

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 – TLEMSEN
كلية علوم الطبيعة والحياة، وعلوم 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

Mr BENDJAFER Hocine

En vue de l'obtention du

Diplôme de MASTER

En Hydrogéologie.


Thème

**CONTRIBUTION A L'IDENTIFICATION DES ZONES POTENTIELLES DE RECHARGE :
CAS DE LA HAUTE TAFNA (NORD-OUEST ALGERIEN)**

Soutenu le 2025, devant le jury composé de :

Président	Mr BENCHAIB.A	M.C.B	Université de Tlemcen.
Encadrant	Mr BOUDJEMA.A	M.C.A	Université de Tlemcen.
Co-Encadrant	Mme GUETTAIA.S	M.C.A	Université de Tlemcen.
Examinatrice	Mme DJELAD.R	M.A.A	Université de Tlemcen.

Année universitaire 2024 /2025.

قال الله تعالى 

(أَلَمْ تَرَ أَنَّ اللَّهَ أَنْزَلَ مِنَ السَّمَاءِ مَاءً فَسَلَكَهُ يَنَابِيعَ فِي الْأَرْضِ ثُمَّ يُخْرِجُ بِهِ زَرْعًا مُخْتَلِفًا أَلْوَانُهُ)

- سورة الزمر، الآية 21

قال الله تعالى 

(فَصَبَّبْنَا عَلَيْهِ الْمَاءَ صَبًّا ۝ ثُمَّ شَقَقْنَا الْأَرْضَ شَقًّا)

- سورة عبس، الآيتان 25-26

REMERCIEMENTS:

À l'issue de ce travail, qui représente pour moi bien plus qu'un simple exercice académique, je ressens le besoin sincère d'exprimer ma profonde gratitude envers toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de ce mémoire. Ce cheminement, parfois semé d'incertitudes, mais toujours porté par la volonté d'apprendre, n'aurait pu aboutir sans le soutien et l'éclairage de ceux qui ont su allier exigence et bienveillance.

Je remercie avant tout Allah, le Tout-Puissant, pour la force intérieure, la patience et la clarté d'esprit qu'il m'a accordées tout au long de ce parcours.

Mes remerciements les plus sincères s'adressent à Monsieur Boudjema Abderrezak et Madame Guettaia Sabrina, mes encadreurs, pour leur accompagnement rigoureux, leur écoute précieuse et leur disponibilité exemplaire. Leur exigence méthodologique et leur regard critique ont été pour moi des repères essentiels, et leur confiance a nourri ma motivation. Ce travail porte, sans aucun doute, la marque de leur encadrement clair.

Je tiens également à remercier chaleureusement les membres du jury Mr Benchaib Abdelwahid et Mme Djelad Rahima, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'évaluer ce mémoire. Leurs remarques pertinentes et leurs suggestions éclairées constituent pour moi un enrichissement précieux.

Ma reconnaissance va aussi à l'ensemble des enseignants du Département des sciences de la terre et de l'univers, de la Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers de l'Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen. Leurs enseignements, au-delà des savoirs transmis, ont éveillé ma curiosité et affiné ma rigueur scientifique. Je n'oublie pas toutes celles et ceux qui, par un mot d'encouragement, une présence discrète ou un geste solidaire, m'ont soutenu tout au long de ce parcours. Chaque marque d'attention a eu son importance.

Enfin, je remercie de tout cœur ma famille et mes amis, pour leur présence constante, leur patience inestimable et leur soutien moral indéfectible. Sans eux, cette aventure humaine et intellectuelle n'aurait pas eu la même profondeur.

DEDICACES :

À celle qui fut la lumière lorsque mes chemins s'assombrissaient, À celle qui m'aportée dans son cœur bien avant que j'tienne un stylo, À celle qui m'a appris que la patience est la clé de chaque porte fermée, À ma chère mère (**Boudjema.A**), toi qui fus mon refuge et mon soutien, toi dont les prières si lencieuses m'ont donné des ailes pour affronter les tempêtes. Chaque mot de ce mémoire porte l'empreinte de ta tendresse, chaque pas vers l'aboutissement est le fruit de ta bénédiction. À toi seule, je dédie ce travail avec tout mon amour et ma fierté.

À **mon père** bien-aimé, homme de cœur et de principes, dont la force tranquille et les sacrifices ont tracé ma voie.

À **mon frère Yasser**, compagnon d'enfance et âme sincère, ta présence discrète mais constante m'a toujours rassuré et motivé. Tu es un soutien silencieux mais inestimable.

À ma famille, refuge constant, chaleur indéfectible et source inépuisable de réconfort. À **mes amis fidèles**, pour leur soutien dans les moments de doute et leur joie dans les instants de réussite.

À tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à mon cheminement, ce travail vous est dédié avec respect et gratitude.

ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تحديد المناطق المناسبة لتغذية المياه الجوفية في الحوض الفرعي سبدو، الواقع في الجزء العلوي من (SIG) الحوض المائي تافنة. ولتحقيق هذا الهدف، تم اعتماد مقاربة خرائطية مدمجة ضمن نظام المعلومات الجغرافية

تعتمد عملية تقييم قابلية التغلغل على مجموعة من المعايير المكانية، تشمل الجيولوجيا، والانحدار، والشبكة الهيدرولوجية، واستعمالات الأراضي، والهطول المطري، وكثافة الفوالق، حيث تم تمثيل كل معيار بخريطة موضوعية

(AHP) وقد تم ترتيب هذه المعايير وتوزينها حسب تأثيرها على عملية التغذية باستخدام منهجية التحليل الهرمي

إنتاج خريطة توضح الإمكانات المختلفة للتغذية، مقسمة إلى ثلاث (SIG) أتاححت عملية إدماج هذه المعطيات ضمن بيئة درجات: مرتفعة، متوسطة، وضعيفة

أظهرت النتائج أن بعض المناطق في منطقة سبدو، والتي تتسم بتكوينات جيولوجية نفوذة، وطبوغرافيا معتدلة، وغطاء نباتي طبيعي، تمتلك إمكانات عالية للتغذية

في المقابل، تمثل المناطق ذات الإمكانات الضعيفة أراضي ذات انحدار شديد ونفاذية منخفضة

وتعدّ هذه النتائج أساساً علمياً مهماً لتوجيه إجراءات الإدارة المستدامة لموارد المياه الجوفية، كما تبرز أهمية حماية المناطق ذات الإمكانات العالية للتغذية من الضغوطات البشرية المتزايدة مثل التوسع العمراني، وذلك لضمان استدامة الموارد المائية المحلية.

الكلمات المفتاحية

إمكانية التزويد، نظم المعلومات الجغرافية، طريقة (SIG) ، (تافنة العليا) الحوض الفرعي سبدو

عملية التسلسل الهرمي التحليلي (AHP). QGIS.

Résumé:

Cette étude vise à identifier les zones favorables à la recharge des nappes phréatiques dans le sous bassin versant de Sebdou, situé dans la partie amont du bassin versant de la Tafna. Pour ce faire, une approche cartographique intégrée au sein d'un Système d'Information Géographique (SIG) a été mobilisée. L'évaluation de la capacité d'infiltration repose sur un ensemble de critères spatiaux, notamment la géologie, la pente, le réseau hydrographique, l'occupation du sol, les précipitations et la densité des linéaments, chacun représenté sous forme de carte thématique. Ces paramètres ont été hiérarchisés et pondérés selon leur influence sur le processus de recharge, à l'aide de la méthode AHP (Analyse Hiérarchique des Processus). L'intégration de l'ensemble des données dans l'environnement SIG a permis la génération d'une carte des potentialités de recharge, distinguant trois niveaux : fort, moyen et faible. Les résultats montrent que certaines zones de la région de Sebdou, caractérisées par des formations géologiques perméables, une topographie modérée et une couverture végétale naturelle, présentent un fort potentiel de recharge. À l'inverse, les zones de faible potentiel correspondent généralement à des terrains à forte pente et à faible perméabilité. Ces résultats constituent un socle scientifique pertinent pour orienter les actions de gestion durable des ressources en eau souterraine. Ils soulignent également l'importance de préserver les zones à fort potentiel de recharge, face aux pressions anthropiques croissantes, telles que l'urbanisation, afin d'assurer la pérennité des ressources hydriques locales.

Mots clés :

Haute tafna(Sous -bassin versant de sebdou), Potentiel de recharge, SIG, AHP.QGIS

Abstract:

This study aims to identify areas favorable for groundwater recharge within the Sebdoou sub-watershed, located in the upstream part of the Tafna watershed. To achieve this, an integrated cartographic approach within a Geographic Information System (GIS) environment was adopted.

The evaluation of infiltration capacity is based on a set of spatial criteria, including geology, slope, hydrographic network, land use, precipitation, and lineament density, each represented by a thematic map. These parameters were ranked and weighted according to their influence on the recharge process using the Analytic Hierarchy Process (AHP) method.

The integration of all data in the GIS environment enabled the generation of a recharge potential map, classifying areas into three levels: high, moderate, and low.

The results indicate that certain zones in the Sebdoou region, characterized by permeable geological formations, moderate topography, and natural vegetation cover, present a high potential for groundwater recharge. In contrast, areas with low recharge potential are generally associated with steep slopes and low permeability.

These findings provide a relevant scientific basis for guiding sustainable groundwater resource management strategies. They also highlight the importance of preserving high recharge potential areas from increasing anthropogenic pressures, such as urbanization, to ensure the long-term sustainability of local water resources.

Keywords:

UpperTafna(Sebdoou sub-watershed), Recharge potential, GIS, AHP.QGIS

LISTE DES FIGURES.

