Circularité.

A : la surface du bassin versant (km²).

P : le périmètre du bassin versant (km).

Une valeur de 1 correspond à une forme parfaitement circulaire, tandis qu'une valeur de 0,20 indique une forme allongée.

III- Etude du réseau hydrographique :

Le sous bassin versant de Sikkak prend sa source à Ain Rhannous, sur le plateau de Terni, au Sud de Tlemcen. Il constitue un affluent de rive gauche de l'Oued Isser, qui à son tour, se jette en rive droite dans la Tafna. La confluence de ces deux cours d'eau se situe au Nord d'Ain Youcef. L'Oued Amyer, affluent rive droite, dont la confluence avec l'Oued Sikkak se situe à l'Est d'Ain Youcef.

La délimitation du réseau hydrographique par le QGIS confirme que la forme déduite par l'équation de Graveluis est de forme allongée.

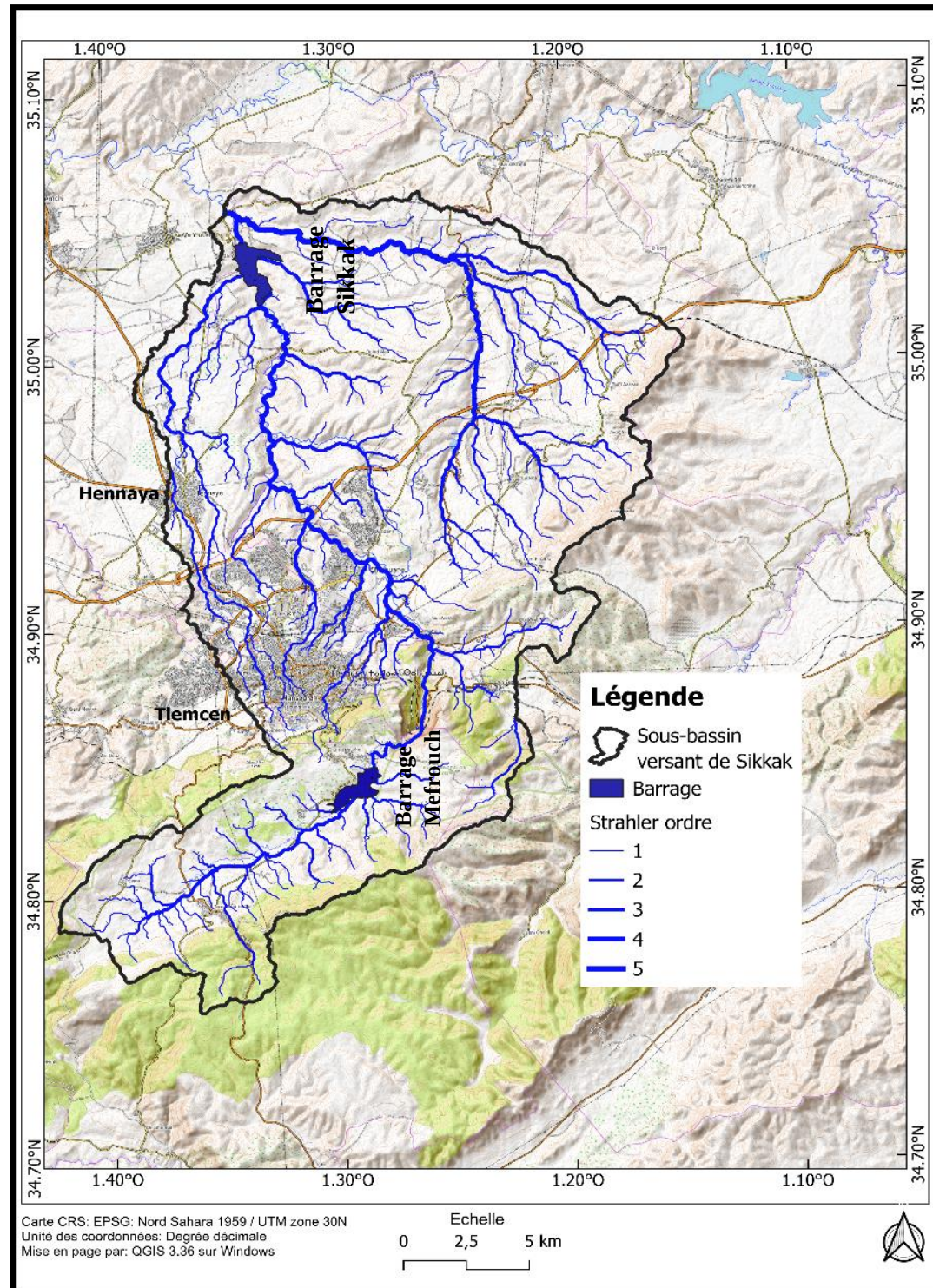


Figure. I.2 : Réseau Hydrographique du sous bassin versant d'Oued Sikkak.

Cette carte représente le sous-bassin versant de Sikkak, situé au Nord-Ouest de l'Algérie, avec des éléments hydrologiques clés.

1. Délimitation du sous-bassin : La zone entourée en noir représente les limites du sous-bassin versant de Sikkak. Cela signifie que toute l'eau de ruissellement dans cette zone converge vers un point de sortie commun, généralement un cours d'eau principal ou un barrage.

2. Le réseau hydrographique et sa classification :

Les cours d'eau sont classés selon l'ordre de Strahler (numéros 1 à 5), qui permet d'évaluer leur hiérarchie.

Les ordres inférieurs (1 et 2) correspondent aux petits ruisseaux formés par le ruissellement local. Les ordres supérieurs (3 à 5) indiquent des cours d'eau plus importants, résultants de la convergence de plusieurs affluents.

3. Le barrage : Il est indiqué en bleu foncé dans la partie nord-ouest du sous-bassin. Il sert à la rétention d'eau pour l'irrigation, l'alimentation en eau potable ou la régulation des crues.

III-1- Densité de drainage (Dd) :

La densité de drainage est un indicateur hydrologique essentiel qui quantifie le niveau d'organisation du réseau hydrographique au sein d'un bassin versant. Elle permet également d'analyser les interactions entre les précipitations, l'infiltration et le ruissellement. Une densité élevée peut traduire un risque accru d'érosion des sols et de crues rapides, tandis qu'une densité plus faible suggère une meilleure capacité de rétention et d'infiltration de l'eau, favorisant ainsi la recharge des nappes phréatiques. Elle correspond au rapport entre la longueur totale des cours d'eau (ruisseaux, rivières, torrents...) et la superficie du bassin considéré. Exprimée en kilomètres par kilomètre carré (km/km²), elle se calcule selon la formule suivante :

$$Dd = \frac{Lr}{A} \quad (5)$$

$$D_d = 1.18 \text{ km.}$$

Avec :

D_d : densité de drainage en (km/km²).

L_r : longueur cumulée de tous les thalwegs du bassin ($L_r = 542,974 \text{ km}$).

A : Surface du bassin en (km²).

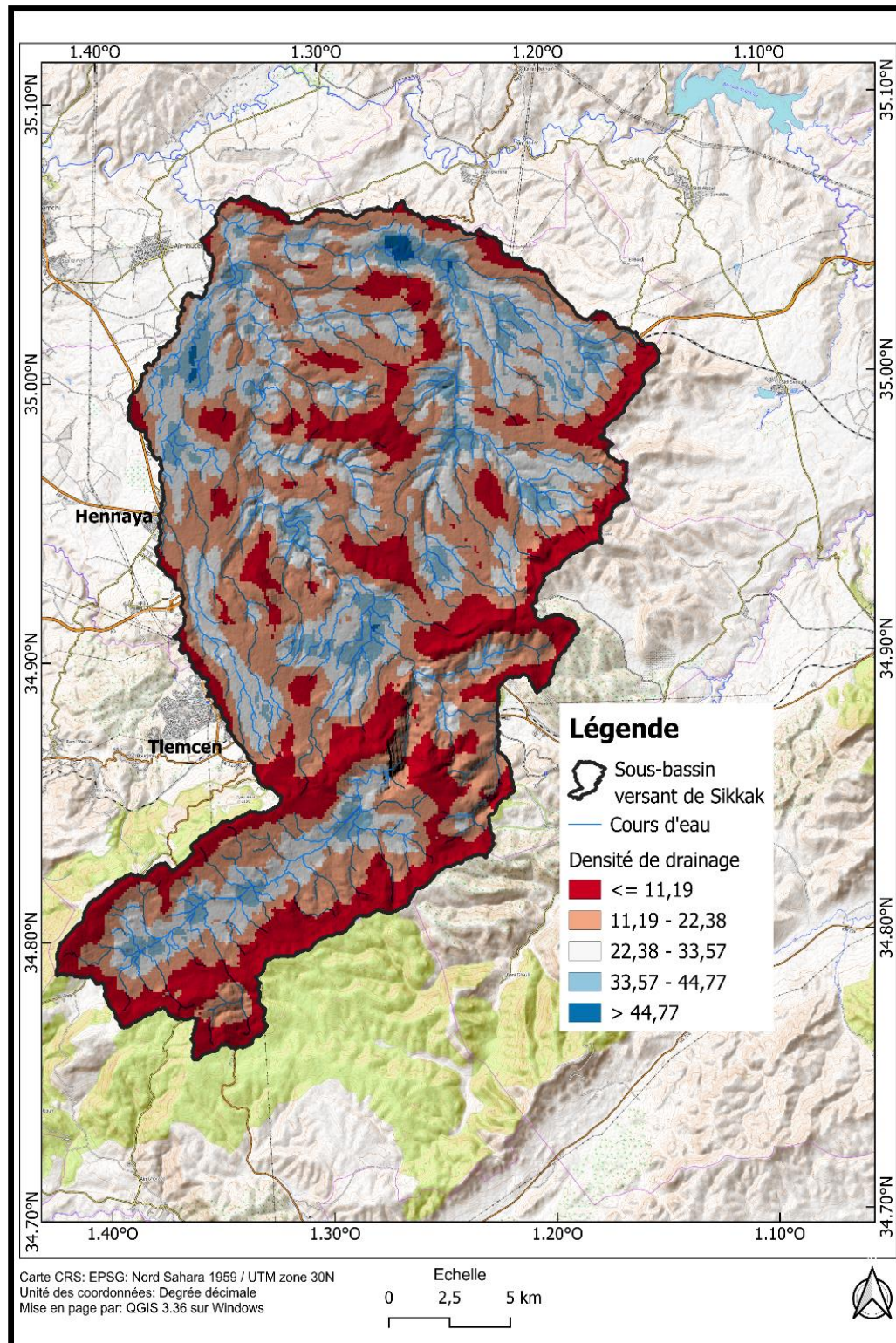


Figure.I.3 : Carte de densité de drainage du sous bassin versant de Sikkak.

Cette carte représente la densité de drainage du sous-bassin versant de Sikkak, exprimée en kilomètres par kilomètre carré. Elle indique la longueur totale des cours d'eau par unité de surface. Les intervalles des densités sont présentés par les couleurs suivantes :

Rouge foncé ($\leq 11,19$) : Zones à faible densité de drainage. Ces zones ont une infiltration potentiellement plus élevée, ce qui pourrait favoriser la recharge des nappes.

Brun clair (11,19 - 22,38) : Densité de drainage modérée-faible. Possibilité d'infiltration modérée.

Bleu clair à bleu foncé (22,38 - 44,77) : Zones à forte densité de drainage. L'eau s'écoule rapidement, réduisant le temps d'infiltration. Ces zones sont souvent situées dans des zones de pente élevée ou sur des sols peu perméables.

Zones bleues (forte densité) $> 44,77$: Concentrées vers le Nord et le long des cours d'eau. La forte densité indique une évacuation rapide des précipitations, réduisant les possibilités de recharge.

On note que les faibles densités de drainage (zones rouges) se concentrent au centre et au Sud du sous-bassin. Ces secteurs pourraient être des zones de recharge potentielle si les caractéristiques du sol et du sous-sol le permettent.

Les fortes densités (zones bleues) sont situées à l'extrémité nord et le long des cours d'eau. Une forte densité traduit une évacuation rapide des précipitations, limitant ainsi les possibilités de recharge.

III-2- Rapport de confluence :

Ce paramètre correspond au rapport entre le nombre de thalwegs d'un ordre et celui de l'ordre immédiatement supérieur (BOUANANI.A, 2004).

Il est exprimé par la relation suivante :

$$Rc = \frac{N_n}{N_{n+1}} \quad (6)$$

Où :

Rc : Rapport de confluence.

N_n : Nombre de cour d'eau d'ordre n.

N_{n+1} : Nombre de cours d'eau d'ordre suivant.

Tableau.I.2 : Classification des fréquences des cours d'eau et leurs interprétations (MORISAWA, M.E .1985).

Rc	Classification	Interprétation
$2 \leq Rc < 3$	Faible	Faible risque de crues, faible risque de crues, structure peu complexe, drainage modéré à lent et bon potentiel d'infiltration
$3 \leq Rc < 4$	Moyen	Risque modéré de crues, Réseau moyennement ramifié, Bonne hiérarchisation, Structure équilibrée Drainage équilibré, Infiltration modérée
$4 \leq Rc < 5$	Élevé	Risque moyen de crues, Réseau bien ramifié, Forte hiérarchisation, Structure complexe - Drainage rapide, Faible infiltration
$Rc \geq 5$	Très élevé	Risque élevé de crues, Réseau très ramifié, Très forte hiérarchisation, Structure très complexe, Drainage très rapide, Très faible infiltration, Risque très élevé de crues

En appliquant l'équation sur les caractéristiques morphométriques du bassin versant, notamment l'ordre et le nombre de thalwegs, nous avons pu constater le Rapport de confluence (Rc) du sous-bassin du Sikkak présente une valeur globale moyenne de 3,22, reflétant la structure hiérarchique du réseau hydrographique (voir tableau I.2 et I.3). L'analyse des valeurs du Rapport de confluence met en évidence une structure de drainage bien hiérarchisée, caractérisée par une variation notable des degrés de ramification entre les différents ordres (de 3,00 à 4,66). La valeur maximale de 4,66 observées au niveau de l'ordre 3 indique une zone de ramification particulièrement intense à ce niveau du réseau (voir tableau I.3). Cette configuration, associée à la valeur moyenne de 3,22 pour l'ensemble du bassin, suggère un réseau hydrographique modérément ramifié avec un potentiel de convergence des eaux relativement rapide, particulièrement marqué aux ordres supérieurs.

Tableau.I. 3 : Rapport de confluence.

Ordre	Nombre de thalwegs	Rc
1	251	4,56
2	55	3,92
3	14	4,66
4	3	3
5	1	/
Le rapport de confluence globalement moyenne		3.22

III-3- La fréquence des cours d'eaux :

La fréquence des cours d'eau, aussi appelée fréquence fluviale ou hydrographique, est un paramètre morphométrique qui exprime le nombre total de cours d'eau présents dans un bassin versant par unité de surface. Cet indicateur permet d'évaluer la densité du réseau hydrographique en quantifiant

le nombre de cours d'eau ou de segments de rivières dans une région donnée (Fandi.2011). Elle est déterminée à l'aide de la relation suivante :

$$F = \frac{N}{A} \quad (7)$$

Avec :

F : La fréquence des cours d'eau (en nombre de cours d'eau par km⁻²),

N : Le nombre total de cours d'eau (ou segments de rivières) dans le bassin versant,

A : La superficie totale du bassin versant (en km²).

La fréquence des cours d'eau constitue un indicateur pertinent pour évaluer la capacité d'un bassin versant à drainer les eaux de pluie. Un réseau hydrographique dense, caractérisé par une fréquence élevée, est généralement associé à une réponse hydrologique rapide, ce qui peut accroître le risque de crues soudaines après des précipitations intenses. Par ailleurs, une fréquence élevée peut également refléter une érosion plus marquée, notamment dans les bassins versants aux sols fragiles et sensibles aux processus érosifs (voir tableau I.4).

Tableau.I. 4 : Classification des fréquences des cours d'eau et leurs interprétations (MORISAWA, M.E .1985).

Fréquence des cours d'eau	Classification	Interprétation
<0.5	Très faible	Développement limité du réseau avec de très forte infiltration possible
$0,5 \leq F < 1,0$	Faible à moyenne	Développement modéré du réseau avec forte infiltration possible
$1,0 \leq F < 2,0$	Moyenne à élevée	Bon développement du réseau
$F \geq 2,0$	Très élevée	Réseau très développé

En utilisant l'équation sur les caractéristiques morphométriques du bassin versant, notamment le nombre de thalwegs et la surface du sous bassin versant de la zone d'étude, la fréquence des cours d'eau égale à $F = 0,70 \text{ km}^{-2}$.

D'après le tableau mentionné I.4, cette valeur indique une fréquence moyenne à faible des cours d'eau, reflétant un réseau modérément développé avec un risque d'infiltration élevé. Ce phénomène s'explique probablement par des facteurs géologiques et climatiques défavorables.

IV- Etude de relief :

Le relief joue un rôle essentiel dans le régime hydrologique d'un bassin versant, influençant directement l'écoulement, l'infiltration et l'évaporation des eaux. En tant que facteur déterminant, il régit la dynamique des processus hydrologiques, notamment la vitesse de ruissellement, la capacité d'infiltration des sols et la répartition spatiale des précipitations. L'analyse du relief à

l'aide d'outils spécifiques est indispensable pour comprendre et modéliser le comportement hydrologique d'un bassin. Elle permet de prévoir la réponse du bassin face aux précipitations, d'évaluer les risques des crues et d'érosion, et d'identifier les zones propices à des mesures de gestion de l'eau, comme la construction des barrages ou des bassins de rétention. De plus, une connaissance approfondie du relief est cruciale pour la planification de l'utilisation des terres, notamment dans les zones agricoles et urbanisées, où l'infiltration et la gestion des eaux de ruissellement constituent des enjeux majeurs. L'exploitation de la courbe hypsométrique et du diagramme de fréquence altimétrique permet une analyse détaillée de la répartition altitudinale du bassin.

IV-1- La courbe hypsométrique :

La répartition altimétrique par tranches (tableau I.5) à partir de la carte (figure I.5) permet d'établir La courbe hypsométrique et le diagramme des fréquences altimétriques (fig. I-4).

La courbe hypsométrique fournit une vue synthétique sur la pente du bassin, donc du relief. Cette courbe représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude (**MERKACHE.S**).

Tableau.I. 5 : Répartition hypsométrique du bassin d'oued Sikkak.

Les altitudes	Surface (km ²)	Surface Cumulée (km ²)	Surface (%)	Surface Cumulée (%)
1500	38	38	8,31	8,31
1500-1200	200,054	238,054	43,77	52,08
1200-900	93,313	331,367	20,42	72,05
900-600	80,814	412,207	18,56	91,06
600-300	44,08	456,261	9,64	99,05
<300	0,703	456,964	0,15	100

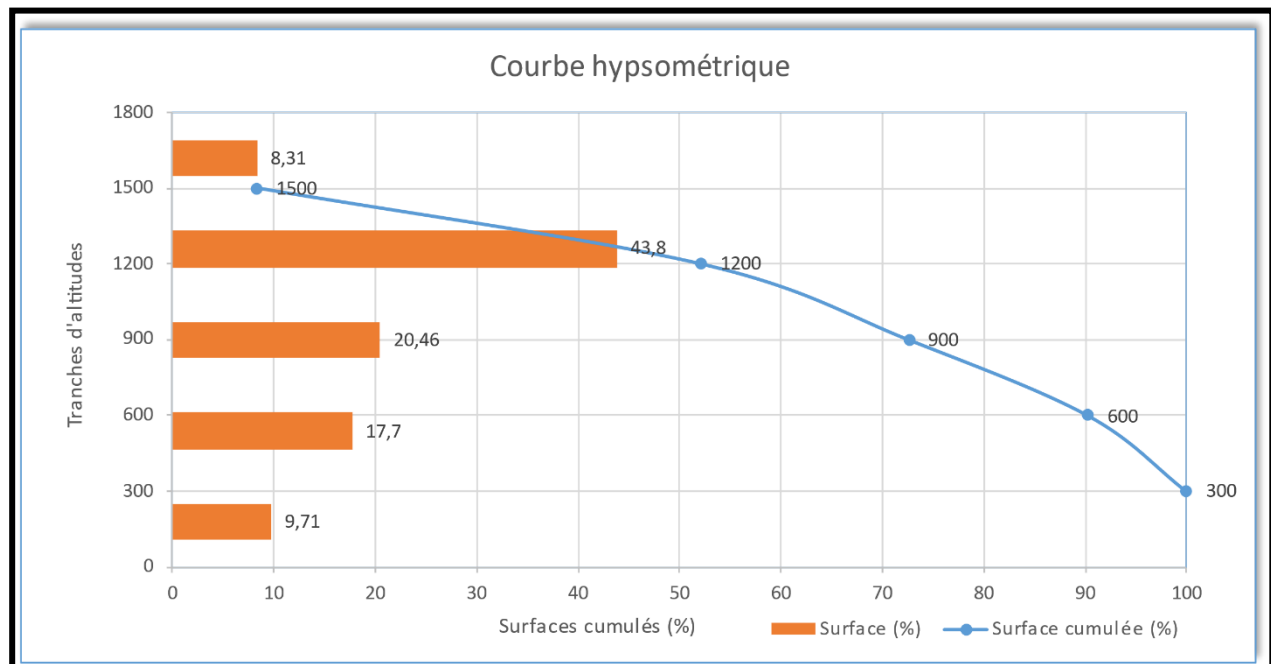


Figure.I.4 : Courbe Hypsométrique et histogramme des fréquences altimétriques de sous bassin versant du Sikkak.