<u>Figure 1 : Situation géographique du sous bassin versant de Sebdou.</u>	<u>5</u>
<u>Figure 2 : réseau hydrographique bassin versant de l'oued Sebdou</u>	<u>6</u>
<u>Figure 3 : Exemples d'indices de compacité (ZITOUN.D, ZOUAGGARIM2014)</u>	<u>9</u>
<u>Figure 4: Carte hypsométrique et d'altitude du sous bassin versant de sebdou</u>	<u>11</u>
<u>Figure 5: Courbe hypsométrique</u>	<u>13</u>
<u>Figure 6: carte des pentes du bassin sebdou</u>	<u>15</u>
<u>Figure 7: La carte de la classification des talwegs selon Strehler</u>	<u>18</u>
<u>Figure 8: carte de la densité de drainage du bassin sebdou</u>	<u>21</u>
<u>Figure 9: Carte d'occupation du sol du sous bassin versant de sebdou.</u>	<u>23</u>
<u>Figure 10:: variation des précipitations moyennes annuelles (1995 -2024).</u>	<u>25</u>
<u>Figure 11: Variation des précipitations moyennes mensuelles.</u>	<u>26</u>
<u>Figure 12: Variation des précipitations moyenne saisonnières.</u>	<u>27</u>
<u>Figure 13: Courbes des variations des températures moyennes mensuelles, minimales et maximales</u>	<u>28</u>
<u>Figure 14: Diagramme pluvio-thermique de Bagnouls et Gausson</u>	<u>30</u>
<u>Figure 15: ABAQUE DE L'INDICE D'ARIDITE ANNUEL.</u>	<u>31</u>
<u>Figure 16: CLIMAGRAMME D'EMBERGER</u>	<u>35</u>
<u>Figure 17: Détermination du déficit d'écoulement d'après WUNDT.</u>	<u>39</u>
<u>Figure 18: Abaque pour le calcul du déficit d'écoulement selon (P. VERDEIL, 1988).</u>	<u>41</u>
<u>Figure 19: Formations géologiques de la région d'étude(Thomas, 1985).</u>	<u>49</u>
<u>Figure 20: carte géologique de bassin sebdou</u>	<u>51</u>
<u>Figure 21: : Coupe transversale aux Monts de Tlemcen(Collignon, 1986).</u>	<u>55</u>
<u>Figure 22: Carte de linéament</u>	<u>56</u>
<u>Figure 23: Interface QGIS 3.36.2</u>	<u>61</u>
<u>Figure 24: Interface Excel</u>	<u>62</u>
<u>Figure 25: site des données climatique climateengine</u>	<u>63</u>
<u>Figure 26: méthode utiliser pour la délimitation du bassin</u>	<u>64</u>
<u>Figure 27: carte géologique du Tlemcen (ANRH 2008)</u>	<u>65</u>
<u>Figure 28: carte géologique du Telagh (ANRH 2008)</u>	<u>66</u>
<u>Figure 29: carte géologique du Ghazaouet (ANRH 2008)</u>	<u>67</u>
<u>Figure 30: carte géologique du Oran (ANRH 2008)</u>	<u>68</u>
<u>Figure 31: : EXEMPLE DES IMAGES SATELLITAIRES LANDSAT</u>	<u>69</u>
<u>Figure 32: Schéma de la méthodologie de cartographie lithologique – Sebdou</u>	<u>71</u>
<u>Figure 33: schéma du processus de création de la carte d'occupation du sol</u>	<u>72</u>
<u>Figure 34: Schéma des étapes de création d'une carte des altitudes</u>	<u>73</u>
<u>Figure 35: Schéma des étapes de création d'une carte des pentes</u>	<u>74</u>
<u>Figure 36: Schéma des étapes de la création de la carte des linéaments</u>	<u>75</u>
<u>Figure 37: Schéma des étapes de la création de la carte de densité de drainage</u>	<u>76</u>
<u>Figure 38: Schéma des étapes de la création de la carte de précipitation</u>	<u>77</u>
<u>Figure 39: Schéma des étapes de la création de la carte de précipitation</u>	<u>80</u>
<u>Figure 40: tableau de la calcul les valeurs de pondération (ARC GIS)</u>	<u>83</u>
<u>Figure 41: Carte finale des potentiels de recharge</u>	<u>85</u>

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : REPARTITION altimétrique du bassin versant	9
Tableau 2: Classification du relief selon DS (Orostrom)	17
Tableau 3 : Classification des talwegs selon Strehler	19
Tableau 4: Coordonnées de la station météorologique de sebdou	24
Tableau 5: Les valeurs des précipitations annuelles	24
Tableau 6: variations des précipitations moyennes mensuelles	25
Tableau 7: variations des précipitations moyennes saisonnières	26
Tableau 8: températures moyennes annuelles (1995 - 2024)	28
Tableau 9 : variations des températures moyennes mensuelles (1995 - 2024)	29
Tableau 10: Précipitations et Températures moyennes mensuelles à la station de sebdou(1995-2025).	31
Tableau 11: Indice d'aridité de DE Martonne.	32
Tableau 12: Indice d'Emberger.	33
Tableau 13: Indice de Stewart	36
Tableau 14: Résultat du calcul de l'ETR par la méthode de Turc	38
Tableau 15: Valeur du déficit d'écoulement d'après Wundt	39
Tableau 16: Valeur du déficit d'écoulement d'après P. VERDEIL.	40
Tableau 17: : Coefficient de correction en fonction de la latitude et du mois Formule de Thornthwaite d'après Brochet.L Gerbier 1968	43
Tableau 18: Résultats de l'indice thermique mensuel, l'ETP non corrigée et corrigée à la station de sebdou(1995-2024).	44
Tableau 19: : Calcul du bilan hydrologique de la station sebdou1995-2024	45
Tableau 20: les critères et pondération du module final	81

TABLE DES MATIERES.

Remerciements.

Dédicaces.

ملخص

Résumé

Abstract

Liste des figures

Liste des tableaux

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 : Généralités sur la zone d'étude et climatologie	3
I-GENERALITES SUR LA ZONE D'ETUDE :.....	4
1. Introduction:.....	4
2. Situation géographique du secteur d'étude :.....	5
3. Contexte hydrographique :.....	6
II. Caractéristiques physiques du sous bassin versant :.....	7
1. Caractéristiques de forme:.....	7
1.1 Superficie et périmètre:.....	7
1.2 Indice de compacité de Gravelius :.....	8
1.3 Rectangle équivalent	9
Caractérisation topographique	10
1. Répartition altimétrique..	10
1.1. Analyse des tranches d'altitudes:.....	11
1.2. Courbe hypsométrique:.....	13
2. Etude de pente.....	14
2.1 Indices de pente :.....	16
2.2 Dénivelée spécifique 'Ds' :.....	17
Caractéristiques hydrographiques du sous bassin versant:.....	18

1.Hiérarchisation du réseau :	18
2.Densité de drainage:	20
3. Carte de l'occupation du sol : ,.....	22
II-2 ETUDE CLIMATOLOGIQUE.....	24
1-Précipitations	25
1-1-Variabilité mensuelle :.....	26
1-2-Variabilité moyennes saisonnièr.....	27
-Températures :.....	28
2-1-Températures moyennes mensuelles :.....	28
3- Etude du climat.....	29
3-1-Méthodes de visualisation (Méthodes graphiques) :.....	30
3.2-Indiced'aridité de DEMartonne (1923) :.....	31
3.3Indiced'aridité mensuel :.....	33
4-Bilan Hydrologique :.....	37
4-1Evapotranspiration :.....	37
4.1.1-Méthode de Turc (1954) :.....	38
4.1.2Méthode de Coutagne :.....	39
4.1.3Méthode de Wundt : :.....	39
4.1.4Méthode de P. VERDEIL.....	41
4.2-Evapotranspiration potentielle (ETP) :.....	43
4.2.1Méthode de THORNTHWAITE : :.....	43
4.3-Evapotranspiration réelle (ETR):.....	45
4.3.1Calcul de la réserve facilement utilisable (R.E.U).....	45
5.Conclusion:.....	46
CHAPITRE II :GEOLOGIE ET HYDROGEOLOGIE.....	48
1.Introduction :.....	49
2. Géologie :	49
2.1. Les séries anciennes :.....	51

2.2. Les séries récentes :	52
3.Hydrogéologie:	55
3.1.Formations à fort potentiel aquifère,	55
3.2- Formations aquifères à faible potentiel.	56
4. Conclusion :	58
CHAPITRE III : Application du système SIG pour l'élaboration de la carte des potentialités hydriques:	59
1.INTRODUCTION :	60
2.Rôle du système SIG dans la protection et la gestion des potentialités hydriques.	60
2.1.Application du système SIG en hydrologie:	60
2.2.Application du système SIG en hydrogéologie:	61
2.3.Méthodes d'évaluation des potentialités hydriques à l'aide des SIG:	61
3. Technique d'élaboration de la carte des potentialités hydriques.	62
3.1Matériels utilisés et Données utilisées :	62
3.1.1ArcMap 10.8.	62
3.1.2QGIS.	63
3.1.3Microsoft Excel.	64
3.1.4Données climatiques.	65
3.1.5 Délimitation du sous bassin versant de Sebdo	66
3.1.6Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) :	71
3.2 Méthodologie :	72
3.3 Cartographie des paramètres et reclassification :	73
3.3.1.Géologie :	73
3.3.2. Occupation du sol :	74
3.3.3.Les altitudes :	76
3.3.4. Les pentes :	76
3.3.5. Linéaments :	78
3.3.6. Densité de drainage.	79

3.3.7.Précipitations :	79
4. Analyse multicritère:	81
4.1.Critères géologiques:	81
4.2. Occupation du sol:	81
4.3. Pente et altitude:	82
4.4. Densité de drainage	82
4.5. DensitéLinéaments	82
4.6. Précipitations:	82
4.a) Reclassification des paramètres :	83
4.b) Superposition et pondération des critères :	84
5. RESULTATS ET DISCUSSIONS :	86
6.Recommandations :	88
CONCLUSION GENERALE	90

Références bibliographiques

Web référence

ANNEXES

INTRODUCTION GENERALE.

Les ressources en eau représentent un enjeu majeur à l'échelle mondiale, notamment dans les régions arides et semi-arides, comme le Nord-Ouest de l'Algérie. Face à l'augmentation de la demande en eau, due à la croissance démographique, au développement agricole et industriel, s'ajoute une pression croissante, liée aux effets du changement climatique. Ce dernier se manifeste par une baisse des précipitations, une variabilité accrue des régimes pluviométriques et une augmentation des températures, compromettant ainsi la recharge naturelle des nappes souterraines. Dans ce contexte, une gestion rationnelle et durable de la ressource en eau devient impérative pour assurer sa préservation et répondre aux besoins actuels et futurs. L'identification et l'exploitation des zones potentielles de recharge des nappes représentent une solution stratégique pour renforcer la résilience des systèmes hydriques, face à ces défis.

La cartographie des potentialités hydriques constitue un outil essentiel pour la gestion intégrée des ressources en eau. Elle permet d'identifier les zones favorables à l'infiltration et à la recharge des nappes souterraines, en tenant compte des caractéristiques géologiques, topographiques, climatiques et pédologiques du milieu. Grâce à l'utilisation des Systèmes d'Information Géographique (SIG) et des données satellitaires, il devient possible de produire des cartes précises qui facilitent la prise de décision et la planification des actions de préservation et de valorisation de la ressource. Ainsi, la cartographie représente un appui fondamental pour anticiper les risques de surexploitation et orienter les efforts vers une gestion plus durable de l'eau, notamment dans les régions sensibles aux aléas climatiques, comme le Nord-Ouest algérien.

Cette étude a pour objectif principal l'identification et la cartographie des zones à fort potentiel de recharge des nappes souterraines dans le sous bassin versant de la haute Tafna (Nord-Ouest Algérien), en s'appuyant sur une approche intégrée ,combinant les données géologiques, climatiques, topographiques et pédologiques à l'utilisation des outils SIG et de la télédétection. Plus spécifiquement, elle vise à analyser les facteurs naturels influençant la recharge, à collecter et traiter les données spatiales à travers des méthodes géomatiques modernes, à élaborer une carte des zones favorables à l'infiltration, à l'aide d'une analyse multicritère, et à évaluer l'efficacité de ces outils pour appuyer la prise de décision, en matière de gestion durable de l'eau.

Ce travail est divisé en trois chapitres :

Chapitre I : Généralités sur la région d'étude et aspect climatologique;

Chapitre II : Contexte Géologique et Hydrogéologique;

Chapitre III : Application du SIG et de la Télédétection pour l'élaboration de la carte des potentialités hydriques.

A la fin, une **Conclusion Générale** sera donnée, en fonction des résultats obtenus.

CHAPITRE I :
GÉNÉRALITÉS SUR LA RÉGION D'ÉTUDE
ET ASPECT CLIMATOLOGIQUE

I-1 GÉNÉRALITÉS SUR LA ZONE D'ÉTUDE.

I-2 ETUDE CLIMATOLOGIQUE.

I-GENERALITES SUR LA ZONE D'ETUDE :

1.Introduction:

Le bassin versant de la Tafna, situé dans le Nord-Ouest de l'Algérie à proximité de la frontière algéro-marocaine, s'étend entre 1° et 2° de longitude Ouest et 34°5' à 35°3' de latitude Nord, couvrant une superficie totale d'environ 7245 km². Ce bassin présente une topographie accidentée caractérisée par des altitudes variant du niveau de la mer jusqu'à 1100 mètres, avec une altitude moyenne de 780 mètres. Son réseau hydrographique complexe est composé d'oueds (cours d'eau) et de chabats (petits ruisseaux ou ravins) formant un système hydrographique discontinu. Le bassin est structuré en huit sous-bassins versants, dont celui de Beni Bahdel qui s'étend sur 1040 km², contribuant tous à la dynamique hydrologique globale du système. Cette infrastructure hydraulique majeure nécessite une gestion et une surveillance continues pour assurer son rôle crucial dans l'approvisionnement en eau du Nord-Ouest algérien (SOFI.M, et MAHI .A, 2019).

Le système hydrographique de la Tafna constitue une infrastructure hydraulique fondamentale dans le Nord-Ouest algérien, où son rôle s'avère déterminant pour la gestion des ressources en eau de la région de Tlemcen. Ce bassin versant se distingue par son climat méditerranéen semi-aride et son réseau sophistiqué d'aménagements hydrauliques, comprenant cinq barrages majeurs (Beni Bahdel, Meffrouche, Sidi Abdelli, Hammam Boughrara et Sikkak). La particularité de ce système réside dans sa configuration géologique favorable à l'alimentation des nappes phréatiques et dans son organisation en sous-bassins, dont celui de Sebdou qui fait l'objet de cette étude. L'importance de ce dernier se manifeste notamment à travers son impact sur le comportement hydrologique global du bassin et sa contribution à la disponibilité en eau pour divers usages.

Face aux défis contemporains liés au changement climatique, caractérisés par une diminution significative des précipitations et une augmentation des températures, l'étude du sous-bassin de Sebdou devient cruciale pour développer des stratégies de gestion adaptées, tout en tenant compte des pressions croissantes exercées par la démographie et les besoins en développement de la région.

2. Situation géographique du secteur d'étude :

Le sous bassin versant d'Oued Sebdou est un affluent de la Tafna, situé au Nord-Ouest de l'Algérie, au Sud du chef-lieu de la wilaya de Tlemcen (fig.01). Il est drainé par l'Oued Sebdou, qui prend sa source dans les Ouled Ouriache et se jette finalement dans la cuvette du barrage de Béni Bahdel.

Le sous-bassin versant présente des caractéristiques morphométriques distinctives, avec une configuration spatiale qui s'étend sur 255,5 km². Sa morphologie influence significativement les processus hydrologiques du bassin. Sa configuration géométrique particulière accentue les phénomènes d'érosion et facilite l'écoulement rapide des eaux superficielles. L'Oued Sebdou, artère principale du réseau hydrographique, parcourt approximativement 29,5 kilomètres avant de rejoindre le barrage de Beni Bahdel, infrastructure hydraulique majeure d'une capacité de rétention de 63 millions de mètres cubes (SOFIM et MAHI. A , 2019).

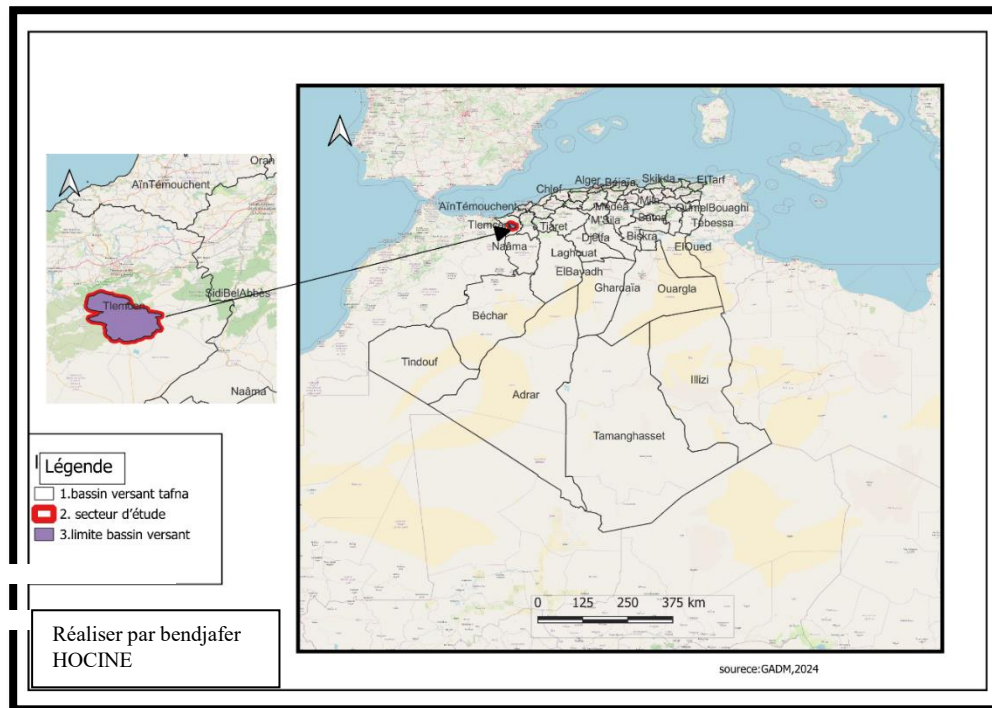


Figure (1). Situation géographique du sous bassin versant de Sebdu.

3. Contexte hydrographique :

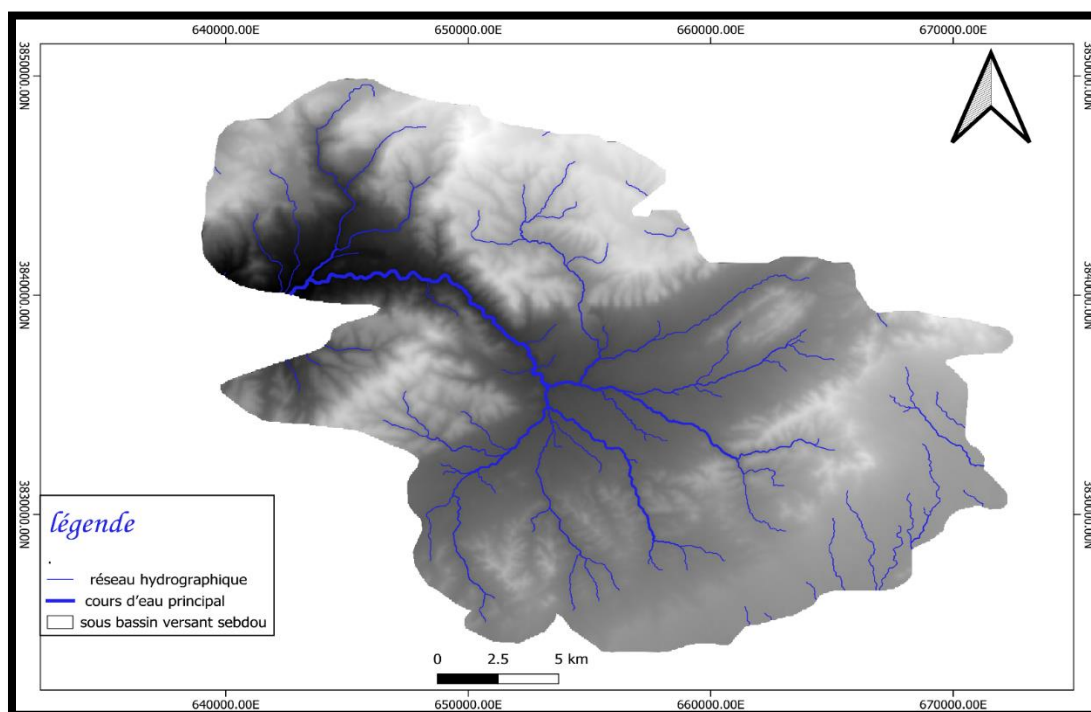


Figure (2): réseau hydrographique du bassin versant d'Oued Sebdu.

Du point de vue géomorphologique, le bassin s'inscrit dans un contexte orographique marqué par le massif de Tlemcen, formation montagneuse d'origine alpine atteignant 1465 mètres d'altitude.

Situé dans la partie amont du bassin de la Tafna, le sous bassin versant de Sebdu est principalement drainé par l'Oued Sebdu, un cours d'eau temporaire dont le régime hydrographique dépend fortement des précipitations hivernales. Le réseau hydrographique est assez dense et fortement influencé par les irrégularités climatiques, avec de longues périodes de sécheresse entre coupées de périodes de fortes pluies (Benaïssa ,2016).

II. Caractéristiques physiques du sous bassin versant :

1. Caractéristiques de forme:

1.1 Superficie et périmètre:

La superficie et le périmètre d'un bassin versant constituent deux paramètres fondamentaux pour l'analyse de son fonctionnement hydrologique et la planification de la gestion de ses ressources en eau. La surface détermine l'étendue des eaux de ruissellement collectées et influence directement les volumes infiltrés, évacué souretenus, ce qui impacte la recharge des nappes, les pratiques d'irrigation, et l'approvisionnement en eau pour les activités agricoles. Le périmètre, quant à lui, représente la limite topographique qui définit la zone de drainage. L'inter-relation entre la surface et le périmètre constitue un socle essentiel pour l'élaboration de stratégies durables de gestion de l'eau, la prévention des risques naturels et l'aménagement du territoire. La combinaison de la surface et du périmètre permet de mieux comprendre et modéliser les processus de recharge des aquifères.

<i>Sous bassin versant</i>	<i>Périmètre (km)</i>	<i>Surface (km²)</i>
Oued Sebdou	120.35	255.5

1.2 Indice de compacité de Gravelius :

L'indice de compacité de Gravelius est un indicateur géographique qui mesure l'irrégularité ou la forme d'un bassin versant (ou de toute autre unité géographique) en comparant le périmètre de la zone à sa surface. Il est utilisé pour évaluer la compacité d'une zone, c'est-à-dire sa proximité avec une forme circulaire, qui est la forme géométrique idéale pour une infiltration efficace de l'eau et une gestion optimale des ressources hydrologiques.

$$KC = \frac{0.28}{\sqrt{A}} \times P$$

Où:

- **P** est le périmètre du bassin versant (ou de la zone étudiée).
- **A** est la surface de la zone.

Plus l'indice KC est proche de 1, plus la forme du bassin versant est proche de celle d'un cercle, ce qui signifie que l'écoulement des eaux est plus uniforme et que la recharge des aquifères peut

être plus efficace, car l'eau de pluie a moins de distance à parcourir pour atteindre un point bas et s'infiltrer.

Plus l'indice KC est élevé, plus la forme du bassin est irrégulière, ce qui peut entraîner un écoulement de surface plus rapide et une recharge moins efficace des aquifères. Une forme allongée ou anguleuse peut favoriser un ruissellement plus rapide, réduisant ainsi l'infiltration.