Le sous bassin versant de Sikkak présente une configuration altitudinale caractéristique d'un système montagneux, avec une altitude moyenne de 969,88 m, s'étendant d'une altitude minimale inférieure à 300 m jusqu'à une altitude maximale de 1500 m. La distribution altitudinale révèle une dominance marquée de la tranche 1500-1200 m qui représente 43,77% de la surface totale, tandis que plus de la moitié du bassin (52,08%) se situe au-dessus de 1200 m, environ 72% au-dessus de 900 m, et plus de 90% (91,06%) au-dessus de 600 m, avec seulement 0,15% du territoire en dessous de 300 m. Cette configuration topographique, caractérisée par un relief marqué avec une dénivelée dépassant 1200 m et une structure étagée à prédominance d'altitudes moyennes à élevées, implique un système hydrologique dynamique avec un fort potentiel de ruissellement, des pentes importantes favorisant l'écoulement rapide, et un temps de concentration des eaux relativement court. Les caractéristiques morphologiques suggèrent un bassin versant jeune à mature, avec des processus d'érosion actifs et une dynamique de versant importante, entraînant des risques significatifs de crues rapides et d'érosion, particulièrement dans les zones de haute altitude. Cette configuration offre également des possibilités de zones de recharge dans les parties moyennes du bassin et un potentiel important pour les ressources en eau de surface, nécessitant une gestion attentive des processus de versant pour optimiser l'exploitation des ressources hydriques, tout en minimisant les risques associés.

L'analyse des courbes hypsométriques et de l'histogramme des fréquences altimétriques du sous-bassin versant du Sikkak a fourni des informations complémentaires sur la morphologie du relief, facilitant l'étude de certaines pentes, telle que :

- Altitude la plus fréquente : correspond au maximum de la courbe des fréquences altimétriques.
- Altitude H5% : représente l'altitude située au point d'abscisse 5 % de la surface totale du bassin, selon la courbe hypsométrique.

- Altitude de fréquence à 95 % : désigne l'altitude dépassée par 95 % de la surface totale du bassin versant.
- Altitude moyenne : correspond à la moyenne des altitudes représentées sur la courbe hypsométrique.

L'altitude moyenne se représente par l'équation suivant :

$$H_{moy} = \frac{\sum A_i \times H_i}{A} \quad (8)$$

Avec :

H_{moy} : Altitude moyenne du bassin (m).

A_i : La surface entre deux courbes de niveau (km²).

H_i : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau (m).

A : Superficie totale du bassin en (km²).

$$H_{moy} = 969.88 \text{ m.}$$

Grâce à l'utilisation du Modèle Numérique de Terrain (MNT), nous avons pu élaborer une cartographie précise de la répartition des altitudes dans le sous-bassin de Sikkak (Fig n° I.4). En tant que représentation tridimensionnelle fidèle de la surface terrestre, le MNT a permis d'étudier et de visualiser en détail la topographie complexe de cette zone. Cet outil de modélisation numérique s'est avéré particulièrement pertinent pour analyser les variations d'altitude et mieux appréhender la géomorphologie du bassin versant. Cela offre une vision détaillée et complète de la distribution spatiale des altitudes dans cette zone. Cette carte altimétrique constitue un support essentiel pour la gestion des ressources en eau et les études hydrologiques de la région, permettant notamment d'analyser les caractéristiques morphométriques du bassin et de mieux comprendre ses dynamiques.

La carte de répartition des altitudes (Fig n° I.4) a révélé que la partie nord du sous-bassin se distingue par des altitudes élevées, tandis que la partie sud se caractérise par des altitudes plus basses.

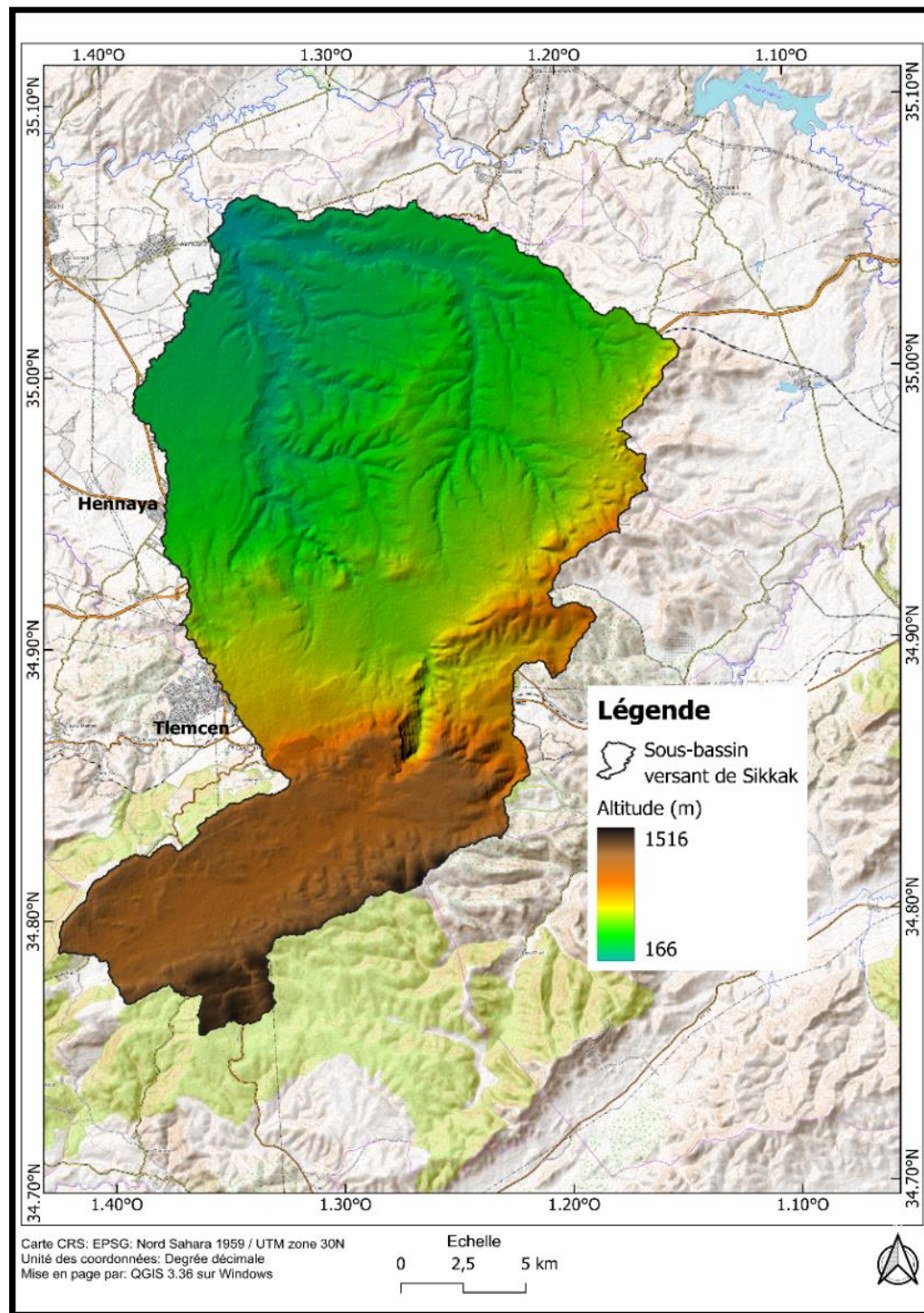


Figure.I.5 : Carte des altitudes du sous bassin versant de Sikkak.

IV-2- Les indices de pente et relief :

IV-2--1- Etude des pentes :

Les cartes des indices de pentes constituent des outils essentiels qui remplissent plusieurs objectifs fondamentaux dans l'analyse et la gestion des territoires. De plus, ces cartes jouent un rôle crucial dans l'analyse hydrologique et la gestion des bassins versants en permettant de prédire les modèles d'écoulement des eaux de surface et d'identifier les zones sujettes à l'érosion, ainsi qu'en facilitant la compréhension des déplacements d'eau à travers le sol, ce qui est essentiel pour la prévision des crues et la gestion des ressources en eau. Ces cartes représentent donc des outils fondamentaux pour la compréhension et la gestion efficace des bassins versants, offrant une approche intégrée de la gestion des ressources en eau et de l'aménagement du territoire.

L'élaboration des cartes des pentes de la zone d'étude (Fig I.6) a été réalisée grâce à l'utilisation combinée du Modèle Numérique de Terrain (MNT) et du logiciel QGIS, qui offrent ensemble des outils puissants pour l'analyse du relief. Cette cartographie des pentes constitue un outil essentiel pour diverses applications, notamment l'analyse du risque d'érosion, la planification territoriale, et la gestion des ressources en eau.

La carte n° I.6, montre la répartition des pentes en degrés, classées en cinq catégories :

$\leq 5^\circ$ (vert clair) : Zones de faible pente, principalement situées dans le centre et le nord-ouest du bassin. Ces zones favorisent l'infiltration de l'eau et sont des secteurs potentiels pour la recharge des nappes phréatiques.

5 - 10° (jaune clair) : Pentes douces, favorables à l'infiltration, mais avec un ruissellement légèrement plus prononcé.

10 - 15° (orange clair) : Pentes modérées, où le ruissellement devient dominant, réduisant l'infiltration.

15 - 20° (orange foncé) et $> 20^\circ$ (rouge) : Zones de fortes pentes, concentrées principalement sur les pourtours du bassin, notamment le sud et l'est. Ces zones sont sujettes à un ruissellement rapide, limitant l'infiltration et augmentant le risque d'érosion.

Les zones de faible pente ($\leq 5^\circ$) sont les plus favorables à la recharge des nappes phréatiques, car l'eau a le temps de s'infiltrer dans le sol.

Les zones de pente modérée (5 - 10°) offrent encore un potentiel de recharge, bien que l'efficacité soit réduite par un ruissellement accru.

Les zones de forte pente ($> 10^\circ$) contribuent principalement au ruissellement de surface, limitant la recharge et favorisant l'érosion du sol.

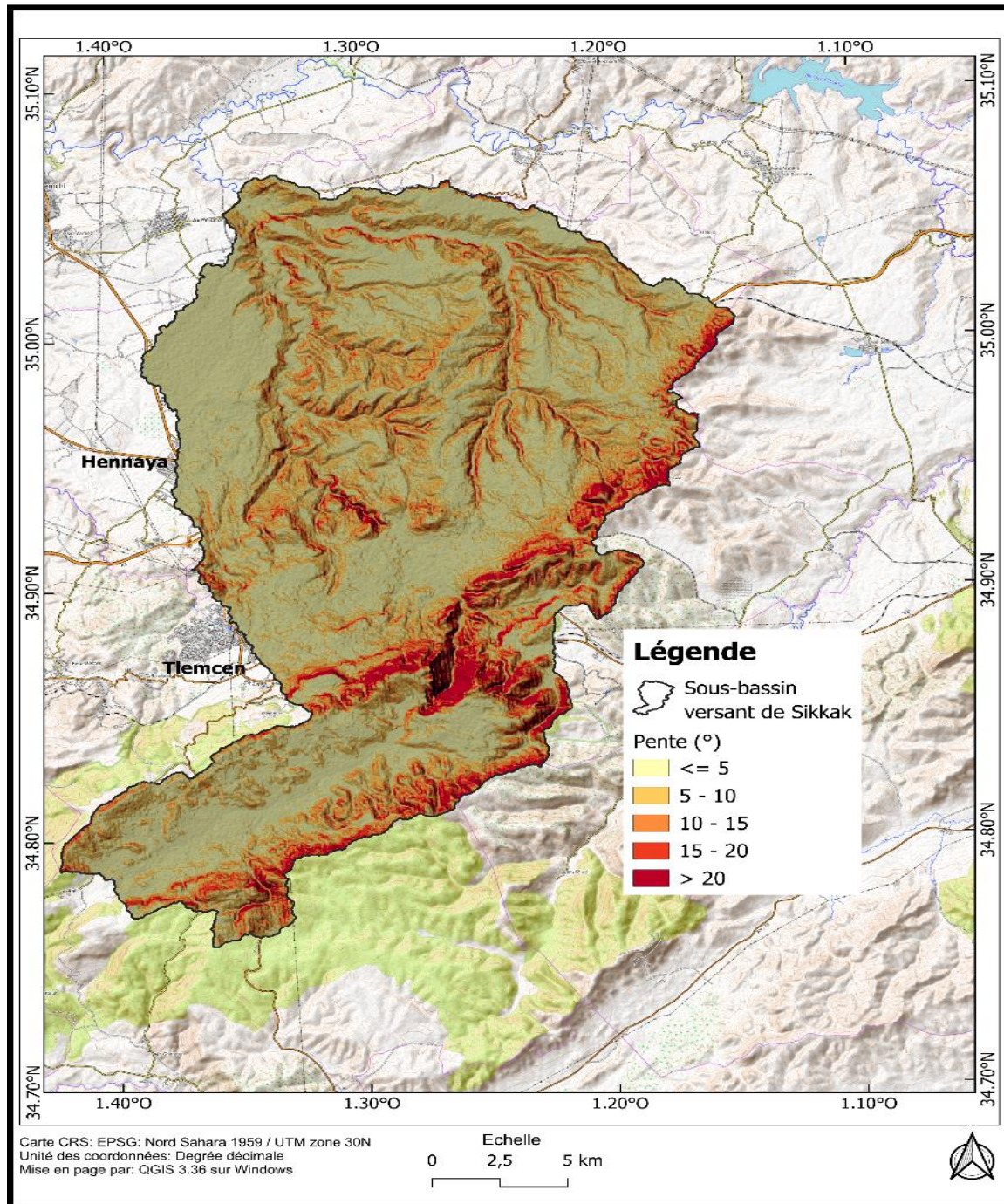


Figure.I.6 : Carte des pentes du sous bassin versant de Sikkak.

a- Indice de pente de Roche Ip :

L'indice de pente de roche est égal à la somme des racines carrées des pentes moyennes de chaque élément partiel compris entre deux courbes de niveau, pondéré par la surface partielle qui lui est associée et mesurées sur le rectangle équivalent (<https://www.techscience.com>). Il s'exprime par la formule (10).

$$Ip = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n \sqrt{Ai (Hi - Hi-1)} \quad (10)$$

Avec :

($H_i - H_{i-1}$) : Dénivelée entre deux courbes de niveau voisines (m).

L : Longueur du rectangle équivalent (m).

Ai : Surface partielle entre deux courbes de niveau (km²).

L'application de cette équation aux caractéristiques morphométriques de la zone d'étude (D et L) a donné $Ig = 0.46$. Cet indice de pente de roche (I_p) révèle que le bassin versant est caractérisé par des pentes modérées et présente des conditions géomorphologiques relativement stables. Cette valeur est indicative d'une stabilité géomorphologique modérée qui se manifeste par un équilibre harmonieux entre les forces érosives et le dépôt des sédiments, ainsi que par des conditions de pente intermédiaires favorisant une dynamique d'écoulement modérée. Sur le plan hydrologique, ces caractéristiques se traduisent par un ruissellement d'eau de surface modéré, une capacité d'infiltration équilibrée. Ainsi, cette valeur permet de qualifier le bassin versant comme ayant un relief modéré, offrant des conditions propices au maintien d'un équilibre entre les processus d'érosion et de sédimentation, tout en garantissant une stabilité relative des pentes. Cette configuration géomorphologique modérée contribue donc à une dynamique hydrologique équilibrée au sein du bassin versant.

b- Indice de pente globale Ig :

L'indice de pente globale est défini comme étant le rapport entre la dénivellation et la longueur de rectangle (<https://www.techscience.com>), Il a été calculé à partir de la formule (11).

$$Ig = \frac{D}{L} \quad (11)$$

Avec :

Ig : Indice de pente globale en (m/km).

D : la dénivelée H 5 % - H 95 % en (m).

L : la longueur du rectangle équivalent en (km).

L'application de l'équation d'OSTROM aux caractéristiques morphométriques de la zone d'étude (D et L) a donné Ig égal à 0.030. Selon la classification de l'ORSTOM, le sous bassin du Sikkak présente un relief assez fort.

Tableau.I. 6 : Classification du relief selon Ig par l'ORSTOM

Relief	Ig(m/km)
Relief très faible	$Ig < 0.002$
Relief faible	$0.002 < Ig < 0.005$
Relief assez faible	$0.005 < Ig < 0.01$
Relief modéré	$0.01 < Ig < 0.02$
Relief assez fort	$0.02 < Ig < 0.05$
Relief fort	$0.05 < Ig < 0.5$
Relief très fort	$Ig > 0.5$

c- Dénivelée spécifique Ds :

La Dénivelée spécifique (Ds) représente un paramètre hydrologique essentiel permettant de caractériser et de quantifier précisément le relief d'un bassin versant. Son calcul, effectué selon la formule :

$$Ds = Ig \times \sqrt{A} \quad (12)$$

Avec :

Ig : Indice de pente global (m/km).

A : Aire du bassin (km²).

Cet indicateur permet non seulement de quantifier avec précision les variations topographiques au sein du bassin versant, mais facilite également la classification standardisée des reliefs selon les critères établis par l'ORSTOM.

L'application de ces paramètres morphométriques (Ig et A) dans l'équation, nous a donné un Ds égale à 386.5, et selon la classification d'ORSTOM, le sous bassin versant de notre zone d'étude est caractérisé par un relief fort ($250 < 386.5 < 500$).

Tableau.I. 7 : Classification du relief selon Ds par l'ORSTOM.

Relief	Dénivelée spécifique(m)
Relief très faible	$D_s < 10$
Relief faible	$10 < D_s < 25$
Relief assez faible	$25 < D_s < 50$
Relief modéré	$50 < D_s < 100$
Relief assez fort	$100 < D_s < 250$
Relief fort	$250 < D_s < 500$
Relief très fort	$D_s > 500$

VI- Sol et végétation :

La végétation joue un rôle essentiel dans la régulation de l'écoulement superficiel, le taux d'évaporation et la capacité de rétention du bassin.

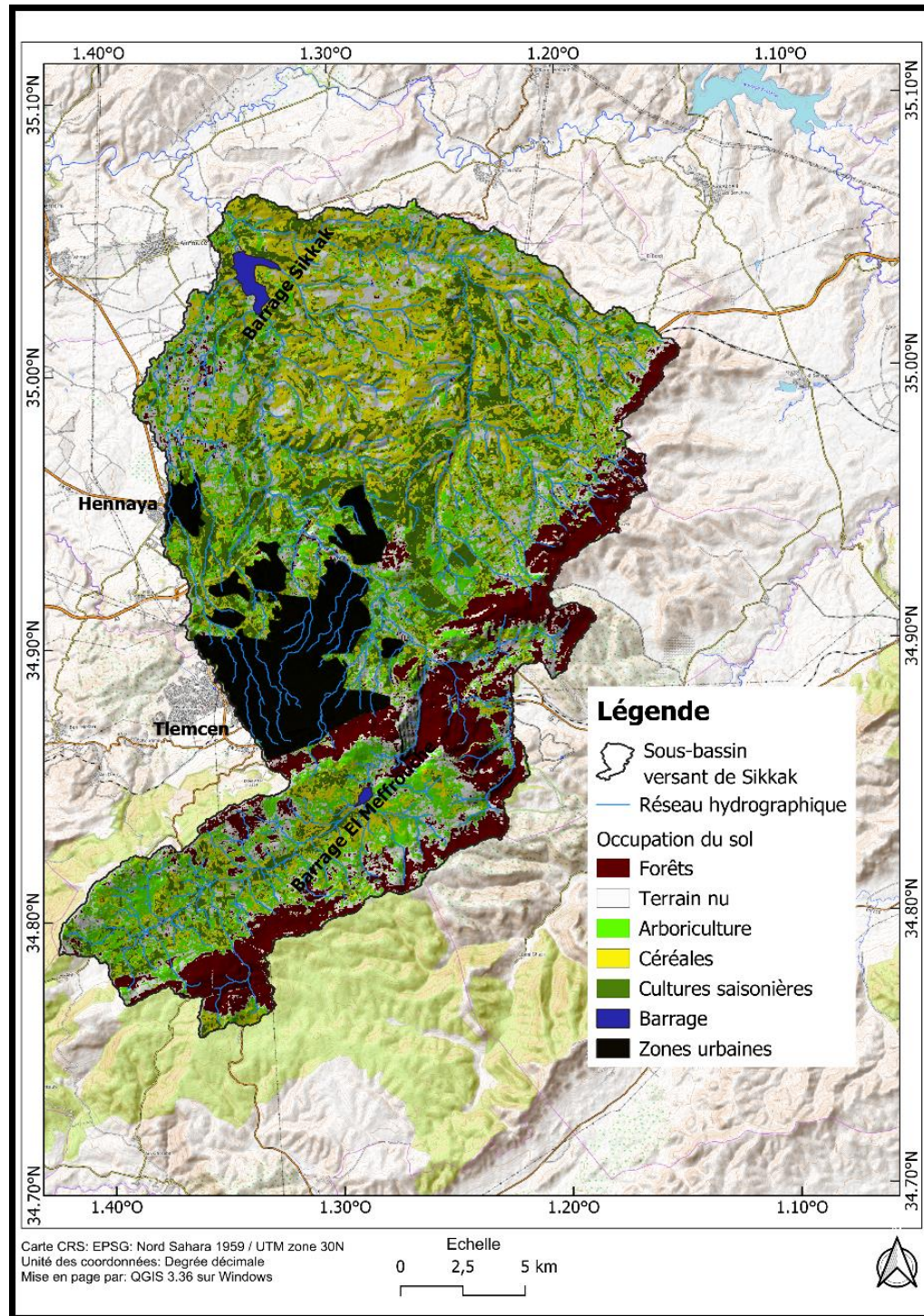


Figure.I.7 : Carte d'occupation du sol dans le sous bassin de Sikkak.

La carte représente l'occupation du sol et le réseau hydrographique du sous-bassin versant de Sikkak. L'occupation du sol est un facteur clé dans l'infiltration et le ruissellement des eaux, influençant ainsi le potentiel en eau souterraine dont les catégories de cette carte sont classées comme suit :

1. Forêts (vert foncé) : Situées principalement dans le centre et le Sud du bassin. Favorisent l'infiltration, grâce à la couverture végétale et à la structure des sols, ce qui peut contribuer à la recharge des nappes. Correspond généralement à des zones de potentiel en eau souterraine modéré à fort.
2. Terrains nus (marron foncé) : Situés dans le Sud et le Sud-Est du bassin, en lien avec les zones montagneuses. Forte susceptibilité au ruissellement, ce qui limite l'infiltration. Correspond souvent aux zones de faible potentiel en eau souterraine.
3. Arboriculture et cultures saisonnières (vert clair et jaune) : Présentes au centre et au Nord du bassin. Peuvent favoriser une infiltration locale, mais les pratiques agricoles (irrigation, compactage des sols) influencent cette dynamique. Ces zones correspondent à un potentiel moyen à fort en eau souterraine.
4. Zones urbaines (noir) : Localisées autour des villes comme Tlemcen et Hennaya. L'urbanisation réduit fortement l'infiltration, à cause de l'imperméabilisation des sols (routes, bâtiments). Ces zones coïncident souvent avec un potentiel faible en eau souterraine.