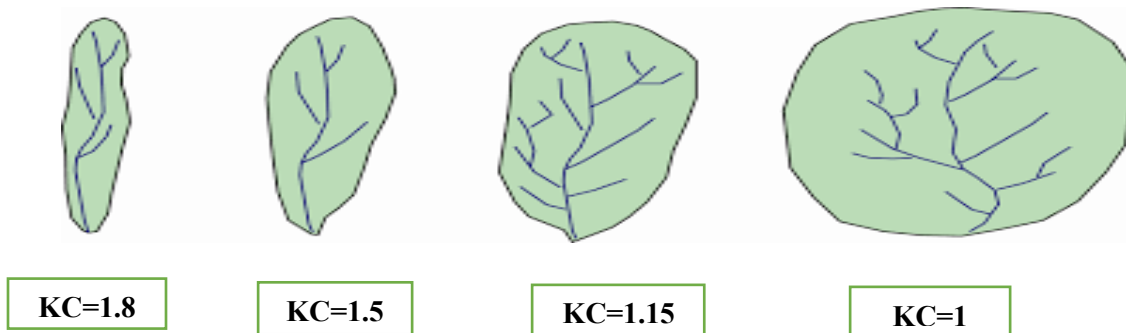


Figure (3): Exemples d'indices de compacité (ZITOUN.D, ZOUAGGARIM, 2014).

Dans le cas de notre zone d'étude, le **Kc** est égale à **2.12**, cette valeur montre que le bassin est de forme allongée.

$$Kc = 0.28 / \sqrt{255.5 * (120.351)}$$

$$Kc = 2.12$$

1.3 Rectangle équivalent : On définit le rectangle équivalent comme le rectangle de longueur L et de largeur l qui a même surface et même périmètre que le bassin versant. Les dimensions du rectangle équivalent sont données par les relations suivantes :

$$L = \frac{KC \times \sqrt{A}}{1.128} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{KC} \right)^2} \right]$$

- **Longueur (L)**

$$- \text{Largeur (l)} \quad l = \frac{KC \times \sqrt{A}}{1.128} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{KC} \right)^2} \right]$$

(L): Longueur du rectangle équivalent [km].

(l): Largeur du rectangle équivalent [km].

Kc : Coefficient de compacité.

Pour le sous bassin versant de sebdou L est de 51.57 Km et la largeur équivalente est de 4.57 Km, ce qui confirme la forme allongée du bassin.

Caractérisation topographique : Principaux les caractéristiques géographiques d'un bassin, telles que son altitude, son relief, sapente et la configuration de son réseau hydrographique, constitue le processus de caractérisation topographique. Ces composantes jouent un rôle clé dans le comportement hydrologique du bassin, notamment la recharge des aquifères, l'infiltration et l'écoulement de l'eau.

1.Répartition altimétrique :Le bassin versant de Sebdou couvre une superficie de 255,5 km², avec une altitude maximale atteignant 1 465 mètres. Son périmètre principal mesure environ 78 kilomètres. Le cadre structural est constitué de deux unités morphologiques majeures : un horst situé au Nord et au Nord-Est, et un graben formé de dépôtsplio-quadernaires occupant les régions Sud et Est, correspondant au fossé de Sebdou. L'analyse de la courbe hypsométrique met en évidence une concavité orientée vers le bas, traduisant la présence de reliefs modérés à haute altitude. Une forte déclivité est observée au niveau des horsts encadrant le bassin, soulignant un relief contrasté. À mesure que l'altitude diminue, l'inflexion de la courbe indique l'encaissement progressif de l'Oued Sebdou, notamment dans la zone correspondant au barrage de Béni Bahdel. (Bouanani.A, 2004).

Tableau (1): Répartition altimétrique du bassin versant

Altitude (m)	Surface (km ²)	Surface cumulées (km ²)	Surface %	% surface cumulées
1600-1700	0.009888	0.009888	0.0016	0.0016
1500-1600	1.0601799	1.0700679	0.1718	0.1734
1400-1500	10.8762999	11.9463678	1.718	1.9367
1300-1400	55.4271011	67.3734689	8.9862	10.9229
1200-1300	89.868103	157.241572	14.5700	25.4929
1100-1200	149.156006	306.397578	24.1822	49.6751
1000-1100	154.766007	461.163585	25.0917	74.7668
900-1000	94.7661972	555.929782	15.3941	90.1309
800-900	28.5331993	584.462981	4.6260	94.7569
700-800	24.7924995	609.255481	4.0195	98.7764
615-700	7.5188699	616.774351	1.2190	100

1.1. Analyse des tranches d'altitudes:

Ce tableau présente la répartition des surfaces selon différentes tranches d'altitudes, fournissant des informations précieuses sur la topographie d'une région donnée. Examinons les colonnes une par une :

Tranchées d'altitude : Elles sont regroupées en cinq catégories, allant de plus de 1700 mètres à moins de 615 mètres. Cela permet de voir comment les altitudes sont distribuées dans la zone étudiée.

- **Ai (km²)** : Cette colonne indique la superficie (en kilomètres carrés) de chaque tranche d'altitude. On peut ainsi quantifier l'étendue de chaque zone altitudinale.
- **Ai cumulées (km²)** : Cette colonne représente la somme des superficies des tranches d'altitudes, de la plus élevée à la tranche considérée. Elle permet de visualiser la progression de la surface cumulée à mesure que l'on descend en altitude.
- **Ai %** : Cette colonne exprime la proportion de chaque tranche d'altitude par rapport à la superficie totale. Elle donne une idée de l'importance relative de chaque zone altitudinale.
- **%Ai cumulés** : Cette colonne présente la somme des pourcentages des superficies, de la plus élevée à la tranche considérée. Elle complète la lecture des superficies cumulées en donnant une vision relative de l'occupation du territoire en fonction de l'altitude.

L'analyse de la répartition altitudinale du sous bassin versant de l'Oued Sebdou met en évidence une dominance marquée des altitudes intermédiaires. Les classes comprises entre 1000 et 1 200 mètres occupent à elles seules près de 49,6 % de la superficie totale, tandis que les terrains situés entre 900 et 1300 mètres couvrent environ 74 % de l'ensemble du bassin. Cette configuration traduit une topographie modérément ondulée, caractérisée par des plateaux et des versants aux pentes relativement douces, favorables à l'infiltration des eaux et à l'évaporation superficielle.

À l'opposé; les hautes altitudes, supérieures à 1 500 mètres, ne concernent qu'une portion très restreinte du territoire, avec seulement 1,89 km², soit environ 0,3 % de la surface. Ce faible pourcentage suggère la présence limitée de reliefs montagneux marqués. De même, les zones de

basse altitude (moins de 700 mètres) couvrent à peine 1, 22 % du bassin, ce qui reflète l'encaissement localisé du réseau hydrographique principal.

Globalement; cette répartition altimétrique suggère une prédominance de terrains de moyenne altitude, présentant des conditions géomorphologiques propices aux activités agricoles et à la recharge des nappes ; tandis que les zones à forte déclivité restent peu étendues et spatialement circonscrites.

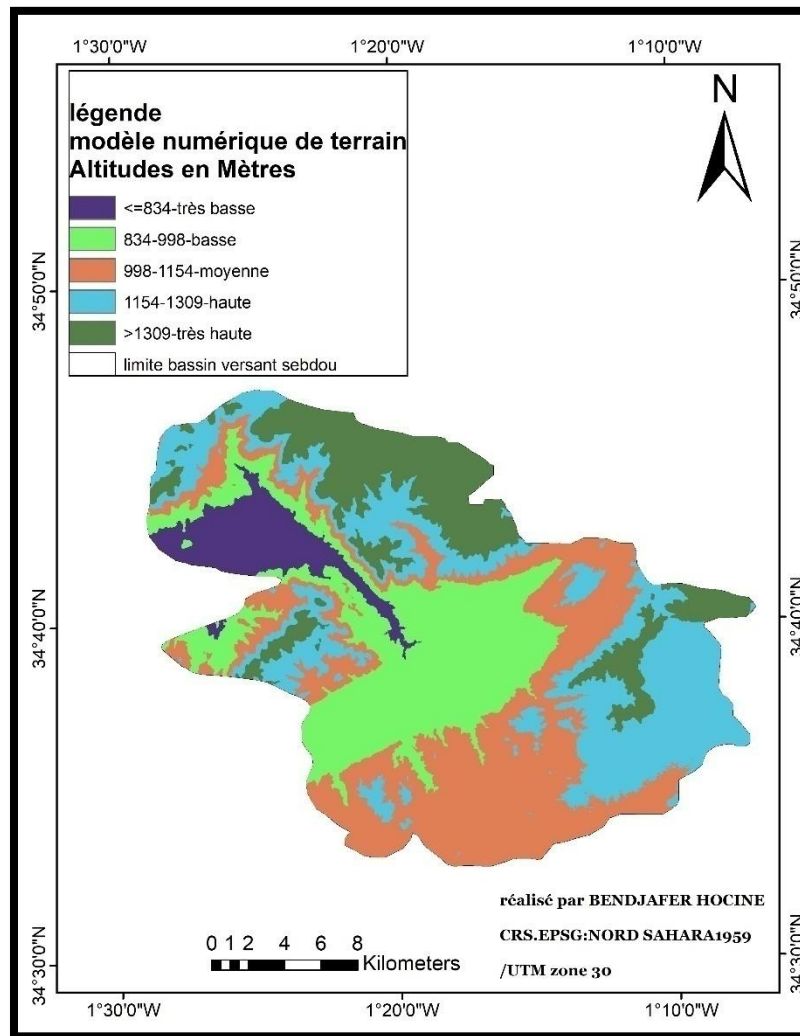


Figure (4) : Carte hypsométrique et d'altitude du sous bassin versant de sebdu.

Les zones de haute altitude : qui s'étendent au-delà de 1309 mètres, sont caractérisées par des pentes marquées et des sols généralement imperméables , qui limitent l'infiltration de l'eau. Par conséquent, il n'y a pas beaucoup de recharge dans ces zones.

Zones d'altitude intermédiaire : qui s'étendent de 998 à 1309 mètres, ont des pentes plus modérées et des conditions pédologiques potentiellement plus propices à l'infiltration, ce qui augmente les capacités de recharge hydrogéologique . Comme celles du Nord -Est et du Sud-Est du bassin elles peuvent également contribuer à la recharge, bien qu'elles dépendent principalement

mais ce n'est pas le moins important, les zones situées en dessous de 998 mètres d'altitude, comme celles du Nord-Est et du Sud-Est du bassin , peuvent également contribuer à la recharge, même si elles dépendent principalement des caractéristiques des sols, leur occupation et l'existence potentielle de zones humides . Il est donc crucial de compléter cette analyse hypsométrique par des informations relatives à la pédologie, à la couverture végétale, à la pluviométrie et à la géologie afin d'obtenir une évaluation plus précise du potentiel de recharge du sous-bassin versant de Sebdo .

1.2.Courbe hypsométrique:

Elle permet d'analyser rapidement la répartition altitudinale, de mieux comprendre la topographie du bassin, et d'évaluer la proportion du territoire esituée en zone de haute montagne ou en plaine.

Cette analyse est particulièrement utile en géographie physique;notamment pour l'étude des reliefs, mais elle trouve également des applications importantes en hydrologie et en climatologie.

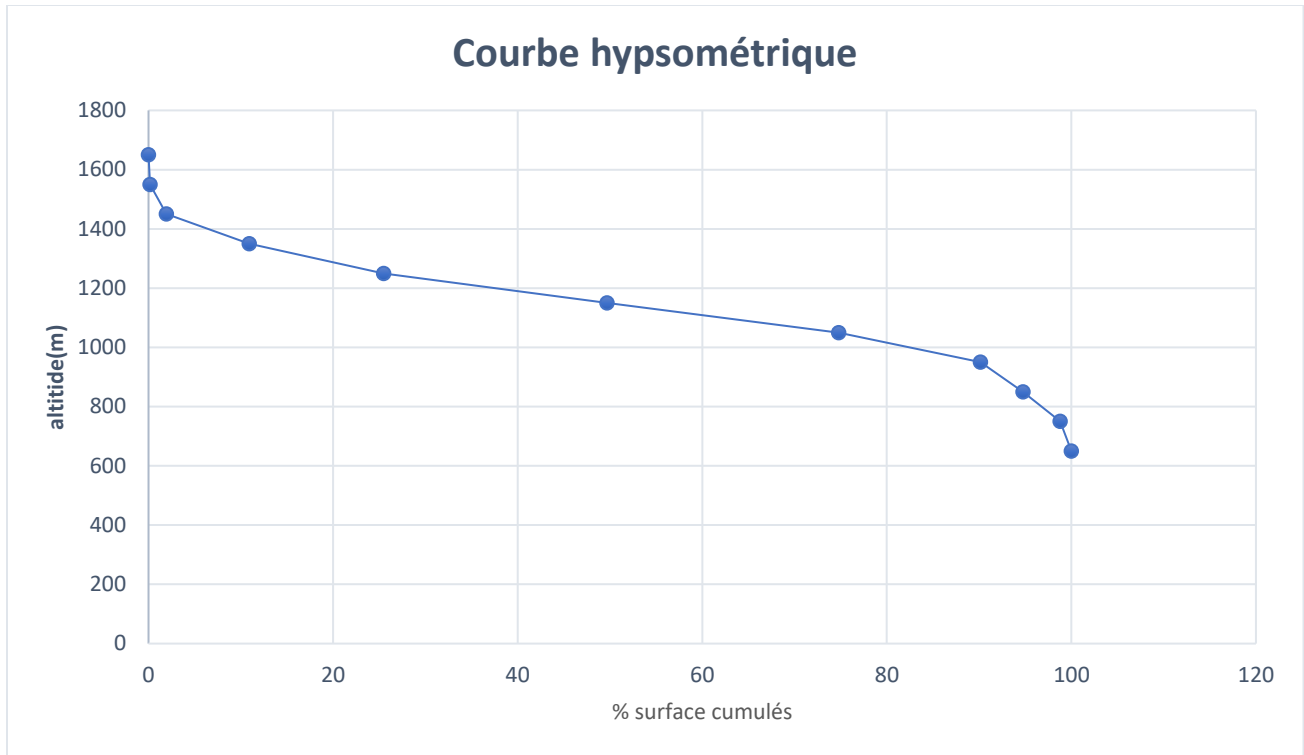


Figure (5) : Courbe hypsométrique.

2. Etude de pente

L'étude des pentes constitue un élément fondamental pour comprendre la dynamique de l'écoulement de surface et le potentiel de recharge des nappes phréatiques. En effet, les pentes sont inversement proportionnelles à la capacité de recharge des aquifères (Krishnamurthy et al., 1996 ; 2000).

Les terrains à faible pente favorisent l'infiltration des précipitations en réduisant le ruissellement, ce qui améliore la recharge des nappes. En revanche, les fortes pentes accélèrent l'écoulement des eaux de surface, réduisent le temps de contact avec le sol et diminuent ainsi l'infiltration, tout en augmentant le risque d'érosion.

Grâce à une analyse morphométrique réalisée à l'aide d'un Système d'Information Géographique (QGIS), il a été possible d'identifier une variation topographique au sein du sous bassin versant de l'Oued Sebdu, influençant directement sa dynamique hydrologique.

Les pentes ont été divisées en cinq catégories principales :

1. Très faibles pentes ($\leq 10,27^\circ$) : localisées principalement dans les zones Sud et Sud-Est du bassin. Ces zones planes souffrent des conditions favorables à l'infiltration et à la recharge des nappes grâce à une texture de sol fine et perméable.
2. Faibles pentes ($10,27^\circ - 20,55^\circ$) : situées dans des zones de transition entre plaines et plateaux, elles présentent un bon équilibre entre infiltration et ruissellement, ce qui les rend aptes à des usages agricoles durables.
3. Pentes moyennes ($20,55^\circ - 30,83^\circ$) : largement répandues au centre du bassin, elles représentent une zone d'équilibre modéré entre l'érosion et le dépôt, avec une capacité d'infiltration acceptable.
4. Pentes fortes ($30,83^\circ - 41,10^\circ$) : dominantes dans les régions Nord-Ouest et Ouest du bassin, elles favorisent un écoulement rapide et augmentent les risques d'érosion et de perte de sol.
5. Pentes très fortes ($> 41,10^\circ$) : concentrées dans les zones montagneuses et accidentées du bassin, elles se caractérisent par un ruissellement intense, une forte érosion et une très faible recharge des aquifères.

Cette diversité morphologique du sous bassin versant de Sebdoou constitue un critère essentiel dans l'élaboration de stratégies de gestion intégrée et durable des ressources en eau, notamment dans un contexte de changement climatique et de pressions anthropiques croissantes.

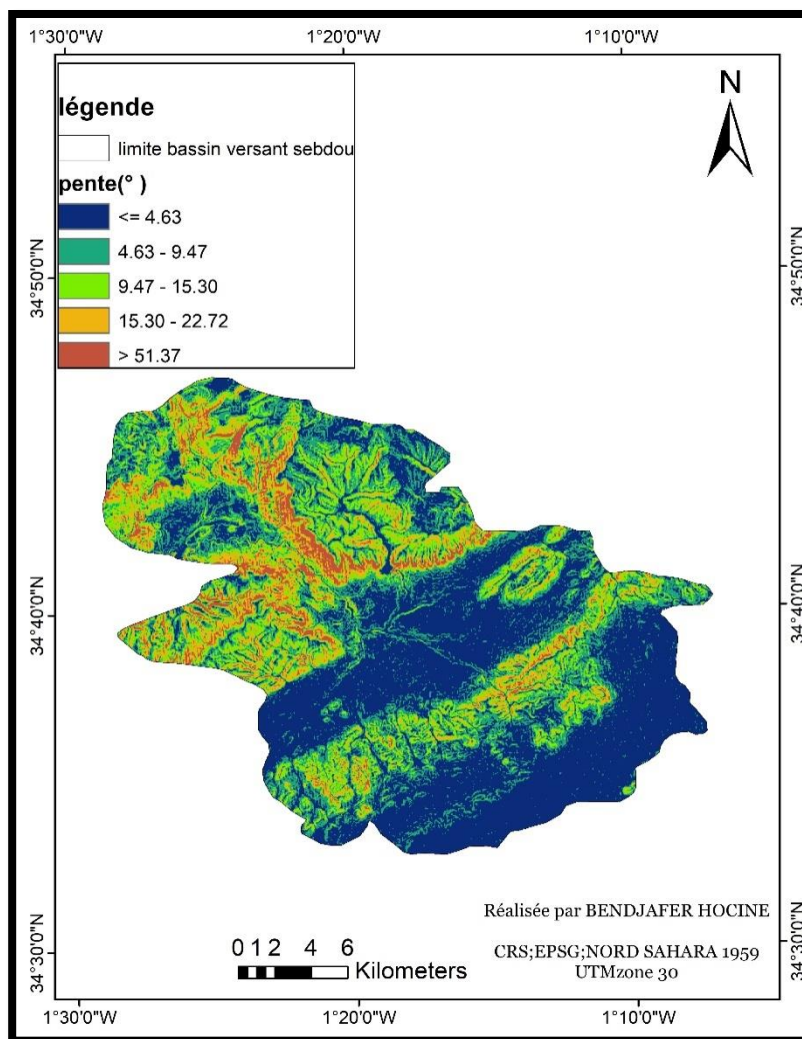


Figure (6) : Carte des pentes du sous bassin versant de Sebdo.

2.1 Indices de pente :

Le relief joue un rôle important, car il commande en grande partie l'aptitude au ruissellement des terrains.

Son appréhension peut être faite à l'aide de l'indice de pente global I_g donné par la relation :

$$I_g = D / L$$

Où,

I_g : indice globale de Roche

D: dénivelée (m).

Sur la courbe hypsométrique déjà tracée, on prend les points tels que la surface supérieure ou inférieure soit égale à 5% de la surface totale. H5 et H95 sont les altitudes entre lesquelles s'inscrivent 90% de la surface du bassin. La dénivelée D est donc égale à H5-H95. (BOUANANI.A,2004).

L'indice de pente I_p également défini par Roche à partir du rectangle équivalent est égal à :

$$I_p = 1 / L. \sum x_i. \beta_i. [a_i - a_{i-1}]$$

β_i : fraction de la surface totale du bassin comprise entre les côtes a_i et a_{i-1} ; fonction donnée par le tableau hypsométrique.

x_i : distance séparant deux courbes de niveau sur le rectangle équivalent.

L : longueur du rectangle équivalent.

Donc dans le cas de notre sous bassin :

$$D=1650-650=1000\text{m}$$

$$I_g=1000/78=12.82$$

$$I_p=1 / 78. \sum 1 [255] =3.27$$

2.2 Dénivelée spécifique 'Ds' :

La dénivelée spécifique donne sur le relief d'un bassin versant d'après la classification de l'ORSTOM, elle est calculée par la formule suivante $DS = I_g \sqrt{A}$

Avec :

I_g : Indice global de pente .

A : Superficie du bassin versant (km^2).

$$\text{Donc } D_s=12.82\sqrt{255}=204.71\text{m}$$

La dénivelée spécifique apparaît donc comme une correction de la dénivelée simple par application d'un coefficient qui dépend de la forme du bassin, ce qui donne la possibilité de comparaison entre ses valeurs pour différents bassins (tableau .2).

On constate, par ailleurs, que le sous bassin versant de sebdou se range dans la classe de relief Assez fort.

Tableau (2) : Classification du relief selon Ds.

Relief très faible	Ds < 10 m
Relief faible	10 m < Ds < 25 m
Relief assezfaible	25 m < Ds < 50 m
Relief modéré	50 m < Ds < 100 m
Relief assez fort	100 m < Ds < 250 m
Relief fort	250 m < Ds < 500 m
Relief très fort	Ds > 500 m

Caractéristiques hydrographiques du sous bassin versant:

D'un point de vue géomorphologique, le réseau hydrographique correspond à l'ensemble des canaux de drainage naturels empruntés par les eaux de ruissellement ou les eaux des nappes souterraines, restituées soit par résurgence de source, soit de manière continue par évaporation le long du lit. Géomorphologiquement, le réseau hydrographique se caractérise par trois éléments fondamentaux : sa hiérarchisation, son degré de développement et son profil longitudinal. (KOURA. M, & LAGRAA. A, & BOUSSOUAR. A; 2021).

1. Hiérarchisation du réseau :

La classification topologique du réseau hydrographique est effectuée sur une méthode proposée initialement par Horton en 1945 (Tableau.3.) puis modifiée par Strehler en 1947 (KOURA. M, & LAGRAA. A, & BOUSSOUAR. A; 2021) Elle est la plus utilisée aujourd'hui, son principe est comme suit :

Tout cours d'eau dépourvu de richesse est considéré comme étant d'ordre (1). Lorsque deux cours d'eau de même ordre « n » se rencontrent, le cours d'eau résultant est d'ordre n+1.

- Un cours d'eau recevant un affluent d'ordre inférieur conserve son ordre.
- La forme et la hiérarchie d'un réseau hydrographique sont influencées par un certain nombre de facteurs , notamment :
 - la géologie (plissement, nature du substrat , accidents, etc.),
 - le climat (précipitations, humidité, etc.),
 - la pente des terrains et la présence humaine.