Notons que le réseau hydrographique est bien visible, traversant plusieurs types d'occupation du sol. Les zones alluviales le long des cours d'eau sont souvent des zones de recharge importantes, particulièrement dans le Nord du bassin.

VII- Etude Climatologique :

VII-1- Les précipitations :

Les précipitations représentent l'ensemble des formes d'eau d'origine atmosphérique qui atteignent la surface terrestre, qu'elles soient liquides (pluie) ou solides (neige, grêle). Elles constituent un paramètre hydrométéorologique fondamental, intervenant directement dans le cycle de l'eau, notamment dans l'alimentation des eaux de surface et la recharge des nappes souterraines. L'analyse spatiale et temporelle des précipitations dans un bassin versant permet d'évaluer le potentiel hydrologique et de mieux orienter la recherche en ressources en eau, en particulier dans le sous-bassin de Sikkak.

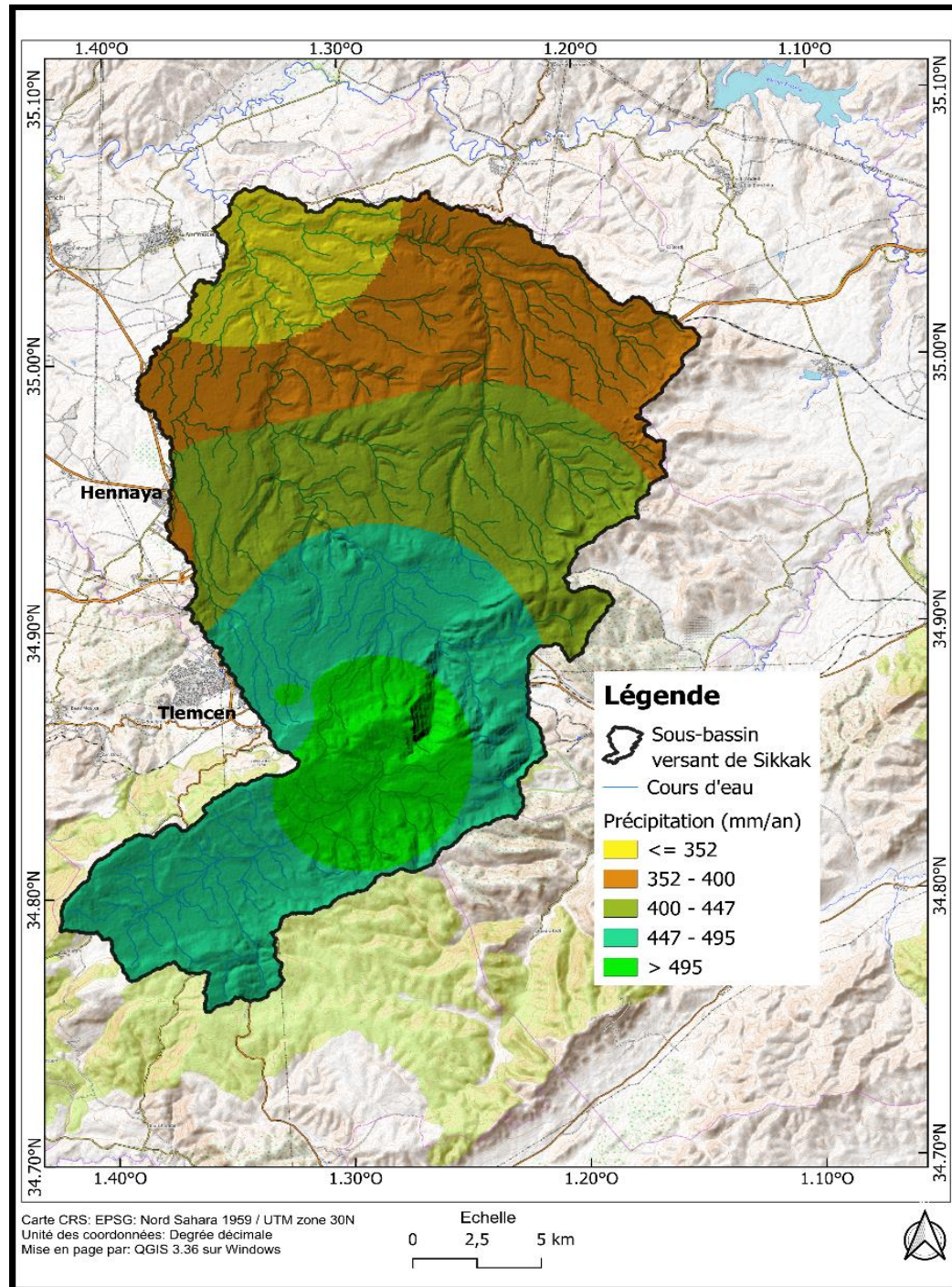


Figure.I.8: Carte des précipitations du sous bassin versant de Sikkak.

Cette carte représente la répartition spatiale des précipitations annuelles dans le sous-bassin versant de Sikkak, situé au Nord-Ouest de l'Algérie. Elle utilise une palette de couleurs pour indiquer différentes classes de précipitations annuelles (mm/an).

L'analyse de la distribution des précipitations dans le sous-bassin de Sikkak révèle une variation spatiale significative, caractérisée par un gradient nord-sud prononcé, où les précipitations s'intensifient progressivement depuis le Sud vers le Nord, une tendance largement influencée par la présence du relief montagneux. Cette distribution se manifeste particulièrement dans la zone centrale et méridionale du bassin, qui reçoit des précipitations supérieures à 447 mm/an, atteignant même plus de 495 mm/an dans la partie sud, coïncidant notamment avec les zones amont des cours d'eau. Cette configuration pluviométrique suggère un potentiel de recharge des aquifères particulièrement prometteur dans les secteurs méridionaux, sous réserve de conditions géologiques favorables, tandis que la partie Nord, caractérisée par une plus faible pluviométrie, présente une capacité de recharge plus limitée. Cette hétérogénéité climatique marquée entre le Nord et le Sud du bassin joue ainsi un rôle déterminant dans la distribution spatiale du potentiel de recharge des eaux souterraines, créant une dynamique hydrologique complexe au sein du sous-bassin de Sikkak.

VII-1-1- Les précipitations moyennes annuelles :

Les précipitations moyennes annuelles est la hauteur moyenne des précipitations (pluie et neige) tombant sur un lieu précis pendant une année, calculée sur un grand nombre d'années. Il s'agit en fait d'une moyenne, basée sur des données de longue durée, qui donne une idée du climat local en termes de quantité d'eau tombant chaque année. Les données utilisées sont ceux de la station climatologique de Sikkak durant la période allant de 1999 à 2024.

Tableau.I. 8 : Coordonnées de la station climatologique de Sikkak.

Station	Latitude	Longitude	Altitude
Sikkak	35°02'50.29"N	1°20'28.27"	605m

Tableau.I. 9 : Les précipitations moyennes annuelles (1999-2024).

Années	P (mm)	Années	P (mm)
1999	339	2012	225,1
2000	301	2013	264,1
2001	405	2014	348,8
2002	282	2015	236,3
2003	518	2016	320,9
2004	431	2017	278,3
2005	190,1	2018	363,7
2006	255,6	2019	306,8
2007	307,9	2020	235,4
2008	304,6	2021	192,3
2009	415,7	2022	330
2010	362,4	2023	179,6
2011	382,3	2024	141,6

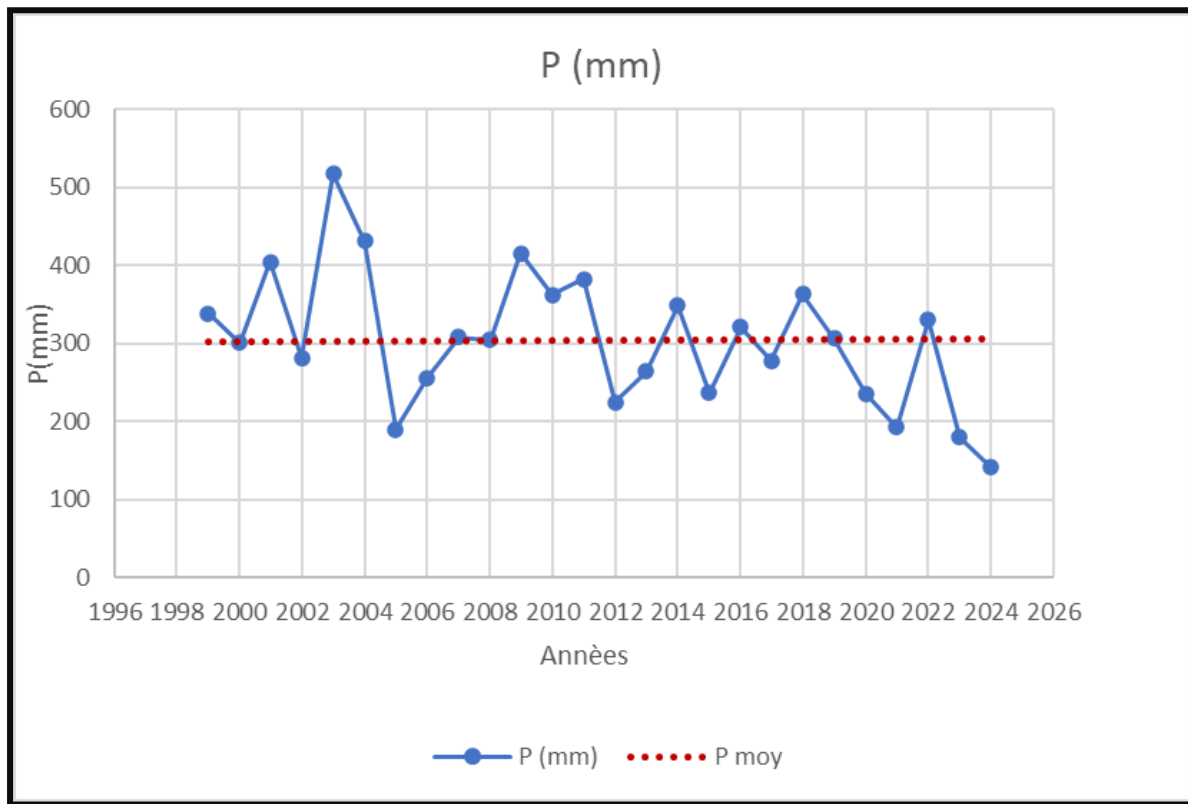


Figure.I.9 : Variation des précipitations moyennes annuelles du sous bassin de Sikkak (1999-2024).

Le graphe des précipitations annuelles du sous-bassin de Sikkak entre 1999 et 2024 montre une forte variabilité interannuelle où les précipitations maximales ont été enregistrées en 2004 avec environ 520 mm, et les valeurs minimales en 2024 avec environ 150 mm, tandis que la moyenne interannuelle des précipitations est de 300.4 mm.

VII-1-2- Les précipitations moyennes mensuelles :

Le graphique et le tableau des précipitations moyennes mensuelles (Fig5 I.10 et Tab I.9) du sous-bassin de Sikkak montre une variabilité marquée par des fortes précipitations pour le mois de janvier avec une moyenne de 52,3mm, tandis que le mois de juillet est le plus sec (0,6mm).

Tableau.I. 10 : Précipitations moyennes mensuelles (1999-2024).

Mois	JANV	FEV	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC
P(mm)	52,3	32,5	31,3	26,7	19,7	3,5	0,6	1,8	14,8	31,4	47,3	42,5

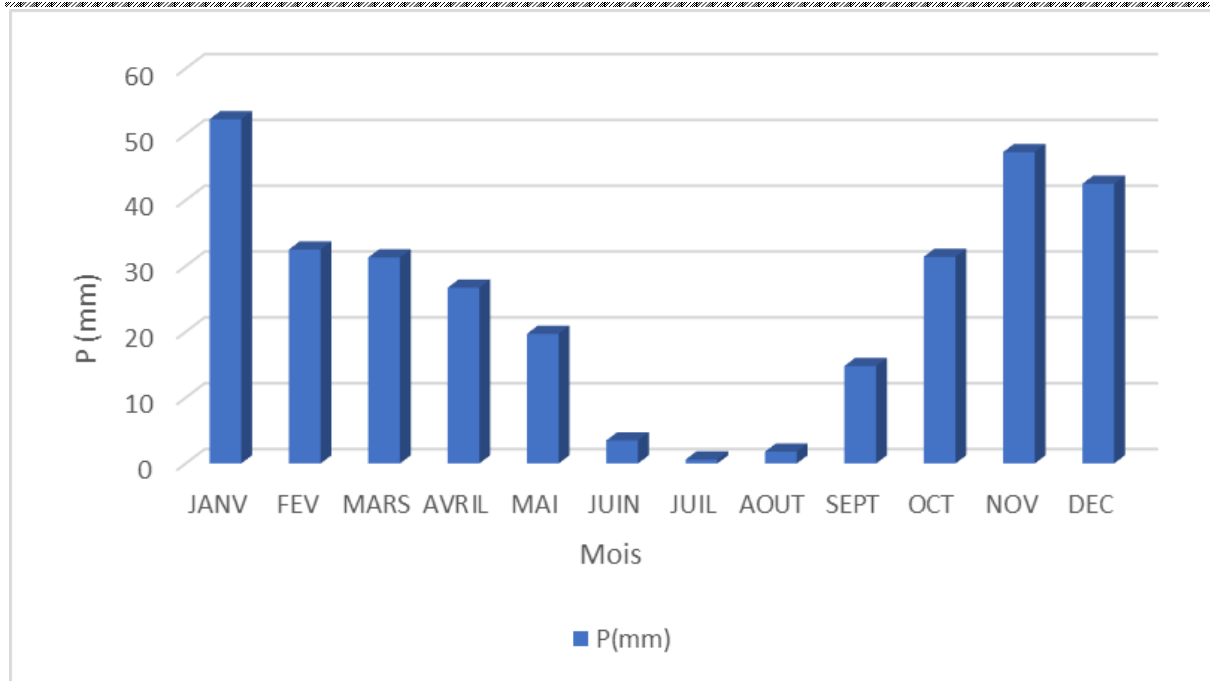


Figure.I.10 : Variation des précipitations moyennes mensuelles (1999-2024).

VII-1-3- Les précipitations saisonnières:

Tableau.I. 11 : Les précipitations saisonnières.

Saisons	Automme	Hiver	Printemps	Été
P (mm)	93,5	127,3	77,7	5,9

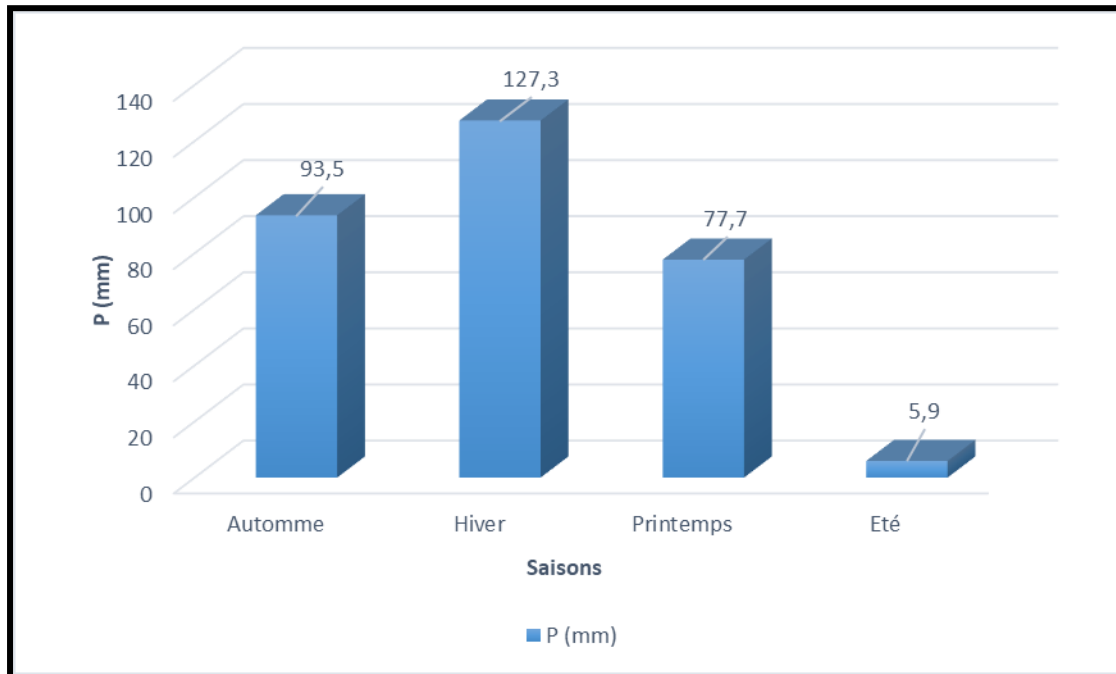


Figure.I.11 : Variations des précipitations saisonnières.

L'analyse des données pluviométriques saisonnières du sous-bassin du Sikkak, illustrée par le tableau et le graphique correspondants, met en évidence une distribution temporelle fortement contrastée des précipitations, avec une prédominance marquée durant la saison hivernale qui enregistre 127,3 mm, suivie par l'automne avec 93,5 mm de précipitations. Le printemps présente des valeurs plus modérées avec 77,7 mm, tandis que l'été se distingue par une quasi-absence de précipitations avec seulement 5,9 mm, créant ainsi un fort contraste saisonnier. Cette répartition inégale des précipitations implique que l'approvisionnement en eau est principalement concentré sur les périodes automnale et hivernale, faisant de l'été une période critique de stress hydrique, ce qui souligne la nécessité impérieuse de développer et de mettre en œuvre des stratégies efficaces de stockage et de gestion des ressources en eau pour compenser le déficit pluviométrique significatif durant la période estivale.

VII-2- Les températures :

Les températures moyennes, annuelles et mensuelles, régissent directement, en interaction avec les autres facteurs météorologiques (insolation, vitesse et turbulence du vent, précipitations) et biogéographiques, le phénomène d'évapotranspiration et par là même le déficit d'écoulement annuel et saisonnier.

Tableau.I. 12 : Valeurs des températures mensuelles moyennes, maximales et minimales.

Mois	Janv	Fév	Mars	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC
T Max	16,3	17,2	19,3	21,7	24,8	29,3	33,4	33,4	29,2	25,7	23,9	18,6
T MIN	6,8	7,2	10,1	11,8	15,7	19,5	22,9	23,2	19,6	16,1	11,2	7,4
TMOY	9,3	10,0	12,4	14,9	18,7	22,5	25,9	25,5	21,5	17,9	13,1	10,6

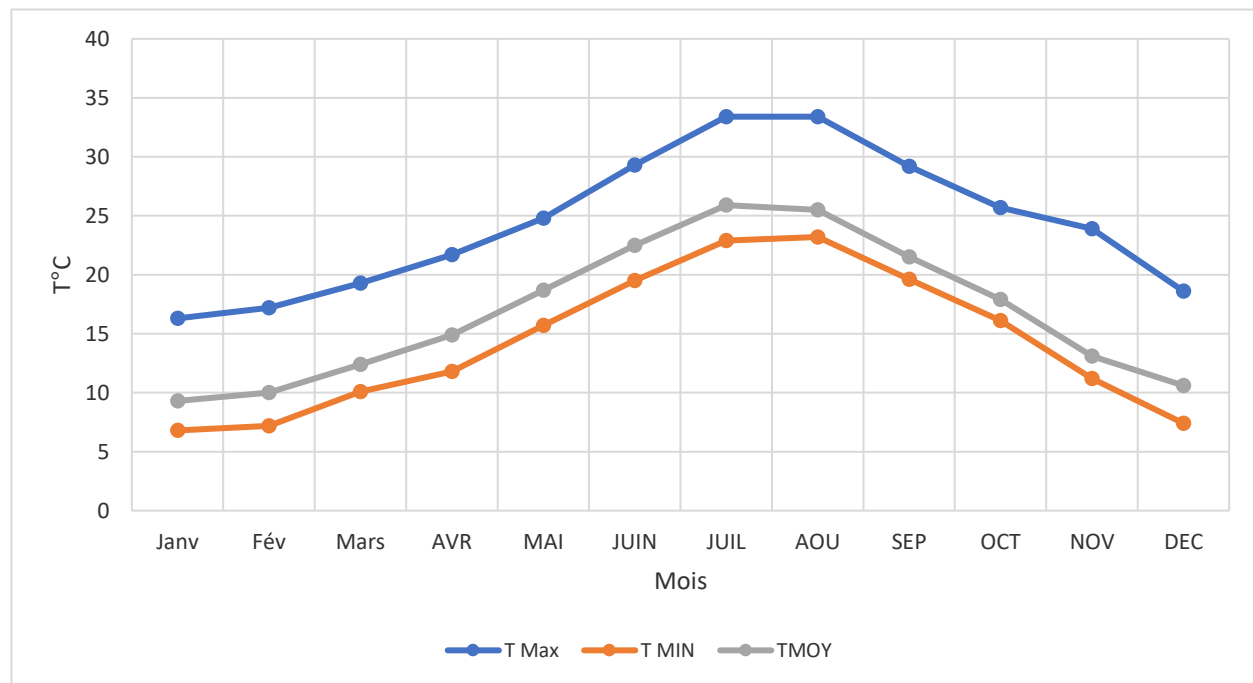


Figure.I.12 Variations des températures moyennes mensuelles, minimales et maximale.

L'analyse de l'évolution mensuelle des températures au sein du sous-bassin versant de Sikkak, illustrée par le tableau n° I.11 Et la figure n° 12, révèle une variation prononcée caractérisée par des pics thermiques atteignant 33,4°C en juillet et août, contrastant fortement avec les températures hivernales qui descendent jusqu'à 6,8°C en janvier, tandis que les températures moyennes oscillent entre 9,3°C en hiver et 25,9°C en été. La moyenne mensuelle des températures est de 16,85°C. Cette distribution thermique joue un rôle déterminant dans les processus hydrologiques du bassin, influençant notamment les taux d'évapotranspiration, les mécanismes d'infiltration des eaux, le régime des cours d'eau et la recharge des nappes souterraines, ce qui permet d'orienter efficacement l'identification des zones prioritaires pour la recherche hydrologique et la gestion des ressources en eau dans la région.

VII-3- Etude de climat :

Diagramme pluvio-thermique, (Méthode graphiques) :

Le diagramme de Gaussen et Bagnouls est un outil graphique essentiel en climatologie qui permet de visualiser et d'analyser la relation entre les précipitations et les températures d'une région donnée au cours de l'année. Ce diagramme, également connu sous le nom de diagramme pluvio-thermique, se distingue par sa construction particulière où l'échelle des précipitations (P) est égale au double de celle des températures (T), suivant le rapport $P=2T$. Cette représentation graphique utilise un système d'axes où les mois de l'année sont portés en abscisse, tandis que les températures moyennes mensuelles (en °C) et les précipitations moyennes mensuelles (en mm) sont représentées en ordonnée. L'intérêt majeur de ce diagramme réside dans sa capacité à identifier clairement les périodes sèches et humides d'une région. Lorsque la courbe des précipitations passe en dessous de celle des températures, cela indique une période de sécheresse, tandis que l'inverse signale une période humide.

Tableau.I. 13 : Précipitations et Températures moyennes mensuelles.

Mois	JANV	FEV	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC
P (mm)	52,3	32,5	31,3	26,7	19,7	3,5	0,6	1,8	14,8	31,4	47,3	42,5
T (C°)	9,3	10,0	12,4	14,9	18,7	22,5	25,9	25,5	21,5	17,9	13,1	10,6

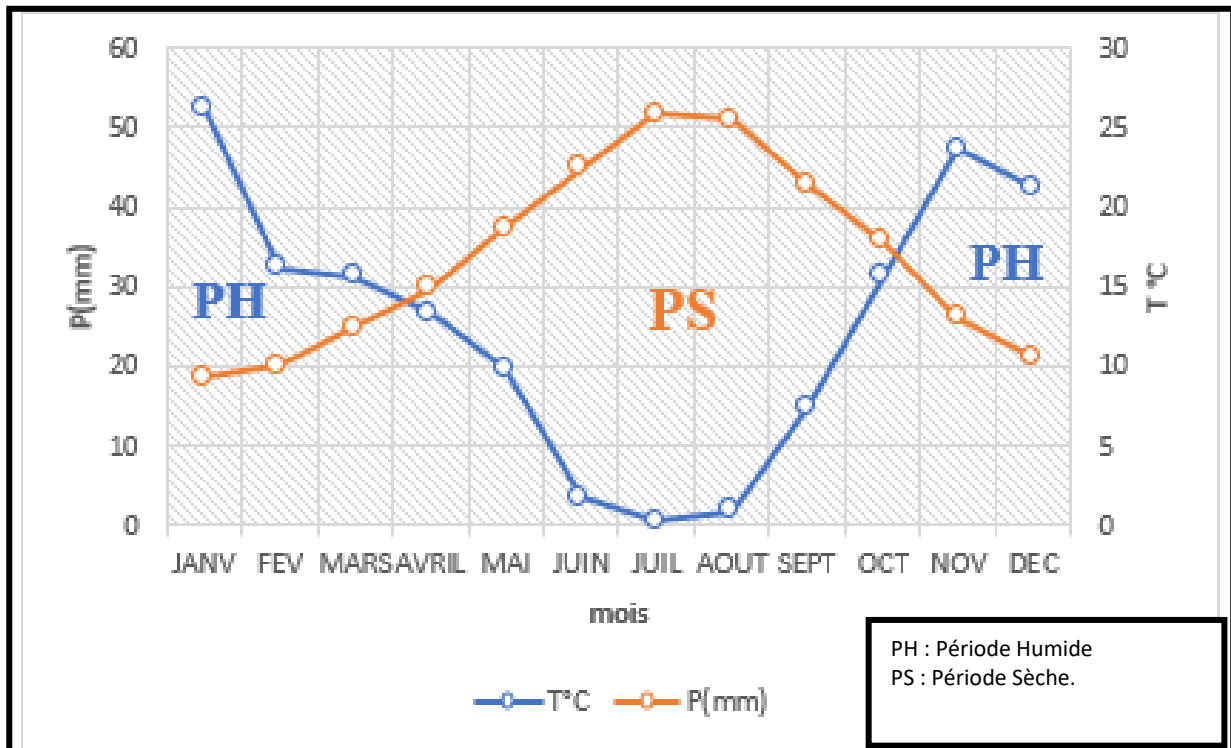


Figure.I.13 : Diagramme pluvio-thermique de Bagnouls et Gaussen.

Le report des températures et des précipitations moyennes mensuelles de la zone d'étude, sur ce diagramme, nous a permis de constater que la période qui s'étend de la fin mars jusqu'au début du mois d'octobre est sèche, et que le reste de l'année est humide.

VII-3- 1- Les indices climatiques :

L'indice d'aridité de DE Martonne (1923)

Cet indice permet de caractériser le climat d'une région en fonction des précipitations et de la température moyenne annuelle.

a- L'indice d'aridité annuelle :

Mesure le niveau d'aridité d'une région sur une année. Il se calcule généralement par :

$$I_a = \frac{P}{T+10} \quad (13)$$

P : précipitations moyennes annuelles (mm)

T : Température moyenne annuelle (°C)

I_a : Indice d'aridité annuel.

Tableau.I. 14 : : Classification de DE Martonne.

P Moy (mm)	T Moy (°C)	I_a
304,4	16,85	11,34

Tableau.I. 15 : Indice d'aridité de Martonn.

Valeur de I	Type de climat
I > 50	climat équatorial et montagnard.
20 < I < 50	froid tempéré ou tropical.
10 < I < 20	Climat semi-aride.
10 < I < 5	Climat désertique.
I < 5	Climat hyper-aride.

b- L'indice d'aridité mensuelle :

L'indice d'aridité mensuelle constitue un outil fondamental en climatologie, permettant d'évaluer et de quantifier le degré d'aridité d'une région donnée à l'échelle mensuelle. Cet indicateur climatique, qui s'appuie sur la relation entre les précipitations (P) et les températures (T). Il offre une approche méthodologique rigoureuse pour la caractérisation des conditions climatiques.

$$i = \frac{12 \times P}{T + 10} \quad (14)$$

P : Précipitations moyennes mensuelles (mm).

T : Températures moyennes mensuelles (°C).

i : indice d'aridité mensuelle

Tableau.I. 16 : Indices d'aridité mensuelle de DE Marton

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec
i	32,5	18,5	16,76	12,86	8,23	1,29	0,20	0,56	5,63	13,50	24,57	24,75
Type du régime	T	SA	SA	SA	D	HA	HA	HA	D	SA	T	T

Avec les types de régime :

T : Tempéré

D : Désertique

SA : Semi-aride

HA : Hyper-aride.

L'indice d'aridité mensuelle nous a montré que la période de novembre jusqu'à janvier est caractérisée par un climat tempéré, et que la période de février jusqu'à avril et le mois d'octobre sont caractérisés par un climat semi-aride. La période de juin jusqu'à août est caractérisée par un climat hyper-aride, et les mois de mai et septembre sont caractérisés par un climat désertique.

c. Indice d'EMBERGER :

Représenté par la formule :

$$Q_2 = \frac{1000 \times p}{\left(\frac{M+m}{2}\right)(M-m)} \quad (15)$$

P : Précipitations moyennes annuelles (mm).

M : Moyenne des maxima de la température en (°K) du mois le plus chaud (Août : 33,4 °C).

m : Moyenne des minima de la température en (°K) du mois le plus froid (Janvier : 6,8 °C).

Q2 : Quotient pluvio-thermique d'Emberger.

Avec : $K = T (^{\circ}\text{C}) + 27$

Tableau.I. 17 : Indice d'Emberger.

P (mm)	M (k)	m (k)	Q ₂
304,4	306,4	279,8	40,62

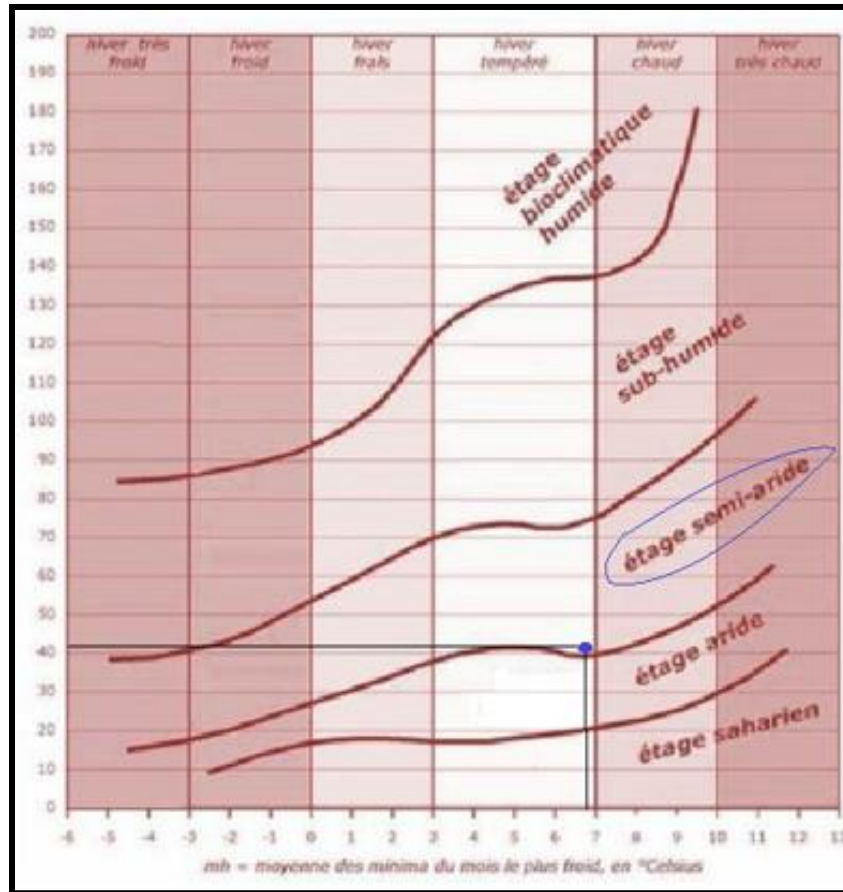


Figure.I.14 : Climagramme d'EMBERGER.

Ce diagramme permet de classer le climat en fonction des précipitations annuelles et de la température moyenne minimale du mois le plus froid. La position du point d'étude indique que le sous bassin de Sikkak appartient à l'étage bioclimatique semi-aride à hiver tempéré. Ce type de climat est caractérisé par des précipitations faibles à modérées, ce qui limite la recharge des eaux souterraines, et confirme la nécessité d'identifier les zones les plus favorables à l'infiltration.

VII-4- Evapotranspiration et deficit d'écoulement :

-Evapotranspiration : On appelle évapotranspiration ou évaporation totale l'ensemble des phénomènes d'évaporation (processus physiques) et de transpiration (phénomènes biologiques).

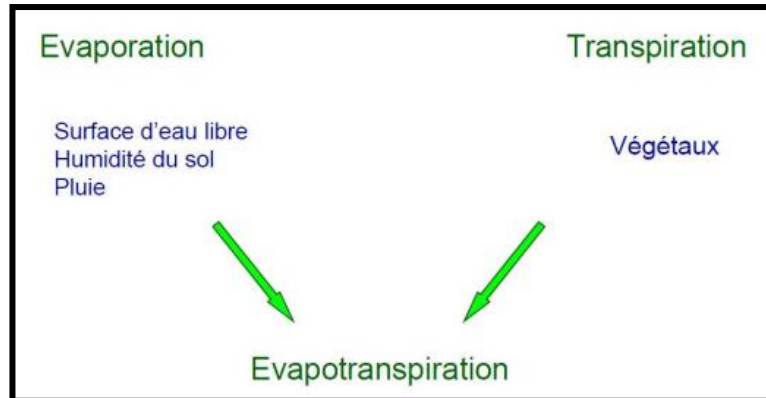


Figure.I.15 : Evapotranspiration.

On distingue :

-L'évapotranspiration réelle (ETR) : somme des quantités de vapeur d'eau évaporées par le sol et par les plantes quand le sol est à une certaine humidité et les plantes à un stade de développement physiologique et sanitaire spécifique.

-L'évapotranspiration potentielle (ETP) : Quantité maximale d'eau susceptible d'être perdue en phase vapeur, sous un climat donné, par un couvert végétal continu spécifié bien alimenté en eau et pour un végétal sain en pleine croissance. Elle comprend donc l'évaporation de l'eau du sol et la transpiration du couvert végétal pendant le temps considéré pour un terrain donné.

-Déficit d'écoulement :

Différence entre la lame d'eau précipitée sur un bassin versant et la lame d'eau écoulée à son exutoire pendant un temps donné (généralement l'année).

Il existe plusieurs méthodes pour calculer ces paramètres :

- La méthode de TURC.
- La Méthode de Wundt:
- La méthode de VERDEIL.
- La méthode de WUNDT.

-Evapotranspiration réelle (ETR) :**➤ La méthode de TURC:**

Elle permet de calculer l'ETR en tenant compte des valeurs moyennes annuelles de la température et des précipitations.

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \left(\frac{P}{L}\right)^2}} \quad (16)$$

Avec : $L = 300 + 25T + 0,05T^3$

P : Précipitations moyennes annuelles (mm)

T : Température moyenne annuelle (C°)

ETR : Evapotranspiration réelle annuelle (mm/an).

Les résultats obtenus par l'application des différentes approches d'estimation de l'ETP sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau.I. 18 : Evapotranspiration réelle.

Station	P (mm)	T (°C)	L	ETR (mm/an)
Sous bassin de Sikkak	304.4	16,85	940,45	315,09

L'application de l'équation de TURC sur les paramètres climatiques de la région, nous a donné un ETR égal à 315,09 mm/an.

Evapotranspiration potentielle (ETP)

➤ Méthode de Wundt:

L'abaque de Wundt modifié par Coutagne, permet de déterminer graphiquement l'évapotranspiration réelle en fonction de la température moyenne annuelle en (°C) et les précipitations moyennes annuelles en (mm).

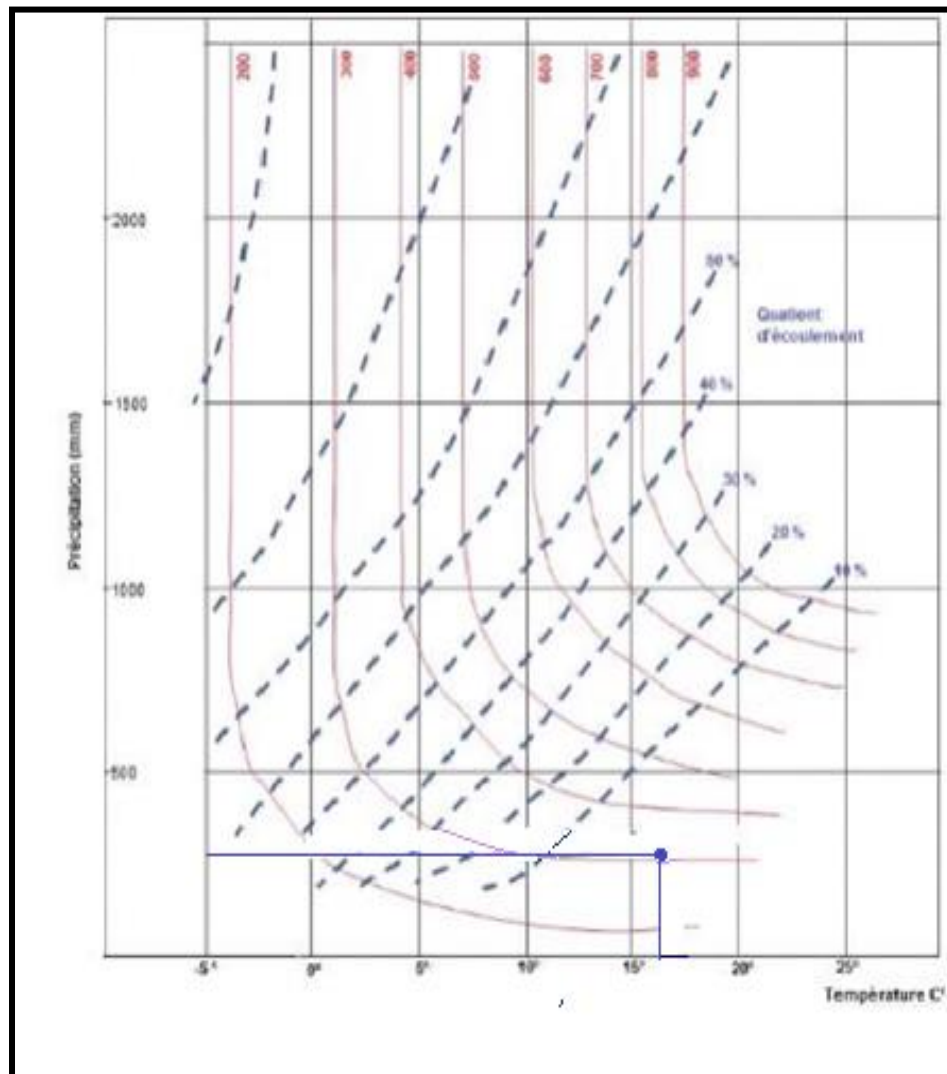


Figure.I.16 : Détermination du déficit d'écoulement (Abaque de WUNDT).

Le report des paramètres climatiques sur le diagramme de Wundt, nous a donné un déficit d'écoulement égal à 310mm/ans.

➤ Méthode de P. Verdeil (1988):

Afin d'estimer les valeurs de l'évapotranspiration réelle ou du déficit d'écoulement, P. Verdeil a établi un abaque bi- logarithmique pour les régions semi-arides, en tenant compte uniquement des précipitations annuelles.

Le report des précipitations moyennes annuelles sur cet abaque, le déficit d'écoulement est estimé à 310mm.

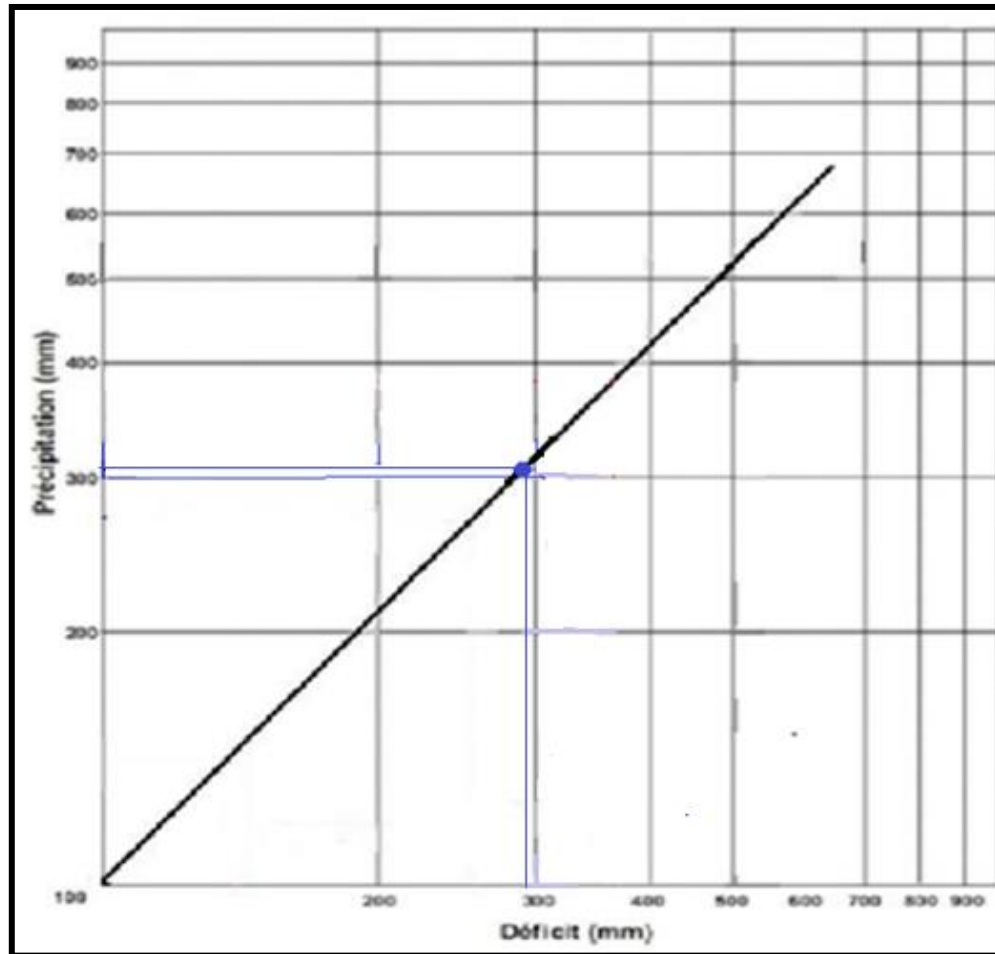


Figure.I.17 : Abaque de P.Verdeil.

Le diagramme de Verdeil, basé sur la relation entre précipitation annuelle et déficit hydrique, indique que le sous bassin de Sikkak reçoit environ 310 mm de pluie pour un déficit hydrique d'environ 298mm. Cela montre une situation de quasi-équilibre hydrique, avec une évapotranspiration qui consomme presque toute l'eau disponible. Cela souligne le stress hydrique auquel est soumise la région, typique des zones semi-arides.