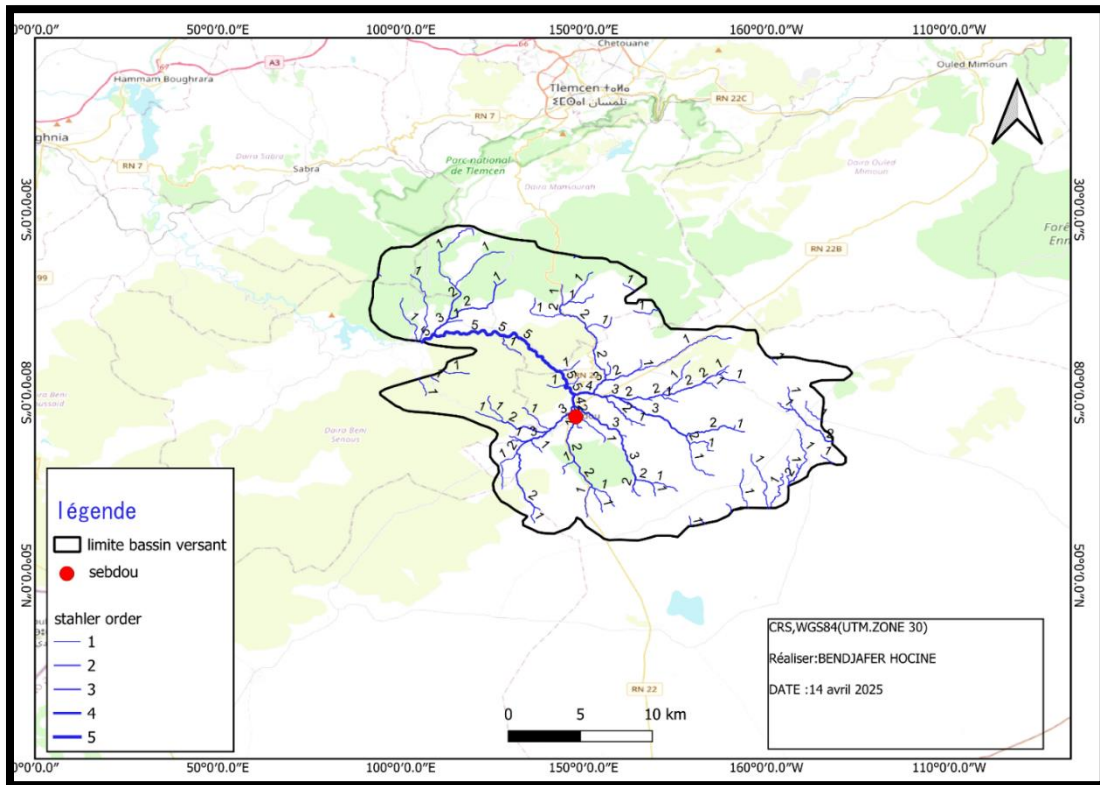


Tableau (3) : Classification des talwegs, selon Strehler.

Ordre	Nombre
1	78
2	33
3	13
4	2
5	1

2. Densité de drainage:

La densité de drainage est définie comme le rapport entre la longueur totale des cours d'eau d'un bassin versant et la superficie de ce bassin (Rambert, 1973). Cet indicateur permet d'analyser l'organisation du réseau hydrographique ainsi que l'influence de facteurs tels que la géologie, le relief ou encore le climat sur le comportement de l'écoulement.

Une densité élevée reflète en général un ruissellement important, souvent lié à des sols imperméables ou à des précipitations abondantes. À l'inverse, une densité faible traduit une meilleure infiltration de l'eau, favorisant ainsi la recharge des nappes phréatiques.

Néanmoins, cette relation peut être nuancée dans certains contextes géologiques spécifiques. Des études menées par (Shaban, 2003 ; 2006) ont montré que dans les milieux karstiques, notamment ceux constitués de calcaires dolomitiques fissurés, une faible densité de drainage peut coïncider avec un fort potentiel de recharge.

Cette particularité est due à la présence de formations rocheuses très perméables et fracturées, facilitant l'infiltration souterraine de l'eau malgré une apparence rareté du réseau de surface.

Ainsi, bien que la densité de drainage soit un indicateur utile, son interprétation doit toujours être mise en relation avec les caractéristiques géologiques locales pour en tirer des conclusions hydrologiques pertinentes.

La carte des densités de drainage (Figure 8) a été créée à partir du réseau hydrographique du bassin versant Sebdoou grâce au logiciel ArcGIS.

La carte obtenue présente cinq classes :

I- Les zones de densité ($<1,07 \text{ km/km}^2$) : Zones où le réseau hydrographique est peu développé avec un relief faible à modéré indiquant une faible densité de drainage, souvent associée à des terrains perméables favorisant l'infiltration.

II- Zones de densité (1.07-2.14) : Une légère augmentation du drainage, mais peu indiquant principalement des terrains relativement perméables ou peu accidentés. On observe quelques cours d'eau, tandis que l'infiltration reste encore significative. Cette zone représente la transition entre les zones de recharge et les zones de ruissellement modéré.

III. Densité modérée (2,14- 3,21 km/km^2) : Réseau hydrographique plus développé, indiquant une réduction progressive de l'infiltration. On observe que l'écoulement de surface plus important, mais infiltration encore possible dans certaines conditions.

IV. Densité élevée (3,21 – 4,29 km/km^2) : Zones avec un réseau hydrographique dense, caractéristique des terrains imperméables peut correspondre à des argiles ou des pentes accentuées. Forte proportion de ruissellement, infiltration limitée. En plus elle peut présenter une forte sensibilité à l'érosion.

V. Densité très élevée ($>5.37 \text{ km/km}^2$) : Réseau hydrographique très dense favorisant un écoulement rapide de l'eau de surface, réduisant l'infiltration.

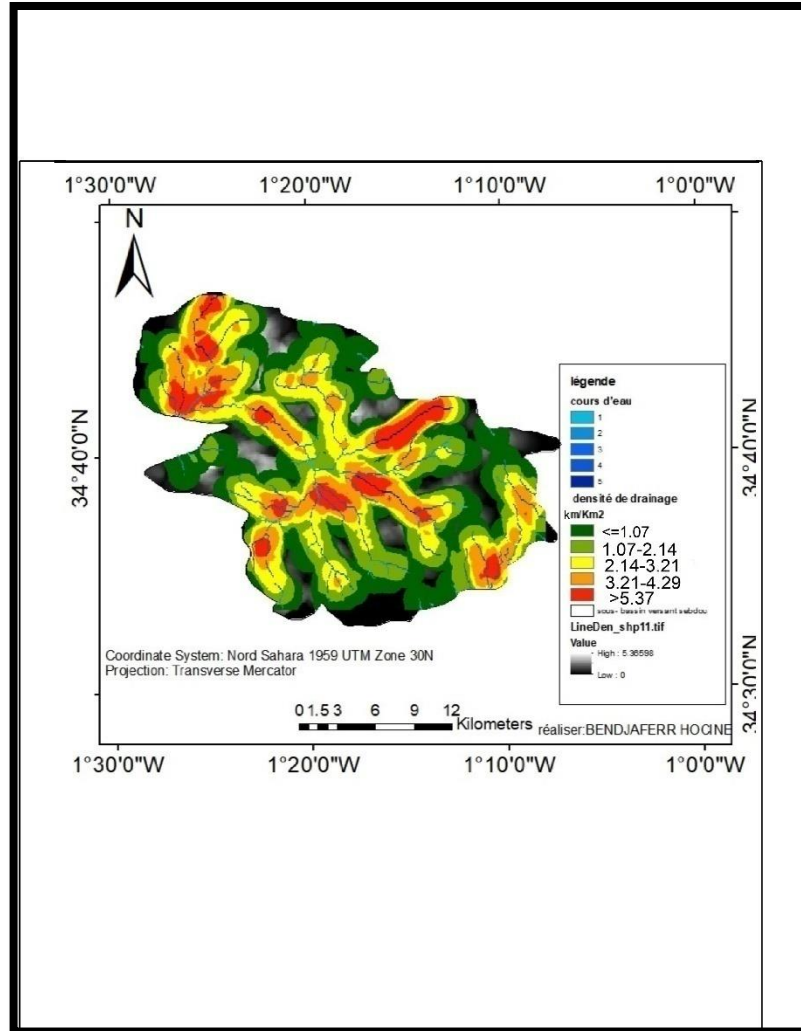


Figure (8) : Carte de densité de drainage du sous bassin.

3. Carte de l'occupation du sol :

L'occupation du sol dans la région de Sebdu joue un rôle fondamental dans la compréhension des processus hydrogéologiques notamment la recharge des nappes phréatiques.

Les types de couverture végétale influencent directement l'infiltration, le ruissellement et l'évapotranspiration, éléments essentiels dans la gestion durable des ressources en eau.

Grâce à l'utilisation des Systèmes d'Information Géographique (SIG) et des données de télédétection combinées aux caractéristiques topographiques et géologiques du terrain, il est possible d'identifier les zones les plus propices à la recharge.

Cette approche permet d'établir une lecture spatiale détaillée de la dynamique des flux hydriques et d'orienter les stratégies de préservation.

Dans le sous bassin d'Oued Sebdou, six grandes catégories d'occupation du sol ont été identifiées, chacune ayant un impact spécifique sur la recharge :

1. Cultures extensives (16,14 %) : elles couvrent une portion significative du territoire. Bien qu'elles permettent une certaine infiltration, leur contribution à la recharge est limitée par les pratiques agricoles.
2. Couvert forestier dégradé (33,84 %) : cette catégorie, largement dominante, offre une protection insuffisante contre l'érosion et limite l'infiltration, ce qui affecte négativement la recharge des nappes.
3. Couvert forestier normal (21,78 %) : il constitue un facteur favorable à la recharge grâce à sa structure dense et perméable, permettant une infiltration efficace des précipitations.
4. Arboriculture (1,94 %) : bien que marginale en superficie, elle peut participer positivement à la recharge si elle est bien gérée.
5. Couvert mort (9,62 %) : il est associé à des zones à forte pente (>25 %), particulièrement vulnérables à l'érosion, où l'infiltration est quasi inexistante et le ruissellement accentué.
6. Prairies et terrains de pacage (16,68 %) : ces surfaces naturelles permettent une infiltration modérée à bonne, contribuant à la recharge en zones ouvertes.

La végétation dans ce bassin reste étroitement liée aux conditions climatiques, en particulier la pluviométrie. Les zones du Sud, dominées par le couvert mort et les forêts claires, correspondent aux parties les plus sensibles à l'érosion. Ainsi, une gestion adaptée du couvert végétal apparaît essentielle pour améliorer l'efficacité de la recharge et réduire les pertes en eaux de surface (Bouanani.A, 2004).