1- Evapotranspiration potentielle (ETP) :

Méthode de Thornthwaite (1948) :

D'après Thornthwaite (1948) le calcul de l'évapotranspiration potentielle se fait selon la formule suivante :

$$\diamond \text{ ETP non corrigée} = 16 \left(\frac{T}{I} \times 10 \right)^a \quad (17)$$

Avec : $a = 0.016 I + 0.5$

$$\diamond \text{ ETP corrigée} = 16 \left(\frac{T}{I} \times 10 \right)^a \times K \quad (18)$$

ETP : Evapotranspiration potentielle (mm)

i: Indice thermique mensuelle. Avec : $i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1.514}$

I : la somme des indices mensuelles des 12 mois de l'année (i),

$$I = \sum_{1}^{12} i \quad (19)$$

T : température moyenne mensuelle du moi considéré en °C.

K : Coefficient de correction.

L'application de cette équation sur les paramètres climatiques, nous a donné les résultats dans le tableau suivant.

Tableau.I. 19 : Valeurs de l'ETP corrigée et l'ETP non corrigée du sous bassin versant de Sikkak.

Mois	Jan	Fev	Mrs	Avr	Mai	Jun	Jul	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec	Moy
T (°C)	9,3	10	12,4	14,9	18,7	22,5	25,9	25,5	21,1	17,9	13,1	10,6	16,85
I	2,56	2,86	3,96	5,22	7,37	9,75	12,06	11,78	8,85	6,90	4,30	3,12	78,72
ETP non cor (mm)	21,46	24,38	35,59	49,17	73,33	101,54	130,07	126,56	90,69	67,90	39,20	27,01	-
K	0,87	0,85	1,03	1,09	1,21	1,21	1,23	1,16	1,03	0,97	0,86	0,85	/
ETP corr (mm)	18,67	20,72	36,66	53,60	88,73	122,86	159,98	146,80	93,41	65,86	33,71	22,69	863,70

2 / Evapotranspiration réelle (ETR) :

On peut prendre en compte la corrélation de l'évapotranspiration réelle avec les réserves d'eau disponibles.

Deux cas :

-Si les précipitations sont supérieures à ETP, alors ETR=ETP

-Si les précipitations sont inférieures à ETP, alors l'ETR sera égale à l'ETP aussi longtemps que les réserves en eau du sol seront capables d'équilibrer la balance, au-delà, il y a un déficit.

❖ Calcul de la réserve en eau du sol :

3/ Calcul de la réserve facilement utilisable (R.E.U) :

D'après zè), la R.E.U est calculée par la formule suivante :

$$RU = C - f \times 100 H \times D + 30$$

- Ru : Réserve utile en eau du sol.
- C : Capacité au champ.
- f : Capacité au point de flétrissement.
- H : Profondeur du sol (H=500mm).
- D : Densité apparent du sol (D=1)
- 30 mm : Enracinement capillaire.

Les valeurs de (C-f) dépendent de la nature du sol, d'après les travaux antérieurs consultés, nous avons pris : C-f= 20%, donc : RU=130 mm.

Tableau.I. 20 : Bilan hydrologique.

Mois	JAN	FEV	MRS	AVR	MAI	JUN	JUL	AOUT	SEP	OCT	NOV	DEC	Annuel (mm)
P	52,3	32,5	31,3	26,7	19,7	3,5	0,6	1,8	14,8	31,4	47,3	42,5	304,4
ETP	18,67	20,72	36,66	53,6	88,73	122,86	159,98	146,8	93,41	65,86	33,71	22,69	863,69
RU 130mm	33,63	45,41	40,05	13,15	0	0	0	0	0	0	0	0	132,24
ETR	18,67	20,72	36,66	53,6	32,85	3,5	0,6	1,8	14,8	31,4	33,71	22,69	271
DA	0	0	0	0	55,88	119,36	159,38	145	78,61	34,46	0	0	592,69
EXC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

CONCLUSION :

Le sous-bassin versant de Sikkak, situé dans le Nord-Ouest de l'Algérie (région de Tlemcen) aux coordonnées 1°20'28,27" O et 35°02'50,29" N, avec une altitude moyenne de 969,88 m et présente des caractéristiques morphométriques distinctives, notamment une forme allongée (indice de Gravelius de 2,16) et un réseau hydrographique modérément développé (densité de drainage de 1,18 km/km²). Son relief accidenté, variant de 300 à 1500 m avec plus de 52% de sa surface au-dessus de 1200 m, s'accompagne d'une occupation des sols diversifiée dominée par les terres agricoles, l'arboriculture et les forêts de densité moyenne.

Le climat du bassin est caractérisé par une moyenne annuelle de précipitations de 300.4 mm, avec une forte variabilité interannuelle (520 mm en 2004 à 150 mm en 2024) et une distribution spatiale marquée par un gradient nord-sud, les précipitations étant plus importantes au sud (>495 mm/an). Le régime thermique présente des variations saisonnières significatives, avec des températures oscillantes entre 33,4°C en été et 6,8°C en hiver, tandis que les indices climatiques et les abaques (DE Martonne Ia=11,34, Emberger Q₂=40,62) confirment le caractère semi-aride de la région, avec une période sèche d'avril à octobre.

Le bilan hydrologique révèle une évapotranspiration réelle de 271 mm/an et potentielle de 863,69 mm/an, avec un déficit agricole de 592.69 mm/an.

***Deuxième chapitre :
Géologie-hydrogéologie.***

Deuxième chapitre : Géologie-hydrogéologie

Introduction :

L'étude de la géologie et de l'hydrogéologie du sous bassin de Sikkak est essentielle pour déterminer les modalités de recharge des nappes souterraines. La région d'étude présente une série de formations sédimentaires allant du Secondaire au Quaternaire, marquée par une diversité de roches ayant un impact direct sur le comportement hydrogéologique de la zone.

Les formations de calcaires et de dolomies du Crétacé, très karstifiées, sont essentielles pour l'infiltration et la rétention des eaux souterraines. En revanche, les formations marneuses et argileuses du Tertiaire jouent le rôle de barrières étanches qui limitent les échanges hydrauliques. De plus, les dépôts alluviaux récents agissent comme des réservoirs temporaires qui influencent la dynamique de l'hydrologie locale.

I- Synthèse géologique et hydrogéologique régionale : Contexte géologique :

Cette synthèse est inspirée des travaux antérieurs de Benest,1972, 1985, 1999 ; Collignon,1986 in Hayane,1983 et Bensaoula,2006.

I.1. Les formations secondaires :

a) - Les grès de Boumediène (Oxfordien supérieur-Kimméridgien supérieur) :

Ce sont des grès à éléments fins sous forme de gros bancs séparés par des intercalations argileuses. Les alternances sont souvent rouges ou verte et de grès à stratification oblique. Il s'agit d'un ensemble à dominance gréseuse qui affleure aux environs de Tlemcen en particulier près du sanctuaire de Sidi Boumediene. L'épaisseur de cette formation est de 200 à 400m en moyenne.

b) - Les calcaires de Zarifet (Kimméridgien supérieur) :

Cette formation tire son nom du col de Zarifet, situé à 5Km au Sud-Ouest de Tlemcen. Elle est peut-être réduite ou partiellement dolomitique (épaisseur de 100m environ au col de Zarifet).

c) - Les Dolomies de Tlemcen (Kimméridgien terminal) :

Elle correspond au grand escarpement dolomitique qui domine Tlemcen. Ces Dolomies sont en grande partie grossièrement cristallines en raison d'une dolomitisation tardive. L'intensité de la dolomitisation est liée avant tout à la fracturation. Dans la partie sommitale se différencient localement les calcaires de Stah.

Elles sont assez répandues dans le groupement urbain de Tlemcen, puisqu'elle affleure au Djebel Tefatisset, Ain El Houtz et Oudjlida. L'épaisseur de cette formation peut atteindre 200m dans la région de Tlemcen.

d) - Les marno-calcaires de Raourai (Tithonien basal) : Il s'agit d'alternance de marnes gris verdâtre ou blanchâtre et de calcaires marneux durs. C'est une formation plutôt calcaire que marneuse, avec une épaisseur de 75 à 150m en moyenne, et près de 400m au Djebel Raourai.

e) - Les calcaires de Lato : Ce sont des calcaires massifs en bancs épais, terminés par des laminites sombres calcaire-argileuses. Leur épaisseur est d'environ 50m au Djebel Lato.

f) - Les Dolomies de Terni (Tithonien inférieur) : Il s'agit de dolomies massives (50m en moyenne) bien imposée sur le plateau de Terni où elles débutent par des niveaux à silex stratiformes.

g) - Les marno-calcaires de Hariga (Tithonien supérieur) : C'est une alternance de calcaire avec quelques passées de laminites et de marnes plus ou moins tendres, avec une épaisseur de 165m à Djebel Hariga.

h) - Les marno-calcaires d'Ouled Mimoune (Tithonien supérieur à Berriasien basal) : Cette unité lithologique débute dans les monts de Tlemcen par les grès de Merchiche. Ces derniers sont composés d'une alternance d'argiles rouges, de grès fins et de calcaires. L'épaisseur de cette formation est de 250 m à 300 m.

i) - Les argiles de Lamoricière (Berriasien moyen à Valanginien) : Cette formation transgressive d'épaisseur 150 m située à 10Km au Sud-Est d'Ouled Mimoun, est essentiellement marno-gréseuse.

j) - Les grès de Berthelot (Hauterivien à Berriasien inférieur) : se compose d'une alternance de grès (à stratification obliques) et d'argiles surmontée d'une succession où dominent les bancs carbonatés de cette formation. Son épaisseur est de 150m.

I.2. Les formations Tertiaires :

Elles sont représentées de bas en haut par :

a) - L'Eocène : Ce sont des grès fissurés à ciment argileux alternant avec des marnes verdâtres, leur épaisseur est de 150m. Elles affleurent dans la vallée d'Oued Sikkak.

b) - Le Miocène marin : Le Miocène marin se développe presque uniquement sur le versant nord des Monts de Tlemcen. Il est discordant sur les niveaux carbonatés du Jurassique supérieur. Il s'agit de dépôt argilo-gréseux.

c) - Le Pliocène : Il est marqué par des conglomérats de base, à éléments bien roulés de l'Oxfordien et du Kimméridgien, peu développé en surface.

I.3. Les formations quaternaires :

a) - les alluvions anciennes :

- Le complexe de piémont : Ce complexe est représenté par des éboulis de piémonts plus ou moins encroûtés, d'épaisseur assez faible.
- Les travertins : Les dépôts des travertins proviennent de la dissolution interne des massifs calcaire-dolomitiques, grâce à la quantité de carbonate de calcium déposée par les eaux des émergences. Ils constituent de puissants dépôts pouvant atteindre 60m.
- La croûte calcaire : Cette croûte est formée par un encroûtement particulièrement bien marqué dans la plaine d'Hennaya où il masque partiellement les grès Tortonien. Cette croûte de teinte claire et des croûtes lamellaires, est caractérisée par une petite épaisseur ne dépassant pas 1m.
- Le glaciaire de pente Soltanienne : Il s'agit de formation soltanienne, le plus souvent limoneuse argileuse. La partie de marne non atteinte par les érosions récentes forme de grands glacis de sols rouges.

b) - Les alluvions récentes :

Ce sont des dépôts limoneux occupant les parties basses des plaines et des vallées aux abords des cours d'eau.

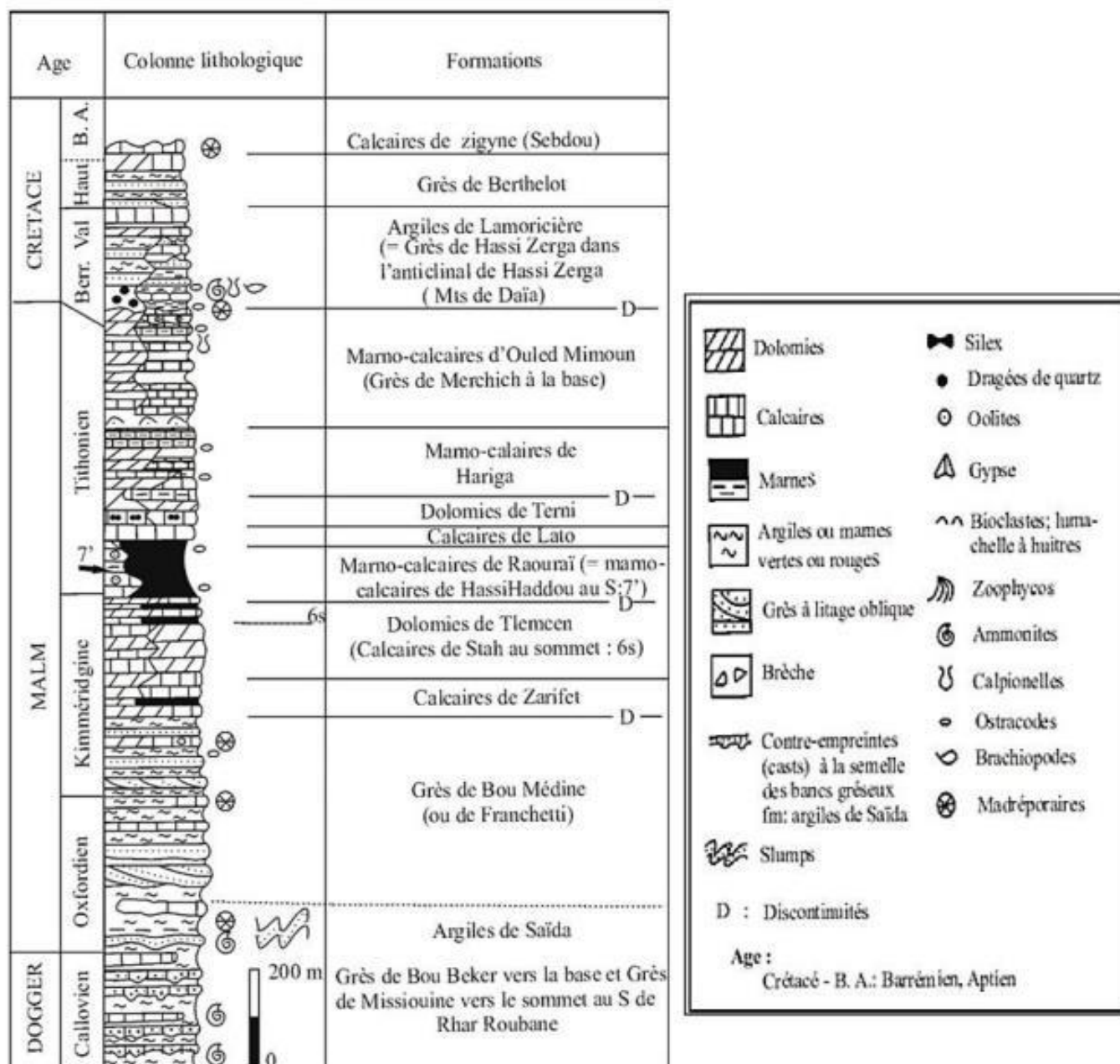
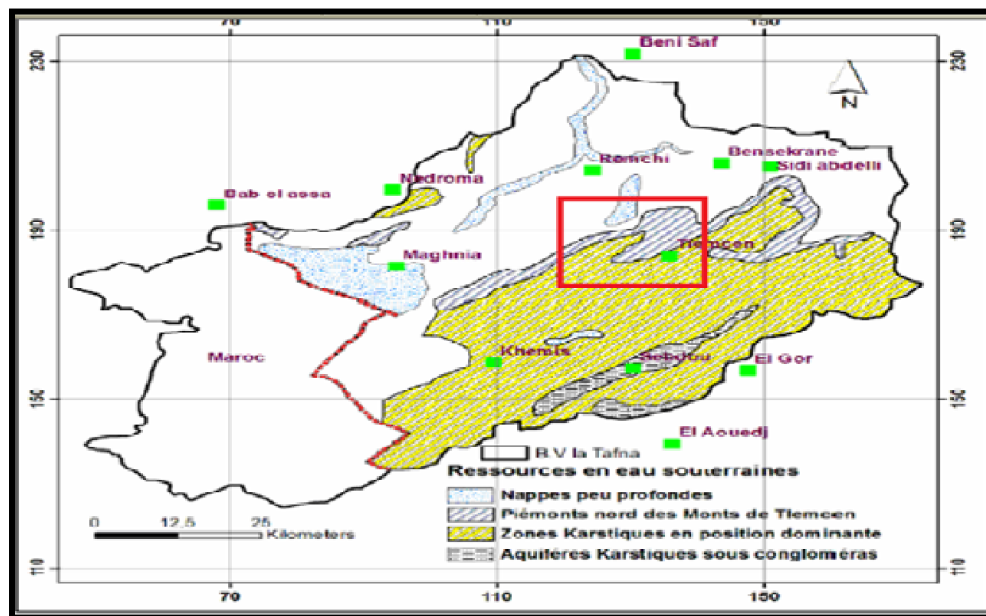


Figure. II. 1 : Colonne lithostratigraphique des Monts de Tlemcen jusqu'aux hautes plaines (Benest .M; Bensalah .M, 1999).

L'étude litho-stratigraphique des différentes formations montre que les seuls niveaux présentant un intérêt hydrogéologique sont :

- La tectonique joue un grand rôle dans l'hydrogéologie de la région ; les nombreuses failles et diaclases ont haché les massifs calcaréo-dolomitiques et ont permis le développement de la Karstification en profondeur.



48

II-contexte géologique, hydrogéologique et structural de la zone d'étude :

L'analyse de la carte géologique de la zone d'étude (fig03) nous a permis d'identifier la répartition spatiale des formations géologiques à intérêt hydrogéologique, notamment les potentialités hydriques des aquifères.

1-Calcaire du Jurassique (Bleu):

- Localisation : couvre une grande partie du centre et du Sud-Est du bassin.
- Caractéristiques : formation massive et dure, souvent karstifiée.
- Intérêt hydrogéologique : excellent potentiel de recharge, les calcaires karstifiés permettent une infiltration rapide et une bonne circulation des eaux souterraines.

2-Marno-calcaire du Crétacé (Vert) :

- Localisation : très limité, présent dans le Sud du bassin.
- Caractéristiques : alternance de marnes et de calcaires.
- Intérêt hydrogéologique : potentiel moyen selon la fracturation du calcaire, peut favoriser l'infiltration là où les fractures sont nombreuses.

3-Marne de Miocène (Jaune):

- Localisation : répartie au Nord et au centre du bassin.
- Caractéristiques : roches marneuses argileuses, souvent imperméables ou faiblement perméables.
- Intérêt hydrogéologique : faible potentiel de recharge, jouent plutôt un rôle de barrière à l'infiltration.

4-Alluvions du Quaternaire (Gris clair) :

- Localisation : principalement au Nord-Ouest du sous bassin.
- Caractéristiques : formations superficielles récentes, généralement composées de graviers, sables et limons.
- Intérêt hydrogéologique : très favorables à la recharge, car elles sont perméables et permettent une infiltration rapide des eaux de surface.

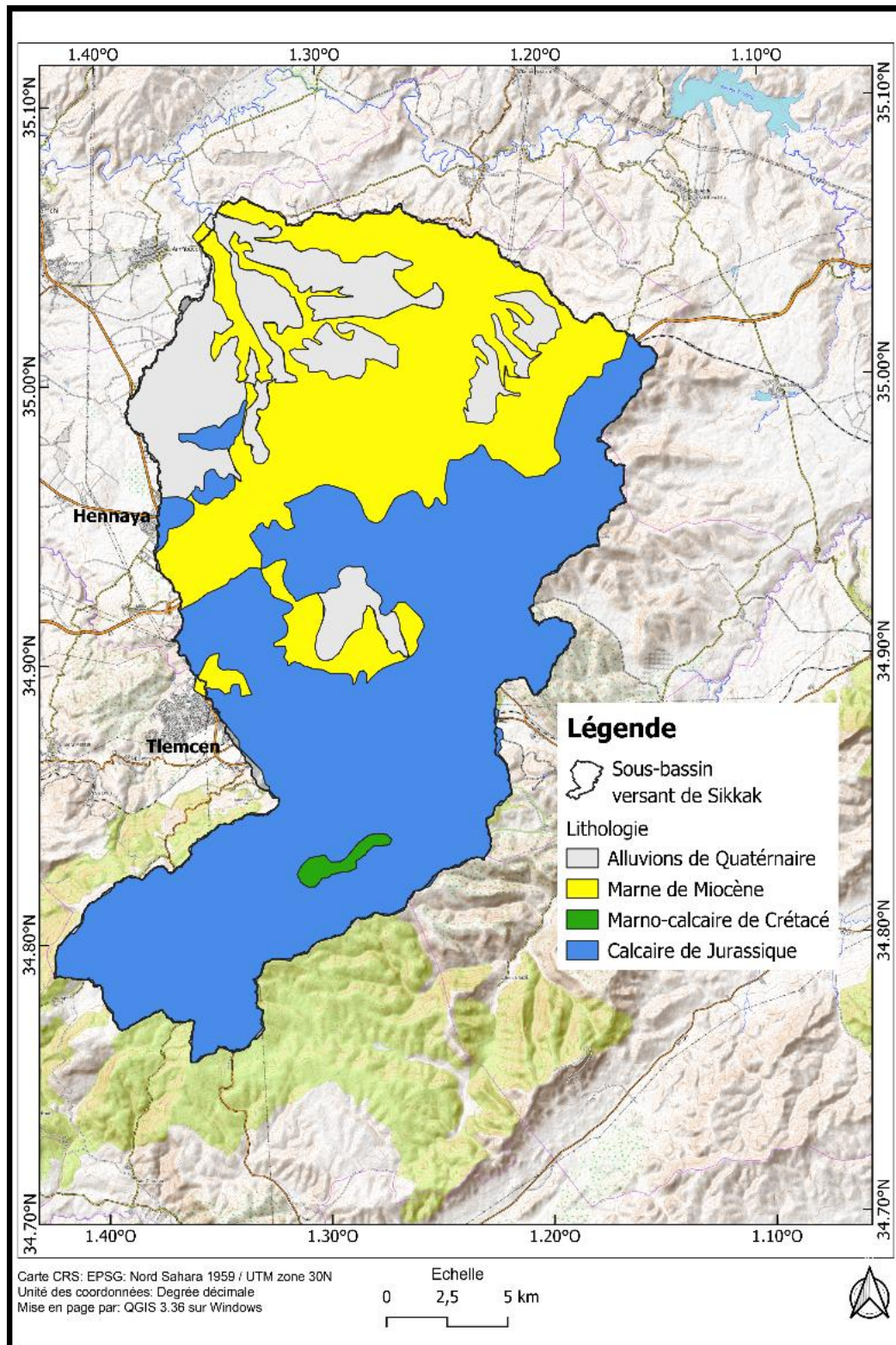


Figure.I.3 : Carte géologique du sous bassin versant du Sikkak.

La carte citée ci-dessous (fig04) présente la densité de linéaments dans le sous-bassin versant de Sikkak. Les linéaments sont des structures géologiques linéaires, souvent associées à des failles, des fractures ou des zones de contact. Leur densité joue un rôle crucial dans l'infiltration de l'eau et, par conséquent, dans l'identification des zones potentielles de recharge des nappes.

Zones à faible densité ($\leq 0,12$ m/m², en rouge foncé) : elles couvrent la majorité du sous-bassin.

Une faible densité indique une faible fracturation du substrat rocheux, limitant ainsi l'infiltration de l'eau. Ces zones ont donc un faible potentiel de recharge.

Zones de densité modérée (0,12 à 0,36 m/m², en orange et jaune) : réparties en taches dispersées, principalement au centre et à l'Ouest du sous-bassin.

Une densité modérée suggère une fracturation intermédiaire, offrant un potentiel moyen d'infiltration.

Zones à forte densité (0,36 à 0,48 m/m², en bleu et vert clair) : situées principalement au centre et à l'Est du sous-bassin. Une forte densité de linéaments indique une fracturation importante du substrat rocheux, favorisant l'infiltration de l'eau. Ces zones sont donc les plus propices à la recharge des nappes.

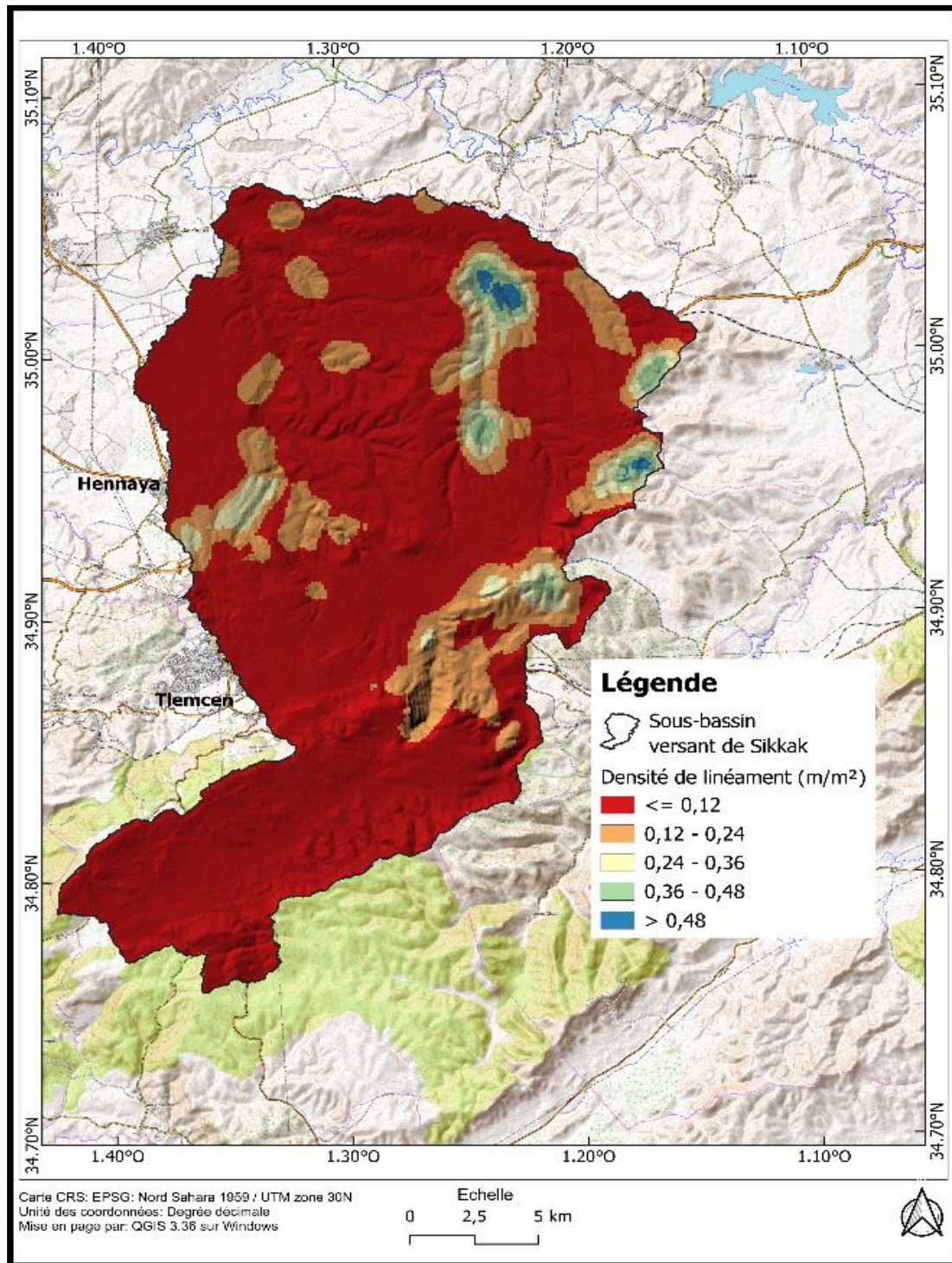


Figure.II.4 : Carte de linéaments du sous bassin versant de Sikkak.

Conclusion :

L'étude géo-structurale et hydrogéologique du sous-bassin versant de Sikkak révèle une structure géologique variée, caractérisée par quatre unités lithologiques majeures, chacune présente des caractéristiques distinctes de perméabilité et de potentiel de recharge :

* Les calcaires du Jurassique, occupent le centre et le Sud-Est du bassin, se caractérisent par leur forme karstifiée, offrant un excellent potentiel de recharge.

* Les Marno-calcaires du Crétacé, présents dans la zone centrale et Sud montre un potentiel de recharge variable, dépendant du degré de fracturation.

* Les Marnes du Miocène, localisées au Nord et au centre du bassin, présentent une formation peu perméable, avec une faible capacité de recharge.

* Les Alluvions du Quaternaire, situées au Nord-Ouest du bassin, se distinguent par leur formation très perméable, offrant un potentiel très favorable à la recharge des nappes.

L'analyse des linéaments a permis d'identifier trois zones principales :

- des zones à faible densité ($\leq 0,12$ m/m²) couvrant la majorité du bassin, avec un faible potentiel d'infiltration,

- des zones à densité modérée (0,12-0,36 m/m²) localisées au centre et à l'Ouest, présentant un potentiel d'infiltration moyen,

- des zones à forte densité (0,36- $\geq 0,48$ m/m²) situées au centre et à l'Est, caractérisées par un fort potentiel d'infiltration.

Les zones les plus favorables à la recharge des nappes phréatiques sont celles qui combinent une lithologie perméable (alluvions ou calcaires karstifiés) avec une forte densité de linéaments. Cette étude fournit ainsi des informations essentielles pour la gestion des ressources en eau dans la région, soulignant l'importance cruciale de la compréhension des structures géologiques dans l'évaluation du potentiel de recharge des nappes souterraines du sous-bassin versant de Sikkak.

***Troisième chapitre :
Application des systèmes SIG
pour l'élaboration de la carte
des potentialités hydriques***

Troisième chapitre : application des systèmes SIG pour l'élaboration de la carte des potentialités hydriques

Introduction :

La gestion durable des ressources naturelles qu'il s'agisse de l'eau, les sols et d'autres éléments du milieu naturel, représente aujourd'hui un enjeu majeur. Face aux défis liés à leur exploitation, leur préservation et leur protection, il est essentiel de disposer d'outils capables de représenter, d'analyser et de suivre l'évolution de ces ressources dans l'espace et dans le temps. Dans ce contexte, les systèmes d'information géographique (SIG) s'imposent comme des instruments de premier plan.

Les SIG permettent l'intégration et le traitement d'une grande variété de données géo-référencées. Ils facilitent la visualisation des phénomènes spatiaux, ainsi que l'aide à la décision des acteurs territoriaux. En rassemblant des données provenant de différentes sources comme la télédétection, observations de terrain, et les bases de données, ces outils présentent une vision globale et détaillée du territoire.

Grâce à des concepts fondamentaux comme la référence spatiale, les modèles vectoriel et raster, ou encore l'analyse topologique, les SIG facilitent l'identification des zones d'intervention prioritaires et de planifier l'usage des ressources de manière équilibrée et de prévenir les risques environnementaux. Leur utilité est largement reconnue dans de nombreux domaines, notamment l'aménagement du territoire, l'hydrogéologie, l'agriculture, ou encore la gestion des risques naturels.

En fait, les SIG s'imposent aujourd'hui comme des outils incontournables, ils représentent une approche moderne et intégrée qui vise à mettre en avant le fait qu'ils améliorent la capacité des décideurs à répondre de manière responsable aux problèmes environnementaux actuels.

I-Rôle du système SIG dans la protection et la gestion des potentialités hydriques :

Face aux pressions croissantes exercées sur les ressources en eau douce (surexploitation, pollution, changement climatique), le Système d'Information Géographique (SIG) s'impose comme un outil indispensable pour la gestion durable des ressources hydriques. Le SIG, défini comme un système d'acquisition, de gestion, d'analyse et de représentation des données géographiquement référencées (coordonnées x, y, z selon une projection donnée), constitue un ensemble organisé de matériels informatiques, de logiciels et de personnels capable de traiter des informations spatiales à travers diverses manipulations comme le tri, la recherche sélective, le calcul et la modélisation. Cette technologie fonctionne en synergie avec la télédétection, qui permet de collecter des informations sur la surface terrestre, via des capteurs satellites (comme Sentinel de l'ESA ou Landsat de la NASA), des avions ou des drones, fournissant des données essentielles sur l'évapotranspiration, les précipitations et la température de surface. ArcGIS, développé par Esri, représente un exemple puissant de SIG, offrant des fonctionnalités avancées d'analyse spatiale, de la simple interpolation à la simulation de bassins versants. Les apports du

Troisième chapitre : Application des systèmes SIG pour l'élaboration de la carte des potentialités hydriques

SIG dans la gestion des ressources en eau sont multiples : centralisation et représentation des données issues de diverses sources, surveillance des dynamiques hydriques, soutien à la planification des aménagements, et protection des zones sensibles. En hydrologie et hydrogéologie, ces systèmes permettent la délimitation automatique des bassins versants, la simulation des écoulements, la cartographie des aquifères, et l'évaluation de la vulnérabilité des nappes, via des modèles comme DRASTIC. Les méthodes d'évaluation des ressources en eau s'appuient sur trois approches complémentaires : l'exploitation de données mesurées (hydrométriques, piézométriques), les approches indirectes croisant différents facteurs environnementaux (géologie, pente, occupation du sol), et la modélisation spatiale permettant de simuler les comportements de l'eau dans le milieu naturel et d'évaluer différents scénarios de gestion, constituant ainsi un système d'aide à la décision crucial pour la gestion durable des ressources en eau.

II-Technique d'élaboration de la carte des potentialités hydriques :

La méthodologie d'élaboration de la carte des potentialités hydriques (fig n°06) débute par la collecte et l'organisation des données, comprenant la numérisation des unités géologiques, leur classification selon la perméabilité, la digitalisation des failles et fractures, ainsi que l'intégration d'autres données pertinentes comme la pente du terrain et l'occupation du sol.

Les données climatiques et environnementales nécessaires à la modélisation du potentiel de recharge des nappes phréatiques ont été obtenues à partir de plusieurs plateformes scientifiques en libre accès, reconnues pour la qualité et la fiabilité de leurs données spatialisées.

La plateforme Global Watershed :

La plateforme Global Watershed a été utilisée pour l'extraction de données hydrologiques et topographiques à l'échelle du bassin versant. Elle permet notamment de délimiter les sous-bassins versants et d'obtenir des informations sur la morphologie du terrain, essentielles pour l'analyse de la pente, de la direction d'écoulement, et du réseau de drainage.

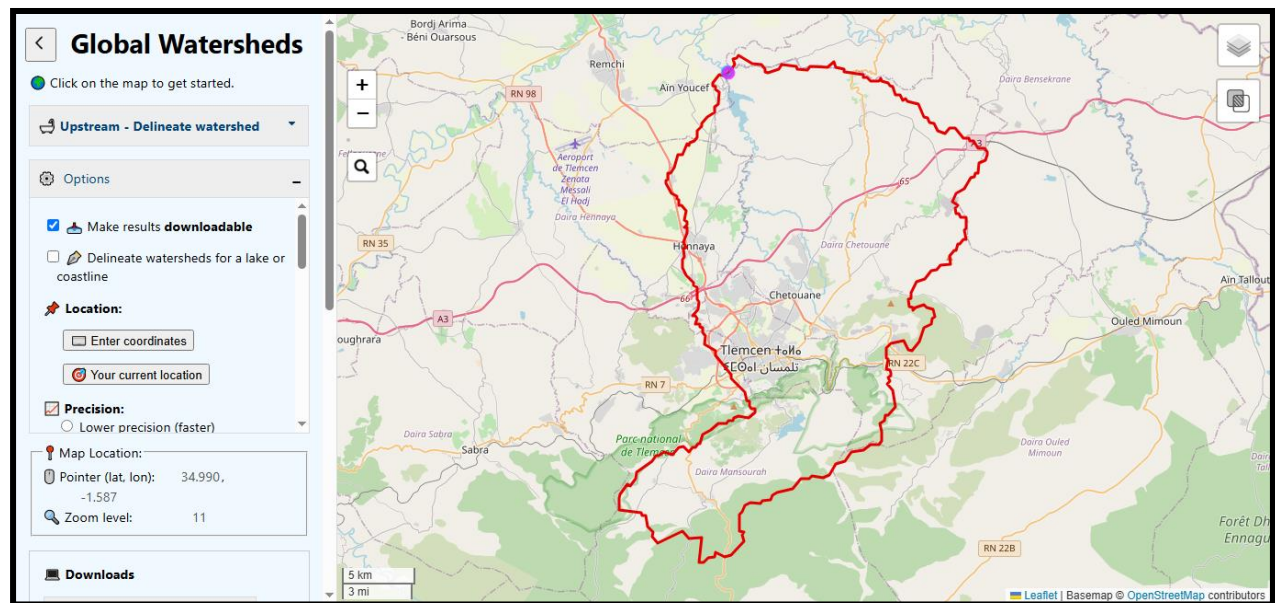


Figure.III. 1 :Délimitation du sous bassin versant de Sikkak selon(<https://mghydro.com/watersheds/>).

La plateforme Climate Engine :

Pour les données climatiques, en particulier les précipitations mensuelles et annuelles, la température et d'autres variables hydrométéorologiques, la plateforme **Climate Engine** a été mobilisée. Développée en collaboration avec la NASA, le Desert Research Institute (DRI) et Google Earth Engine, cette application en ligne permet de générer et d'extraire des séries temporelles et des cartes spatiales à partir de jeux de données satellites (comme CHIRPS ou GRIDMET). Ces données ont été utilisées pour quantifier la variabilité spatiale et temporelle des précipitations dans la zone d'étude, ce qui constitue un facteur déterminant dans l'évaluation du potentiel de recharge.

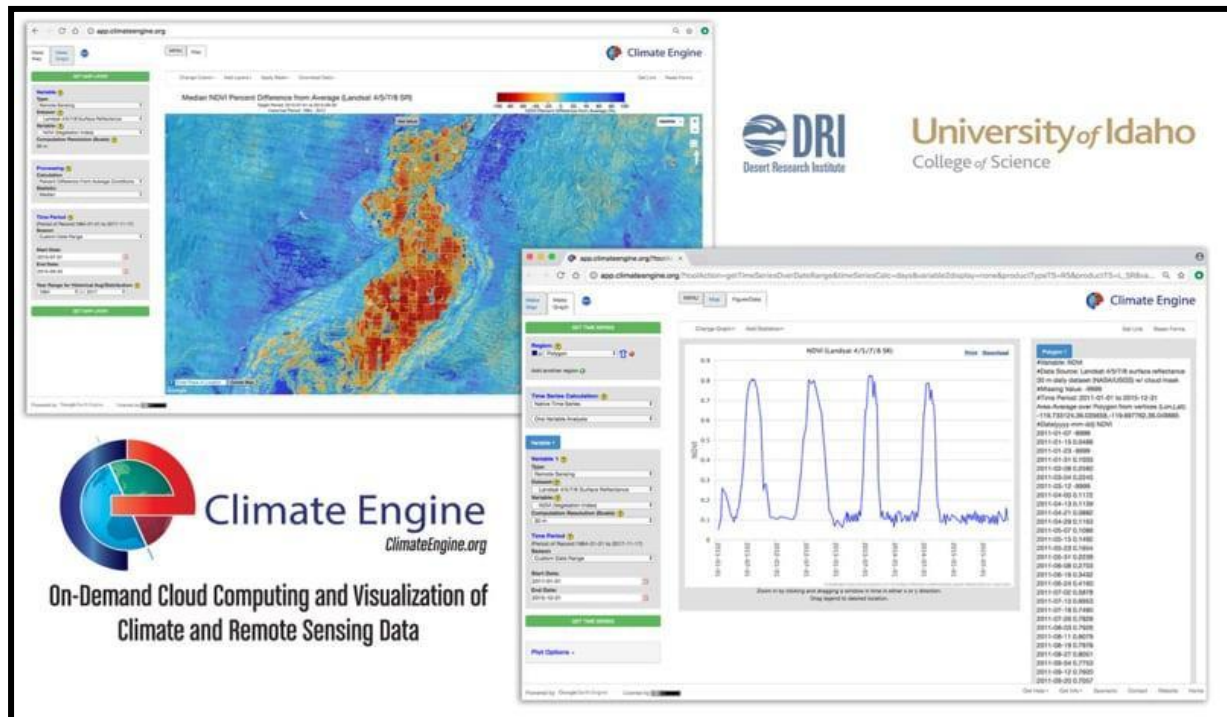


Figure.III. 2 : extraction des données manquantes selon (<https://www.climateengine.org/>).

Le portail de la United States Geological Survey (USGS) : En complément, le portail de la United States Geological Survey (USGS) a fourni des images satellites à haute résolution ainsi que des données géospatiales utiles pour l'occupation du sol, la détection des linéaments, et la validation visuelle des caractéristiques morphologiques du bassin. Les produits dérivés du satellite Landsat et du programme SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) ont notamment été intégrés dans le SIG pour extraire des informations topographiques telles que l'altitude et la pente.

En complément, le portail de la United States Geological Survey (USGS) a fourni des images satellites à haute résolution ainsi que des données géospatiales utiles pour l'occupation du sol, la détection des linéaments, et la validation visuelle des caractéristiques morphologiques du bassin. Les produits dérivés du satellite Landsat et du programme SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) ont notamment été intégrés dans le SIG pour extraire des informations topographiques telles que l'altitude et la pente.

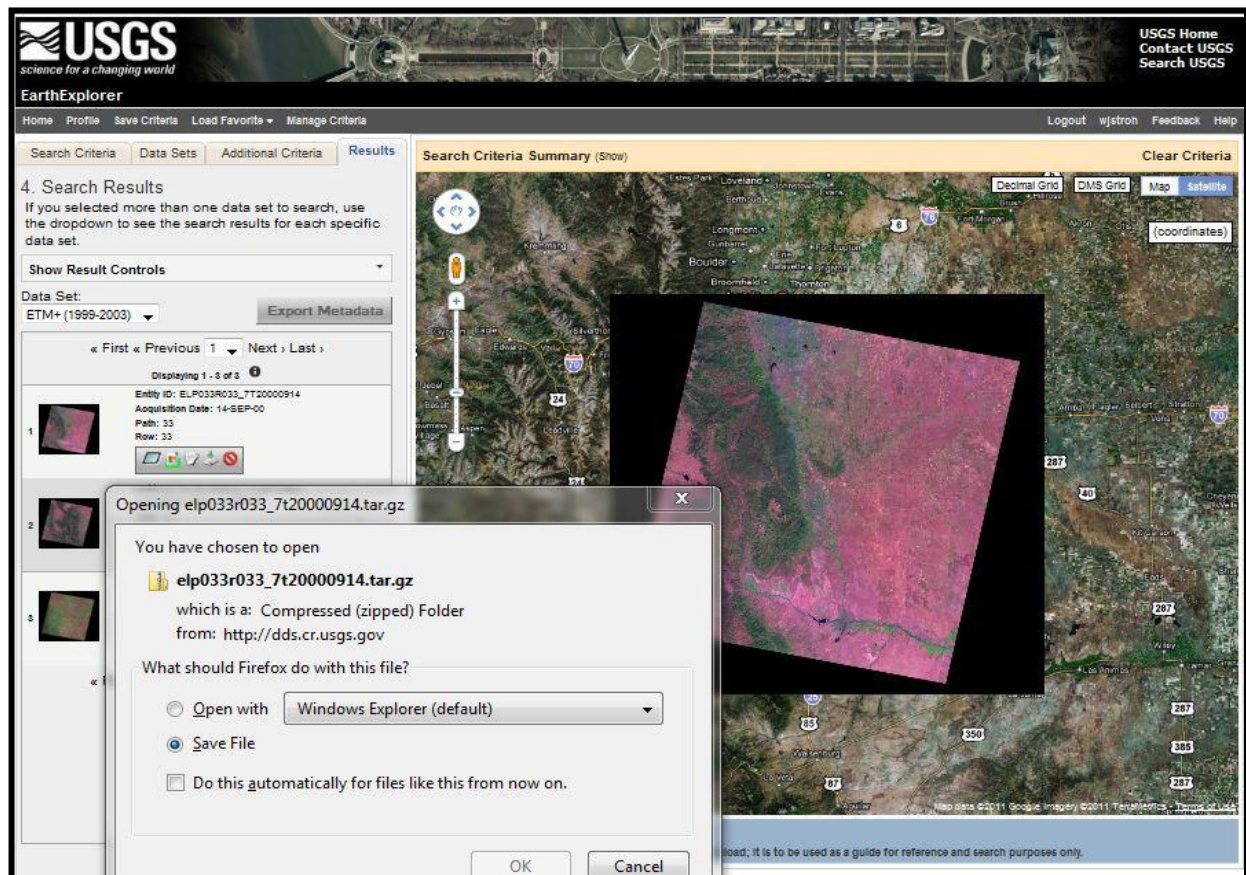


Figure.III. 3 : Extraction des images satellitaires selon (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

Les images satellitaires :

Les images satellites sont des données spatiales capturées par des capteurs embarqués sur des satellites. En hydrogéologie, elles permettent d'analyser divers paramètres de surface influençant les eaux souterraines, comme les linéaments, l'occupation du sol, la topographie, les précipitations ou encore la couverture végétale. Ces informations sont essentielles pour identifier les zones potentielles de recharge, surveiller les ressources en eau et orienter la gestion durable des nappes. Des satellites comme Landsat, Sentinel-2, ou ASTER sont couramment utilisés dans ce domaine.