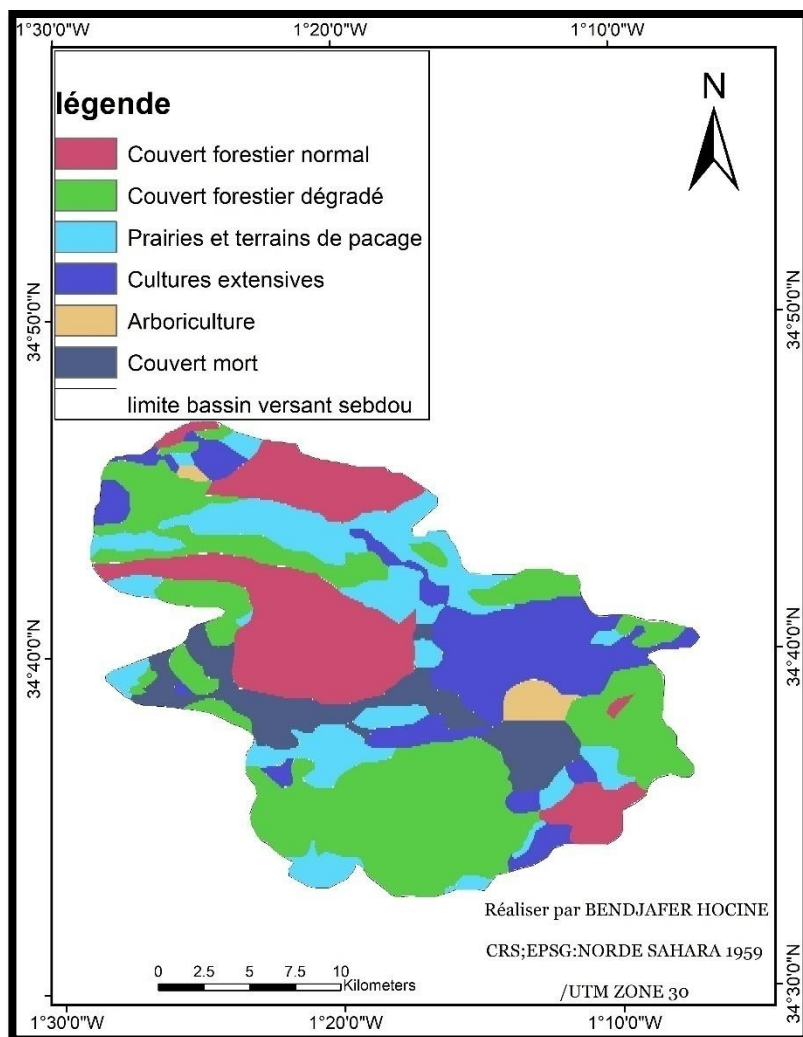


Figure (9) : Carte d'occupation du sol du sous bassin de Sebdo.

II-2 ETUDE CLIMATOLOGIQUE.

L'analyse climatologique représente un domaine fondamental pour appréhender les phénomènes atmosphériques et leur influence sur le sous bassin versant de Sebdo. Cette étude couvre la période allant de 1995 à 2024, en s'appuyant sur l'examen de variables climatiques essentielles, telles que la température et les précipitations. L'objectif principal est de caractériser les tendances climatiques inter-annuelles, mensuelles et saisonnières. Dans un contexte marqué par l'amplification des effets du changement climatique, ce type d'étude revêt une importance

croissante, notamment pour évaluer la recharge des nappes phréatiques. Les données exploitées dans ce travail proviennent de la station climatologique de Seb Dou.

Tableau (4) : Coordonnées de la station climatologique de Seb Dou.

Station	Latitude	Longitude	Altitude
Seb Dou	34.63°N	1.20° O	923

1-Précipitations :

Les précipitations sont en effet le principal apport d'eau dans le sous bassin versant. Elles façonnent de façon cruciale le cycle hydrologique : elles influencent directement l'écoulement superficiel, l'infiltration et la recharge des nappes souterraines.

La répartition des précipitations est en effet conditionnée par de nombreux facteurs capables de varier saison par saison : le climat, la topographie même et aussi circulations atmosphériques.

Le tableau ci-dessous et la figure représentent la variation des données de précipitations annuelles de la série d'étude de 30 ans (1995 à 2024).

Tableau (5) : Les valeurs des précipitations annuelles.

Année	Précipitations (mm)	Années	Précipitations (mm)	Années	Précipitations (mm)
1995	337.5	2006	332.2	2017	258.4
1996	443.0	2007	485.2	2018	501.0
1997	263.7	2008	590.6	2019	300.6
1998	216.2	2009	395.5	2020	210.9
1999	411.3	2010	469.3	2021	285.0
2000	237.3	2011	464.1	2022	325.0
2001	337.5	2012	506.2	2023	256.0
2002	363.9	2013	474.6	2024	304.0
2003	511.5	2014	400.6		
2004	511.5	2015	305.9		
2005	332.2	2016	353.3		

Précipitations moyennes annuelles : 372.8(mm).

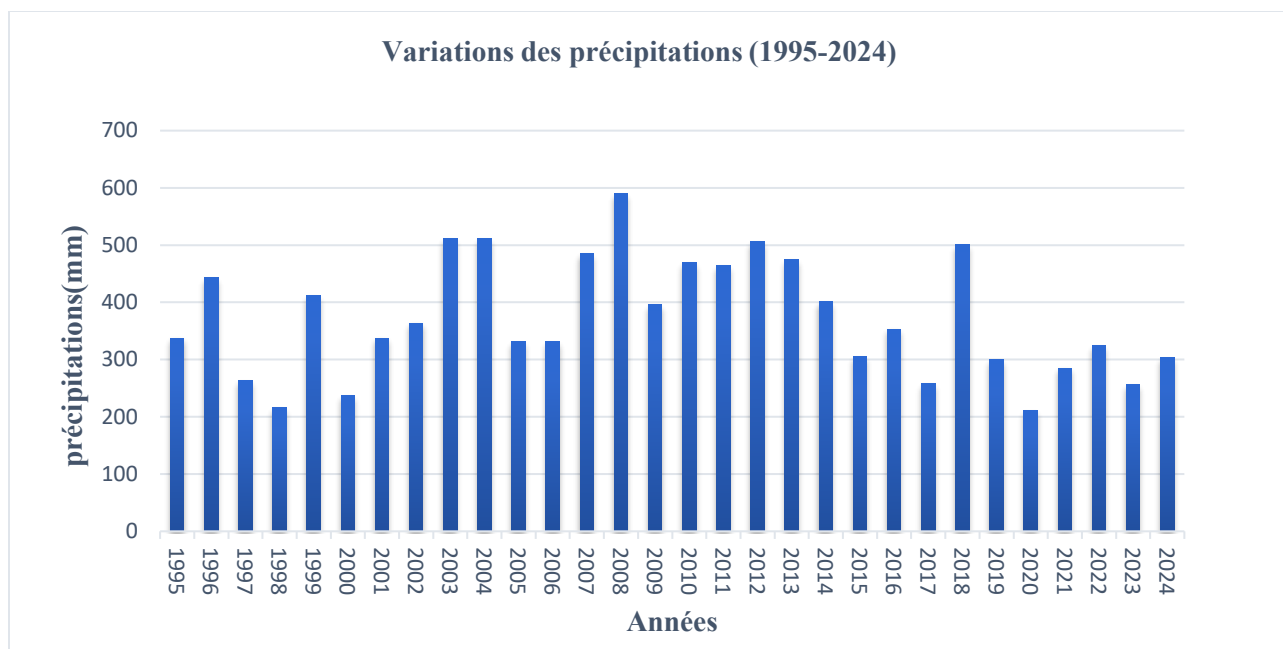


Figure (10) : Variations de précipitations annuelles (1995 -2024).

La figure10 montre que:

- La valeur maximale est enregistrée en 2008 avec 590.6mm.
- La valeur minimale est enregistrée en 2020 avec 210.9mm.
- La valeur moyenne annuelle des précipitations est de 372.8mm.

1-1-Variabilité mensuelle :

Le tableau 06 et la figure 11 illustrent les variations des moyennes mensuelles de précipitations sur une période de 30 ans.

Tableau (6) : Variations des précipitations moyennes mensuelles

MOIS	JAN	FEVR	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEP	OCT	NOV	DEC
P(MM)	48.8	32.3	43.1	38.8	27.4	8.8	1.2	11.6	29.9	41.6	51.8	37.5

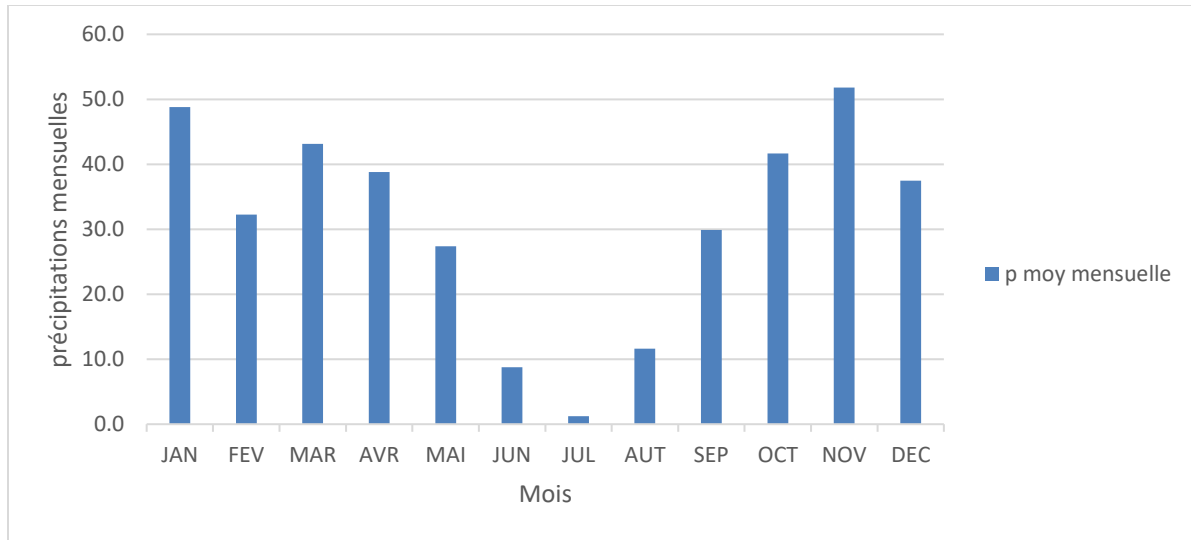


Figure (11) : Variations des précipitations moyennes mensuelles.