Troisième chapitre : Application des systèmes SIG pour l'élaboration de la carte des potentialités hydriques

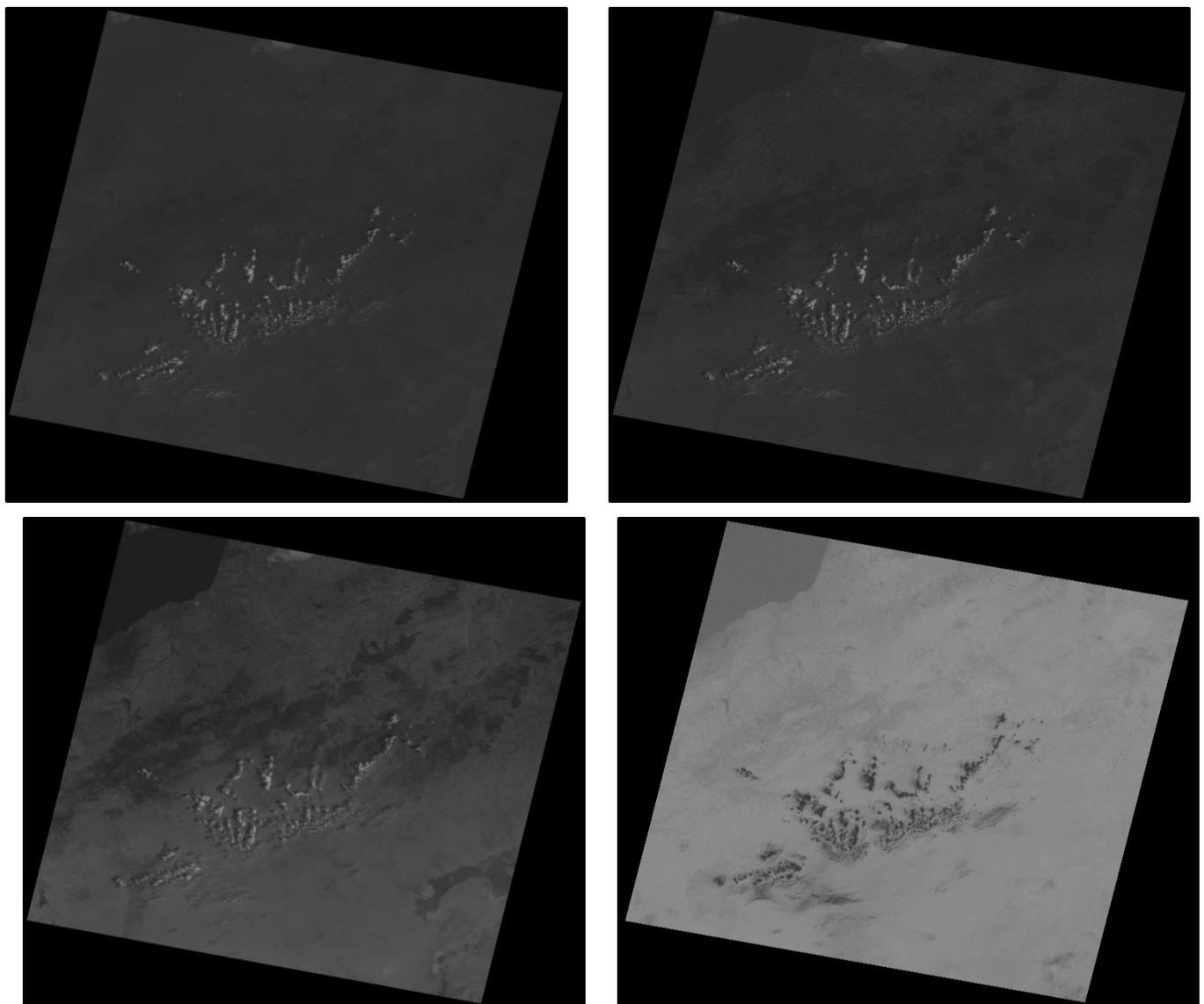


Figure.III. 4: images satellitaires de sous bassin versant de Sikkak.

La cartographie :

Nous avons utilisé la carte géologique interprétative de Tlemcen (1/20000) de l'ANRH.

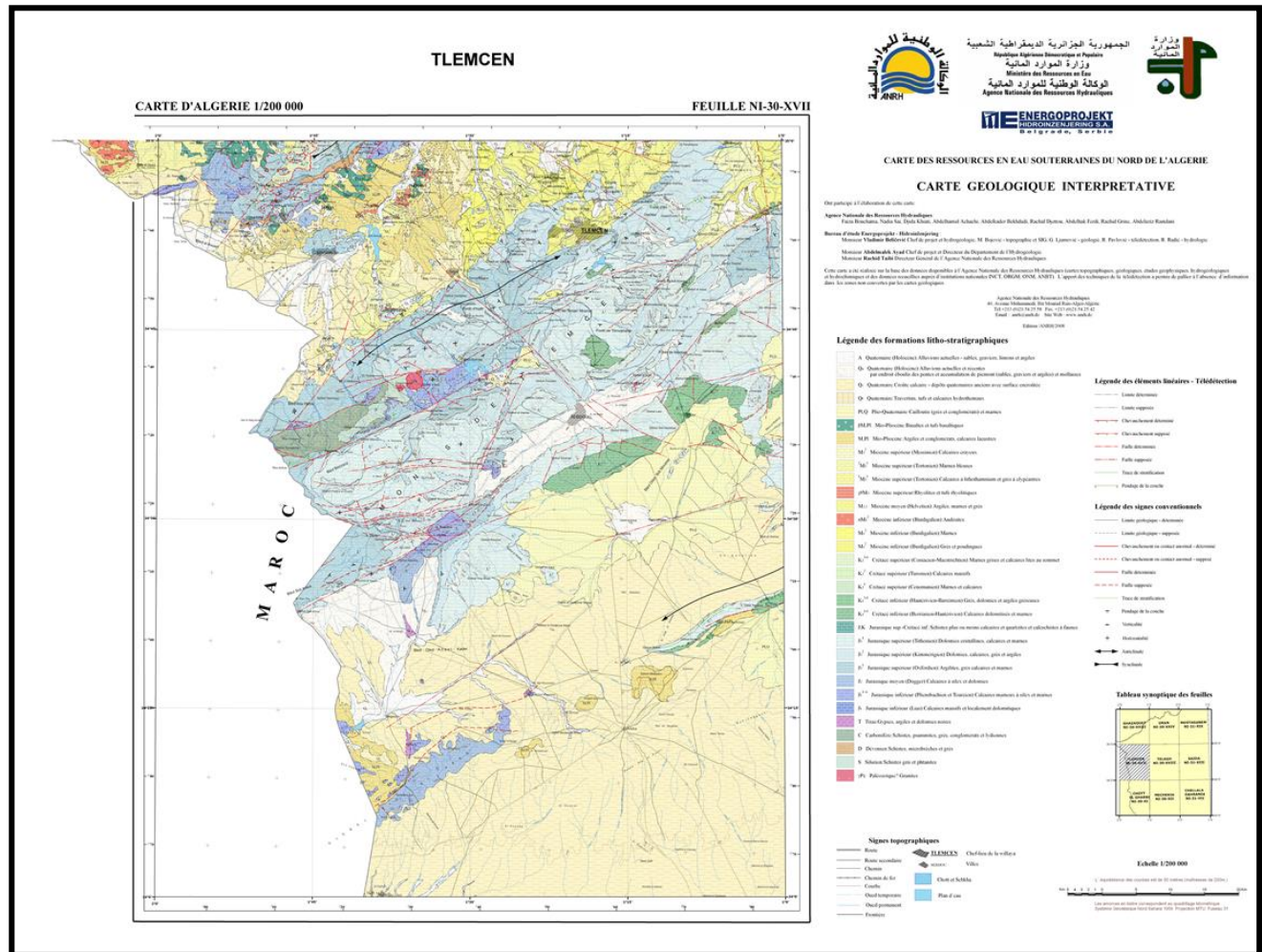


Figure.III. 5 : carte géologique interprétative ANRH (1/20000).

III-Analyse multicritères :

Le traitement initial dans QGIS/ArcGIS implique la conversion des données vectorielles en raster via l'outil "Polygone vers Raster" et le calcul de la densité des linéaments à l'aide de l'outil "Line Density" ou du plugin équivalent dans QGIS, permettant la création d'une carte de densité en m/m². La phase de classification et reclassification attribue des valeurs aux différentes lithologies selon leur perméabilité et aux densités de linéaments.

L'analyse multicritères applique une pondération spécifique, basée sur la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) qui sert à définir un poids pour chaque facteur en fonction de son importance (tableau n° III.1) en utilisant les outils "Weighted Overlay" dans ArcGIS ou "Raster Calculator" dans QGIS, selon la formule :

$$(Pente * 20) + (Occupation\ du\ sol * 6) + (Précipitations * 29) + (Géologie * 20) + (Linéaments * 5) + (Densité\ de\ drainage * 5) + (Altitude * 15).$$

III-1. Cadre théorique de l'analyse :

L'analyse multicritère pour identifier les zones de recharge des aquifères utilise une approche pondérée où :

- Chaque facteur environnemental se voit attribuer un poids selon son importance.
- Chaque classe au sein d'un facteur reçoit une note reflétant son influence sur la recharge.

III-2. Attribution des poids aux facteurs :

Le document montre que les sept facteurs ont reçu des poids différents (sur un total de 100%)

III-3. Méthode de notation des classes :

Pour chaque facteur, les différentes classes ont été notées sur une échelle de 1 à 5, où 5 représente les conditions optimales pour la recharge des aquifères. Cette notation est basée sur :

- L'influence physique directe sur le processus d'infiltration.
- Des études empiriques sur le comportement hydraulique des différents milieux.
- Les connaissances hydrogéologiques établies.

III-4. Calcul détaillé de l'influence de chaque classe :

Influence (%) = (Note de la classe / Note maximale possible) × Poids du facteur

Donc pour une note maximale de 5 : **Influence (%) = (Note/5) × Poids**

A. Géologie (Poids = 20%):

Classe	Note	Calcul	Influence (%)
Jurassique	5	$(5/5) \times 20$	20.0
Crétacé	4	$(4/5) \times 20$	16.0
Miocène	1	$(1/5) \times 20$	4.0
Quaternaire	4	$(4/5) \times 20$	16.0

Justification des notes :

Les notes attribuées aux différentes formations géologiques reflètent leur potentiel de recharge en fonction de leurs caractéristiques lithologiques et de leur perméabilité. Le **Jurassique** obtient la note maximale de 5/5, en raison de la présence de formations calcaires souvent karstifiées, offrant une forte perméabilité secondaire. Le **Crétacé** est noté 4/5, car il présente une perméabilité modérée, généralement liée au degré de fracturation des roches. Le **Miocène** reçoit une note de 1/5 en raison de la faible perméabilité de ses formations, probablement marneuses ou argileuses. Enfin, les formations **du Quaternaire** sont notées 4/5, car elles sont constituées d'alluvions et de sédiments récents généralement poreux et bien perméables.

B. Densité de drainage (Poids = 5%) :

Classe (unités)	Note	Calcul	Influence (%)
0 – 8778.44	1	$(1/5) \times 5$	1.0
8778.44 – 16459.58	2	$(2/5) \times 5$	2.0
16459.58 – 23701.799	3	$(3/5) \times 5$	3.0
23701.799 – 31821.86	4	$(4/5) \times 5$	4.0
31821.86 – 55962.58	5	$(5/5) \times 5$	5.0

Justification des notes :

La densité de drainage a été notée en considérant qu'une densité plus élevée est associée à une meilleure capacité d'infiltration. Ainsi, la classe présentant la densité la plus élevée a reçu la note maximale. Bien que cette relation puisse sembler contre-intuitive, elle peut s'expliquer par le fait qu'une densité élevée implique une plus grande interface entre l'eau et le sol, augmentant ainsi les opportunités d'infiltration. Par ailleurs, dans le contexte spécifique de l'étude, une forte densité de drainage pourrait également refléter la présence d'un substrat plus perméable

C. Précipitations (Poids = 29%):

Classe (mm)	Note	Calcul	Influence (%)
305.00 – 359.13	1	$(1/5) \times 29$	5.8
359.13 – 403.92	2	$(2/5) \times 29$	11.6
403.92 – 444.98	3	$(3/5) \times 29$	17.4
444.98 – 484.18	4	$(4/5) \times 29$	23.2
484.18 – 542.97	5	$(5/5) \times 29$	29.0

Justification des notes :

La notation attribuée repose sur une relation directement proportionnelle entre la quantité de précipitations et le potentiel de recharge. En effet, plus les précipitations sont abondantes, plus la quantité d'eau disponible pour l'infiltration dans le sol est importante, favorisant ainsi la recharge des nappes souterraines. Cette relation linéaire se traduit naturellement par une notation croissante, reflétant l'impact positif de l'augmentation des précipitations sur le potentiel de recharge.

D. Pente (Poids = 20%):

Classe (%)	Note	Calcul	Influence (%)
0 – 4.45	5	$(5/5) \times 20$	20.0
4.45 – 8.90	4	$(4/5) \times 20$	16.0
8.90 – 15.02	3	$(3/5) \times 20$	12.0
15.02 – 23.93	2	$(2/5) \times 20$	8.0
23.93 – 70.96	1	$(1/5) \times 20$	4.0

Justification des notes :

La pente joue un rôle déterminant dans le processus d'infiltration des eaux. En effet, il existe une relation inverse entre la pente du terrain et la capacité d'infiltration : plus la pente est faible, plus l'infiltration est favorisée, tandis que les fortes pentes accentuent le ruissellement. Ainsi, les zones à pente faible (comprises entre 0 et 4.45 %) reçoivent la note maximale, car l'eau y stagne suffisamment longtemps pour s'infiltrer dans le sol. En revanche, les zones très pentues (supérieures à 23,93 %) sont notées au minimum, car l'eau y ruisselle rapidement, ce qui limite considérablement son infiltration.

E. Occupation du sol (Poids = 6%) :

Classe	Note	Calcul	Influence (%)
Arboriculture	3	$(3/5) \times 6$	3.6
Terrains nus	5	$(5/5) \times 6$	6
Forêts	3	$(3/5) \times 6$	3.6
Culture saisonnière	3	$(3/5) \times 6$	3.6
Céréale	4	$(4/5) \times 6$	4.8

Justification des notes :

L'évaluation des différentes classes d'occupation du sol en fonction de leur impact sur la recharge en eau souterraine a permis d'attribuer des notes allant de 1 à 5. Le terrain nu a obtenu la note maximale (5/5), en raison de l'absence d'interception des précipitations et d'évapotranspiration, favorisant ainsi une infiltration directe des eaux. Les zones de culture céréalière ont reçu une note de 4/5, leur couverture végétale discontinue permettant une bonne infiltration. L'arboriculture et les cultures saisonnières ont été notées 3/5, car elles présentent une évapotranspiration modérée et une interception partielle des précipitations. Le maquis, avec sa

Troisième chapitre : Application des systèmes SIG pour l'élaboration de la carte des potentialités hydriques

végétation permanente, a été noté (3/5) en raison d'une évapotranspiration notable limitant l'infiltration. Enfin, la forêt a reçu la note (3/5), en raison d'une forte interception des pluies par la canopée et d'une évapotranspiration élevée, réduisant significativement la recharge en eau souterraine.

F. Altitude (Poids = 15%) :

Classe (m)	Note	Calcul	Influence (%)
166 – 446.58	5	$(5/5) \times 15$	15.0
446.58 – 679.52	4	$(4/5) \times 15$	12.0
679.52 – 981.29	3	$(3/5) \times 15$	9.0
981.29 – 1251.29	2	$(2/5) \times 15$	6.0
1251.29 – 1516	1	$(1/5) \times 15$	3.0

Justification des notes :

Les basses altitudes ont reçu les notes les plus élevées, car elles correspondent souvent à des zones d'accumulation et de convergence des eaux. De plus, elles présentent généralement des pentes plus faibles, ce qui favorise l'infiltration au détriment du ruissellement. Ces zones peuvent également coïncider avec des plaines alluviales ou des zones de dépôts sédimentaires perméables, propices à la recharge des nappes phréatiques. En revanche, les hautes altitudes sont majoritairement des zones d'érosion, caractérisées par des pentes fortes qui favorisent le ruissellement, limitant ainsi l'infiltration et donc le potentiel de recharge.

G. Densité de linéament (Poids = 5%) :

Classe	Note	Calcul	Influence (%)
0 – 0.043	1	$(1/5) \times 5$	1.0
0.043 – 0.12	2	$(2/5) \times 5$	2.0
0.12 – 0.22	3	$(3/5) \times 5$	3.0
0.22 – 0.36	4	$(4/5) \times 5$	4.0
0.36 – 0.61	5	$(5/5) \times 5$	5.0

Justification des notes :

La densité des linéaments représente un facteur essentiel dans l'évaluation du potentiel de recharge en eau souterraine. Les linéaments correspondent à des structures géologiques telles que les failles et les fractures, qui jouent un rôle crucial en facilitant l'infiltration de l'eau dans le sous-sol. Une densité élevée de linéaments suggère une plus grande présence de ces structures, offrant

Troisième chapitre : Application des systèmes SIG pour l'élaboration de la carte des potentialités hydriques
ainsi davantage de voies préférentielles pour l'infiltration. Par conséquent, la relation entre la densité de linéaments et la potentialité de recharge est directement proportionnelle : plus la densité est élevée, plus le potentiel de recharge est important.

III-5. Calcul du potentiel final de recharge :

Une fois les influences calculées pour chaque facteur et classe, l'analyse spatiale est réalisée dans un environnement SIG (Système d'Information Géographique) comme suit :

1. **Préparation des couches de données** : Chaque facteur est représenté par une couche raster ou vectorielle
2. **Reclassification** : Les valeurs dans chaque couche sont reclassifiées selon les notes attribuées (1-5)
3. **Pondération** : Chaque couche re-classifiée est multipliée par son poids correspondant
4. **Superposition** : Les sept couches pondérées sont additionnées pour produire une carte des potentialités de recharge avec des valeurs théoriques allant de 0 à 100%
5. **Classification du potentiel final** : Les valeurs obtenues sont généralement regroupées en classes :
 - 80-100%: Potentiel très élevé
 - 60-80%: Potentiel élevé
 - 40-60%: Potentiel moyen
 - 20-40%: Potentiel faible
 - 0-20%: Potentiel très faible.

Tableau.III.2 : Critères et pondérations utilisés.

Facteurs	Classes	Poids (%)	Note	Justification:	Influence (%)
Géologie	Quaternaire	20	4	Influence majeure sur la perméabilité et la structure des aquifères.	20
	Crétacé		4		16
	Jurassique		5		4
	Miocène		1		16
Densité de drainage	0 - 8778,44	5	1	Influence secondaire sur les écoulements superficiels.	1
	8778,44 - 16459,58		2		2
	16459,58 - 23701,799		3		3
	23701,799 - 31821,86		4		4
	31821,86 - 55962,58		5		5
Précipitations	305,00 - 359,13	29	1	Source principale d'alimentation des aquifères.	5.8
	359,13 - 403,92		2		11.6
	403,92 - 444,98		3		17.4
	444,98 - 484,18		4		23.2
	484,18 - 542,97		5		29
Pente	0 - 4,45	20	5	Facteur déterminant du ratio infiltration/ruissellement	20
	4,45 - 8,90		4		16
	8,90 - 15,02		3		12
	15,02 - 23,93		2		8
	23,93 - 70,96		1		4
Occupation de sol	Arboriculture	6	3	Influence moyenne sur l'infiltration et l'évapotranspiration.	3.6
	Terrains nus		5		6
	Forêts		3		3.6
	Cultures saisonnières		3		3.6
	Céréale		4		4.8
Altitude	166 - 446,58	15	5	Impact important sur les gradients hydrauliques et zones de recharge.	15
	446,58 - 679,52		4		12
	679,52 - 981,29		3		9
	981,29 - 1251,29		2		6
	1251,29 - 1516		1		3
Densité de linéament	0 - 0,043	5	1	Indicateur secondaire des zones de fracturation favorables à l'infiltration.	1
	0,043 - 0.12		2		2
	0.12 - 0,22		3		3
	0,22 - 0,36		4		4
	0,36 - 0,61		5		5

VI-Interprétation de la carte des potentialités hydriques dans le sous-bassin versant de Sikkak :

La carte thématique ci-dessous montre la répartition spatiale des potentialités en eaux souterraines dans le sous-bassin versant de Sikkak, localisé au Nord-Ouest de l'Algérie. Cette carte résulte de la superposition et de l'analyse multicritère de plusieurs paramètres hydrogéologiques et environnementaux (tels que la pente, l'occupation du sol, la densité de drainage, les précipitations, l'altitude, et les linéaments), intégrés à l'aide d'un Système d'Information Géographique (SIG), QGIS 3.36.

La légende distingue quatre classes de potentialité des eaux souterraines :

Faible, médiocre, forte et excellente.

- **Zone à potentialité excellente (vert clair) :** Cette classe occupe majoritairement la partie sud-est du sous-bassin. Cette distribution est généralement associée à des zones plus basses, où l'accumulation d'eau est favorisée par la convergence des flux de surface, et à une forte densité de linéaments, ce qui facilite l'infiltration des eaux. Ces zones correspondent également à des terrains de faible pente, favorisant l'infiltration plutôt que le ruissellement.
- **Zone à potentialité forte (vert foncé) :** Elle couvre une grande partie centrale et méridionale du bassin. Cette zone présente une bonne infiltration liée à la perméabilité des formations géologiques et à des conditions topographiques relativement favorables. Elle constitue une large portion du bassin, indiquant que le sous-bassin présente un potentiel relativement favorable à la recharge en eau souterraine.
- **Zone à potentialité médiocre (jaune) :** Cette classe est plus localisée, principalement au Nord-Ouest et au Nord du bassin, notamment autour de la ville d'Hennaya. Ces zones coïncident souvent avec des zones de pente plus marquée, des formations moins perméables ou encore une faible densité de linéaments, limitant la capacité d'infiltration.
- **Zone à potentialité faible (rouge) :** Elle est très limitée et morcelée. Ces zones sont probablement en altitude ou constituées de formations géologiques peu perméables, avec un ruissellement fort et une faible capacité de recharge. Ces zones pourraient aussi être influencées par une occupation du sol défavorable à l'infiltration.

On note que les zones urbaines, situées respectivement au Sud-Ouest et au Nord-Ouest du sous-bassin, se trouvent à proximité des zones à potentialité médiocre voire faible. Cela reflète peut-être une urbanisation accrue et une imperméabilisation des sols, ce qui limite l'infiltration. En revanche, les zones rurales ou forestières semblent correspondre aux classes de potentialité forte à excellente.

La dominance des classes fortes et excellentes indique que le sous-bassin de Sikkak présente des conditions globalement favorables à la recharge en eau souterraine. Ces zones sont favorables pour l'implantation de forages ou de puits de captage, pour la recharge artificielle et la protection des zones de recharge contre la pollution.

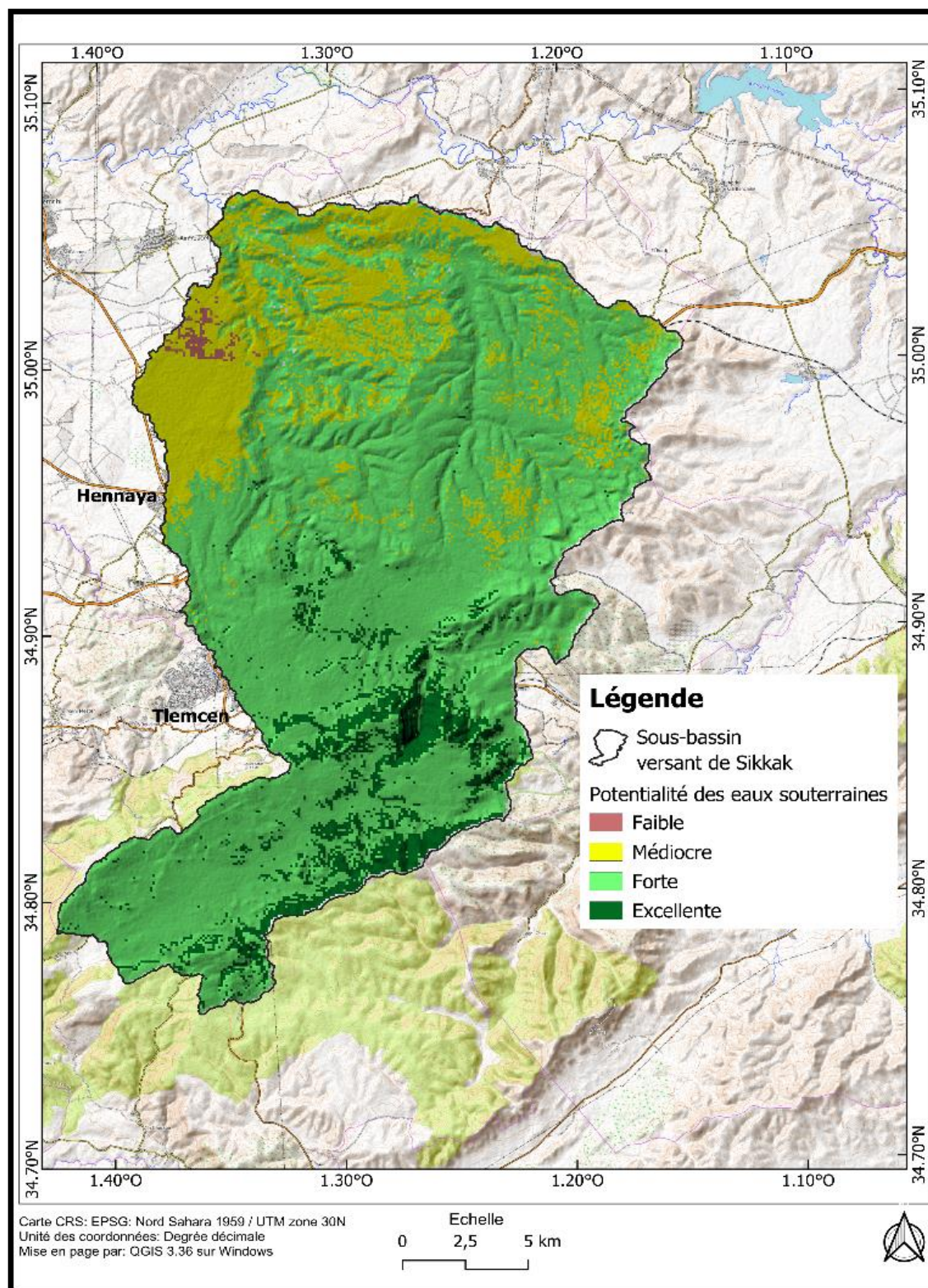


Figure.III. 6 : Carte de potentialités hydriques du sous bassin versant de Sikkak.

Conclusion et recommandations :

Afin de juger la fiabilité de la carte des potentialités hydriques, il sera judicieux d'établir des campagnes piézométriques dans ce sous bassin versant afin de voir la répartition spatiale des charges hydrauliques et de les comparer avec les zones déduites dans la carte des potentialités. Et si cette carte nous renseigne sur les zones à potentialités hydriques dans ce bassin versant, elle met en lumière la nécessité d'établir des recommandations telles que :

- La protection des zones à fort potentiel de recharge, identifiées principalement dans les secteurs nord et nord-est du bassin, caractérisés par une faible pente (selon la carte des pentes), une couverture végétale faible (carte d'occupation du sol) et une forte densité de linéaments (carte des fractures).
- Réaliser des ouvrages pour l'aménagement des zones à pente modérée (5–15 %), avec des fossés ou des barrages pour ralentir l'eau de pluie et l'aider l'eau à pénétrer dans le sol.
- Protéger le réseau hydrographique naturel, identifié sur la carte de densité de drainage. Les oueds, s'ils sont bien gérés, peuvent jouer un rôle important dans l'alimentation des nappes phréatiques. Leur conservation et la lutte contre leur pollution sont des actions prioritaires.
- La sensibilisation des habitants et les agriculteurs pour qu'ils adoptent des pratiques durables pour la protection de ces ressources hydriques.

En outre, il serait bénéfique de mettre en place un système de suivi continu des niveaux piézométriques et des paramètres qualitatifs des eaux souterraines. Ce suivi permettrait de détecter rapidement toute anomalie ou dégradation des ressources, et d'ajuster les stratégies de gestion en conséquence.

- Une collaboration étroite avec les acteurs locaux, notamment les autorités compétentes et les organisations communautaires, est essentielle pour assurer l'efficacité des mesures proposées. Des ateliers de formation pourraient être organisés afin de renforcer les capacités des gestionnaires locaux en matière de gestion intégrée des ressources en eau.
- Par ailleurs, l'intégration des données hydrologiques, géologiques et climatiques dans un système d'information géographique (SIG) faciliterait une analyse dynamique et une prise de décision éclairée. Cela permettrait également de modéliser les impacts des changements climatiques et des activités anthropiques sur les potentialités hydriques du bassin versant.
- Enfin, il convient d'encourager la recherche scientifique dans la zone, en soutenant des études approfondies sur les mécanismes de recharge et la vulnérabilité des aquifères.

Ces connaissances supplémentaires viendraient compléter les cartes existantes et affinaient les recommandations pour une gestion durable de l'eau. La combinaison de ces approches techniques, participatives et scientifiques garantirait une préservation optimale des potentialités hydriques du bassin, tout en répondant aux besoins actuels et futurs des populations et des écosystèmes dépendants.

CONCLUSION GENERALE :

Cette étude est une contribution pour identifier les zones qui présentent un fort potentiel de recharge des eaux souterraines dans le sous bassin versant de Sikkak, en s'appuyant sur une approche cartographique intégrée au Système d'Information Géographique (SIG) et à la télédétection.

Le sous-bassin versant de Sikkak, affluent de la Tafna, est situé dans le Nord-Ouest de l'Algérie et présente des caractéristiques morphométriques distinctives, une forme allongée et un réseau hydrographique modérément développé. Son relief accidenté, variant de 300 à 1500 m avec plus de 52% de sa surface au-dessus de 1200 m, s'accompagne d'une occupation des sols diversifiée, dominée par les terres agricoles, l'arboriculture et les forêts de densité moyenne.

Le climat du sous bassin est caractérisé par une moyenne annuelle des précipitations de 300.4 mm, avec une variabilité interannuelle (520 mm en 2004 à 150 mm en 2024). Le régime thermique présente des variations saisonnières significatives, avec des températures oscillantes entre 33,4°C en été et 6,8°C en hiver, tandis que les indices climatiques et les abaques confirment le caractère semi-aride de la région, avec une période sèche qui s'étend d'avril à octobre. Le bilan hydrologique révèle une évapotranspiration réelle de 271 mm/an et potentielle de 863,69 mm/an, avec un déficit agricole de 592.69 mm/an.

L'étude géo-structurale et hydrogéologique du sous-bassin versant de Sikkak montre une structure géologique variée, caractérisée par quatre unités lithologiques majeures, chacune présente des caractéristiques distinctes de perméabilité et de potentiel de recharge :

- * Les calcaires du Jurassique, occupent le centre et le Sud-Est du bassin, se caractérisent par leur forme karstifiée, offrant un excellent potentiel de recharge.
- * Les Marno-calcaires du Crétacé, présents dans la zone centrale et Sud montre un potentiel de recharge variable, dépendant du degré de fracturation.
- * Les Marnes du Miocène, localisées au Nord et au centre du bassin, présentent une formation peu perméable, avec une faible capacité de recharge.
- * Les Alluvions du Quaternaire, situées au Nord-Ouest du bassin, se distinguent par leur formation très perméable, offrant un potentiel très favorable à la recharge des nappes.

L'analyse des linéaments a permis d'identifier trois zones principales :

-Des zones à faible densité ($\leq 0,12 \text{ m/m}^2$), couvrant la majorité du bassin, avec un faible potentiel d'infiltration,

Conclusion générale

- Des zones à densité modérée ($0,12-0,36 \text{ m/m}^2$), localisées au centre et à l'Ouest, présentant un potentiel d'infiltration moyen,
- Des zones à forte densité ($0,36-\geq 0,48 \text{ m/m}^2$), situées au centre et à l'Est, caractérisées par un fort potentiel d'infiltration.

Les zones les plus favorables à la recharge des nappes phréatiques sont celles qui combinent une lithologie perméable (alluvions ou calcaires karstifiés) avec une forte densité de linéaments. Cette étude fournit ainsi des informations essentielles pour la gestion des ressources en eau dans la région, soulignant l'importance cruciale de la compréhension des structures géologiques dans l'évaluation du potentiel de recharge des nappes souterraines du sous-bassin versant de Sikkak.

La carte de la répartition spatiale des potentialités en eaux souterraines dans le sous-bassin versant de Sikkak résulte de la superposition et de l'analyse multicritère de plusieurs paramètres hydrogéologiques et environnementaux (tels que la pente, l'occupation du sol, la densité de drainage, les précipitations, l'altitude, et les linéaments), intégrés à l'aide d'un Système d'Information Géographique (SIG). Nous avons obtenu quatre classes de potentialité: Faible, médiocre, forte et excellente. Cependant pour valider la fiabilité de la carte des potentialités hydriques, il est essentiel d'établir des campagnes piézométriques dans le sous bassin versant ainsi que la mise en place d'un système de suivi continu des niveaux piézométriques et des paramètres qualitatifs des eaux souterraines qui s'avère également nécessaire pour détecter toute forme de pollution et pour une meilleure gestion du point de vu quantitatif et qualitatif.

Annexes:

Tableau.1 : Précipitations moyennes annuelles (1999-2024).

Années	P (mm)
1999	339
2000	301
2001	405
2002	282
2003	518
2004	431
2005	190,1
2006	255,6
2007	307,9
2008	304,6
2009	415,7
2010	362,4
2011	382,3
2012	225,1
2013	264,1
2014	348,8
2015	236,3
2016	320,9
2017	278,3
2018	363,7
2019	306,8
2020	235,4
2021	192,3
2022	330
2023	179,6
2024	141,6

Logiciel ArcGIS :

Est une plateforme géospatiale développée par Esri, qui permet de créer, de gérer, d'analyser, de cartographier et de partager des données géographiques. Elle comprend divers logiciels et services, tels qu'ArcGIS Desktop, ArcGIS Online, ArcGIS Enterprise, qui permettent d'intégrer et de connecter des données dans un contexte géographique.



Logiciel QGIS :

Est un système d'information géographique (SIG) gratuit et en accès libre / Open Source, ou géodatabase, sous licence GNU General Public License. QGIS fonctionne sous Linux, Unix, Mac OSX, Windows et Android et prend en charge de nombreux formats et fonctionnalités vectoriels, raster et de base de données.





Photo.1 : Direction du barrage de Sikkak.



Photo 2 :Essai de mesure piézométrique.



Photo 3: Bureau d'auscultation.



Photo 4 : Station climatologique.

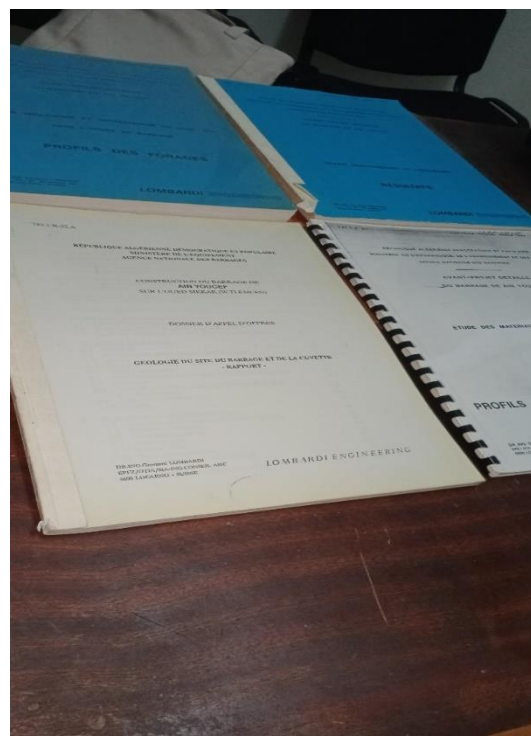


Photo 5 : fiche technique du barrage de Sikkak.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

Benest.M et Bensalah.M (1999) : La couverture mésozoïque et cénozoïque du domaine, Tlemcenien (avant pays d'Algérie occidentale) : stratigraphie et paléo-environnement. Bull. Serv. Géol. Algérie. 6 n°1 (41-59).

Bonnet.M, Delarozier-Bouillin.O, Jusserand.C et Roux.P (1970) : Calcul automatique des bilans d'eau mensuels et annuels par les méthodes de THORNTHWAITE et de TURC, 21 pages.

Bouanani.A (2004) : Hydrologie, transport solide et modélisation étude de quelques sous bassins de la Tafna (NW – Algérie), thèse. Doctorat.250 pages

Collignon.B (1993) : Les aquifères karstiques des Monts de Tlemcen (Algérie), ressource en eau et exploitation. 11th UIS, Congress, Beijing, China, august 1993. Proceedings, p.166. International.

Derbal.W et Douar.E (2021) : Etude de risque hydrologique du bassin versant de l'Oued Sikkak, Mém. Master, 73pages.

Ghenim.O (2020) : Analyse conjointe des régimes pluviométrique et hydrologique du bassin de Oued Chouly, Mém.Master,63pages.

Hakmi.Z et Gatchouli.A (2013) : Quel impact sur la variabilité des écoulements dans le bassin versant de l'oued SIKKAK. Mém. Master, 63 pages.

Hayane.S (1983) : Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du bassin versant d'Oued Sikkak, Thèse.Doct 3^{ème} cycle, 215 pages.

Merkache.S et Zair.Z (2017) : Contribution à la quantification du Transport Solide dans un cours d'eau : Cas du bassin versant de l'Oued Sikkak (N.W algérien), Mém. Master. 171 pages.

Yebedri.L (2023) : étude de la vulnérabilité des eaux du bassin versant de la Tafna (Algérie, Nord-Occidental), thèse. Doctorat, 229 pages.

Sites :

(<https://earthexplorer.usgs.gov/>)

(<https://mghydro.com/watersheds/>)

(<https://www.climateengine.org/>)

(<https://www.techscience.com>)

ملخص:

تُعَدُّ تحديد مناطق تزويد المياه الجوفية من القضايا الأساسية لتحقيق إدارة مستدامة للموارد المائية، خاصة في المناطق شبه القاحلة مثل شمال غرب الجزائر. يهدف هذا البحث إلى تحديد ورسم خرائط المناطق ذات الإمكانية العالية للتزويد في الحوض الفرعي لسد سكاك. ولتحقيق ذلك، تم اعتماد منهجية تعتمد على نظم المعلومات الجغرافية (GIS) والاستشعار عن بعد (RS) لتحليل عدة عوامل تؤثر على التزويد مثل الجيولوجيا، التساقطات، الارتفاع، الانحدار، استعمالات الأرض، الغطاء الأرضي، شبكة التصريف وكثافة الخطوط البنيوية.

تم استخدام طريقة التحليل الهرمي (AHP) لتحديد الأوزان النسبية لكل عامل وترتيب الطبقات حسب تأثيرها على قابلية المنطقة للتزويد. مكّنت هذه الطريقة من إنتاج خريطة موضوعية تُميز بين خمس فئات من الإمكانية: ضعيفة جداً، ضعيفة، متوسطة، جيدة وجيدة جداً.

أظهرت النتائج أن المناطق ذات الإمكانية العالية للتزويد تتواجد بشكل أساسي في المناطق التي تتوفر على نفاذية عالية، وكثافة مرتفعة للخطوط البنيوية، وانحدارات منخفضة، وغطاء نباتي ضعيف.

توفر الخرائط المنتجة أداة قيمة لصانعي القرار ومُدبري الموارد المائية في إطار التخطيط ووضع استراتيجيات لحماية واستغلال الموارد الجوفية. كما يُمكن أن تُشكّل هذه الدراسة قاعدة لأبحاث مستقبلية أكثر تفصيلاً في مجال النمذجة الهيدرولوجية أو الهيدرولوجية.

الكلمات المفتاحية: الحوض الفرعي لسد سكاك؛ نظم المعلومات الجغرافية؛ الاستشعار عن بعد؛ إمكانيات التزويد؛ الإدارة المستدامة

Résumé :

La localisation des zones de recharge des eaux souterraines est un enjeu majeur pour une gestion durable des ressources en eau, en particulier dans les régions semi-arides, comme le Nord-Ouest de l'Algérie. Le présent mémoire a pour objectif d'identifier et de cartographier les zones potentielles de recharge dans le sous-bassin versant de Sikkak. Pour cela, une approche combinant les Systèmes d'Information Géographique (SIG) et la télédétection (RS) a été utilisée afin d'analyser plusieurs paramètres influençant la recharge : géologie, précipitations, altitude, pente, occupation du sol, utilisation du sol, drainage et densité des linéaments. La méthode du Processus Hiérarchique Analytique (AHP) a été appliquée pour attribuer des pondérations aux différents facteurs et hiérarchiser les classes, selon leur influence sur le potentiel de recharge. Les résultats ont permis de produire une carte thématique distinguant cinq classes de potentiel de recharge : très faible, faible, modéré, bon et très bon.

L'analyse a révélé que les zones à potentiel de recharge élevé se situent principalement dans les secteurs caractérisés par une perméabilité favorable, une forte densité de linéaments, des pentes faibles et une couverture végétale réduite.

Les cartes produites offrent un outil précieux pour les décideurs et les gestionnaires de l'eau dans le cadre de la planification et de la mise en place de stratégies de préservation et de valorisation des ressources en eaux souterraines. Ce travail servira également de base pour des recherches futures, notamment dans le cadre de modélisations hydrogéologique ou hydrologique plus détaillées.

Mots-clés : Sous-bassin de Sikkak ; SIG ; Télédétection ; Potentiel de recharge ; Gestion durable

Abstract:

Identifying groundwater recharge zones is a key challenge for sustainable water resource management, especially in semi-arid regions like northwestern Algeria. This study aims to identify and map the potential recharge zones in the Sikkak sub-watershed. To achieve this, a combined approach using Geographic Information Systems (GIS) and Remote Sensing (RS) was employed to analyze several parameters influencing recharge: geology, precipitation, elevation, slope, land use, land cover, drainage, and lineament density.

The Analytic Hierarchy Process (AHP) method was applied to assign weights to the various factors and prioritize the classes based on their influence on recharge potential. The results allowed the production of a thematic map distinguishing five classes of recharge potential: very low, low, moderate, good, and very good.

The analysis revealed that areas with high recharge potential are mainly located in zones characterized by favorable permeability, high lineament density, gentle slopes, and low vegetation cover.

The produced maps provide a valuable tool for decision-makers and water managers in planning and implementing strategies for the protection and sustainable use of groundwater resources. This work also serves as a basis for future studies, particularly in more detailed hydrogeological or hydrological modeling.

Keywords: Sikkak sub-watershed; GIS; Remote Sensing; Recharge Potential; Sustainable Management.