L'étude de la distribution des précipitations mensuelles révèle que les mois de novembre et janvier (51.8mm et 48.8mm respectivement) présentent les précipitations les plus élevées ce qui témoigne d'une pluviométrie en cette période. On constate que les mois d'été tels que juin, juillet et août se caractérisent par une nette diminution des précipitations. Juillet, en particulier, enregistre une valeur quasi nulle (1.2mm), illustrant une période de sécheresse marquée. Ce déficit hydrique est susceptible d'avoir un impact négatif sur la recharge des nappes souterraines. Entre ces deux extrêmes, les mois de transition comme mars, avril, mai, septembre et octobre présentent des précipitations modérées. Ces périodes jouent un rôle de charnière entre la sécheresse estivale et les pluies hivernales, contribuant à une certaine stabilité hydrologique sur l'année

1-2-Variabilité moyennes saisonnière

Tableau (7) : Variations des précipitations moyennes saisonnières :

Automne			Hiver			Printemps			Eté		
Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août
123.3(mm)			118.6(mm)			109.3(mm)			21.6(mm)		

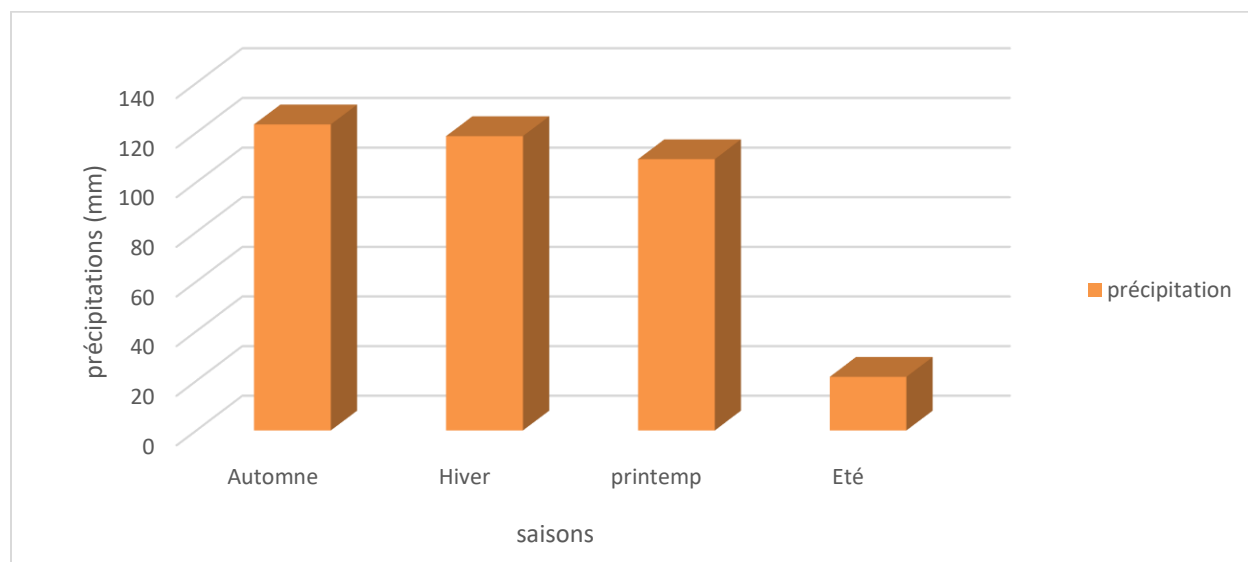


Figure (12): Variation des précipitations moyennes saisonnières.

La répartition saisonnière des précipitations montre une dominance marquée des saisons humides, notamment l'automne (123,3 mm) et l'hiver (118,6 mm), traduisant l'influence d'un régime méditerranéen. Le printemps enregistre une moyenne modérée (109,3 mm), tandis que l'été se distingue par une sécheresse prononcée avec seulement 21,6 mm. Cette variabilité confirme la concentration des pluies en saisons froides et leur rareté en été.

-Températures :

L'objectif de cette étude est d'analyser l'impact de la température sur les potentialités de la recharge des nappes phréatiques. Plus spécifiquement, il s'agit de comprendre comment les variations de température influencent les processus d'infiltration des eaux de surface dans les nappes souterraines et d'évaluer les effets des changements climatiques sur ces processus.

2-1-Températures moyennes mensuelles :

Les températures moyennes mensuelles montrent des variations notables d'un mois à l'autre sur la période étudiée (1995 – 2024). L'analyse détaillée de ces températures mensuelles constitue un outil fondamental pour mieux appréhender les dynamiques climatiques locales et évaluer les effets potentiels des changements climatiques à court terme.

Tableau (8) : Variations des températures moyennes mensuelles (1995 - 2024).

Mois	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Jui	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Moyenne
Tmax	13	13.7	16	18.5	22.8	25.2	28.4	29.3	24.9	21.8	17.5	13.4	20.3
Tmoy	10.5	11.2	13.3	15.5	18.8	23.1	26.1	26.5	22.8	19.5	14.2	11.2	17.7
Tmin	8.3	7.9	11.7	13.1	15.6	20.6	22	22.7	20.7	15.6	11.2	8.4	14.8

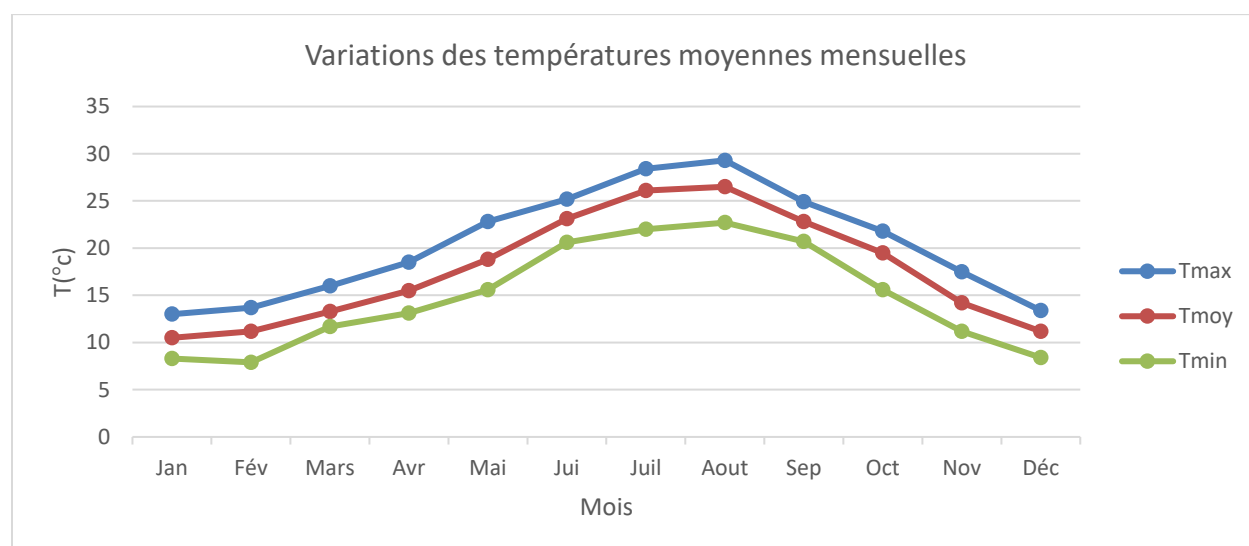


Figure (13) : Courbes de variations des températures moyennes mensuelles.

L'étude des températures mensuelles moyennes dans la région de Sebdo pour la période 1995–2024 met en évidence une nette variation. Les températures maximales (Tmax) varient entre 13 °C en janvier et atteignent un pic de 29,3 °C en août, traduisant des étés chauds. Les températures minimales (Tmin) évoluent de 7,9 °C en février à 22,7 °C en août. Les températures moyennes enregistrent des valeurs allant de 10,5°C en janvier à 26,5°C en août. La température moyenne annuelle est de 17,7°C

3- Etude du climat.

L'étude du climat constitue un outil essentiel pour comprendre les dynamiques environnementales locales et évaluer les effets potentiels des changements climatiques sur les ressources naturelles. En analysant les températures et les précipitations enregistrées dans la station de Sebdou, il est possible d'identifier les séquences sèches et humides, et d'apprécier le régime climatique caractéristique de cette zone (Bessaoud, 2006).

3-1-Méthodes de visualisation (Méthodes graphiques) :

Diagrammepluvio-thermique deBagnouls et Gausсен: est un outil graphique couramment utilisé en climatologie pour caractériser les régimes climatiques d'une région. Il permet de visualiser la relation entre les températures mensuelles moyennes et les précipitations mensuelles sur une année complète, ce qui offre une représentation claire de l'équilibre entre les deux principaux paramètres climatiques : les températures et les précipitations, liés par la relation suivante : $P=2T$

- Si la courbe des températures est au-dessus de la courbe des précipitations : nous avons une période sèche.

- Si la courbe des précipitations est au-dessus de celle des températures : la période est humide.

Tableau (09) : Précipitations et Températures moyennes mensuelles à la station de Sebdou.

MOIS	JAN	FER	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEP	OCT	NOV	DEC
P(mm)	48.8	32.3	43.1	38.8	27.4	8.8	1.2	11.6	29.9	41.6	51.8	37.5
T (°C)	10.5	11.2	13.3	15.5	18.8	23.1	26.1	26.1	22.8	19.5	14.2	11.2

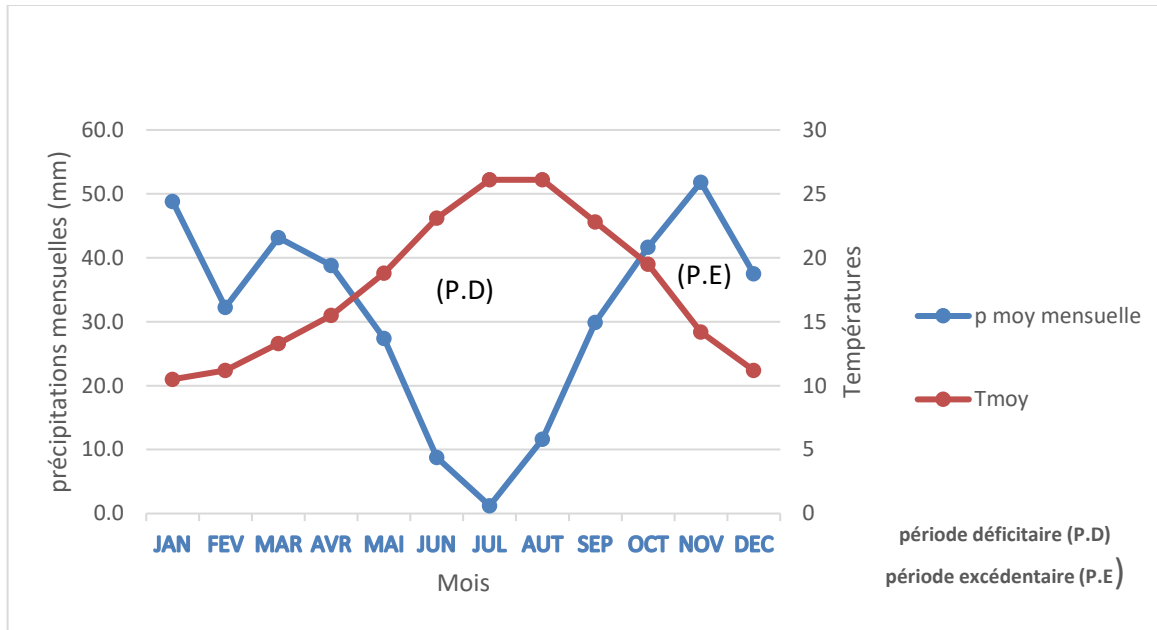


Figure (14) : Diagramme pluviométrique-thermique de Bagnouls et Gausсен

Le diagramme pluviométrique-thermique montre que la période déficitaire (P.D) est enregistrée de la mi-avril jusqu'au début du mois d'octobre, tandis que la période excédentaire (P.E) s'étale sur les autres mois de l'année.

3.2-Indice d'aridité de DE Martonne (1923) :

L'indice d'aridité de DE Martonne (1923) est un indicateur climatique utilisé pour évaluer le niveau d'aridité ou d'humidité d'un climat. Il est basé sur les précipitations annuelles et la température moyenne annuelle

-Indice annuel de DE Martonne :

$$Ia = \frac{P}{T+10}$$

- **Ia**: Indice d'aridité (indice d'aridité annuel de DE Martonne).
- **P** : Précipitations annuelles (en mm)
- **T** : Température moyenne annuelle (en °C).

Tableau (10) :Indice d'aridité de DE Martonne.

P (MOY)	T (MOY)	Ia
372.8	17.7	13.45

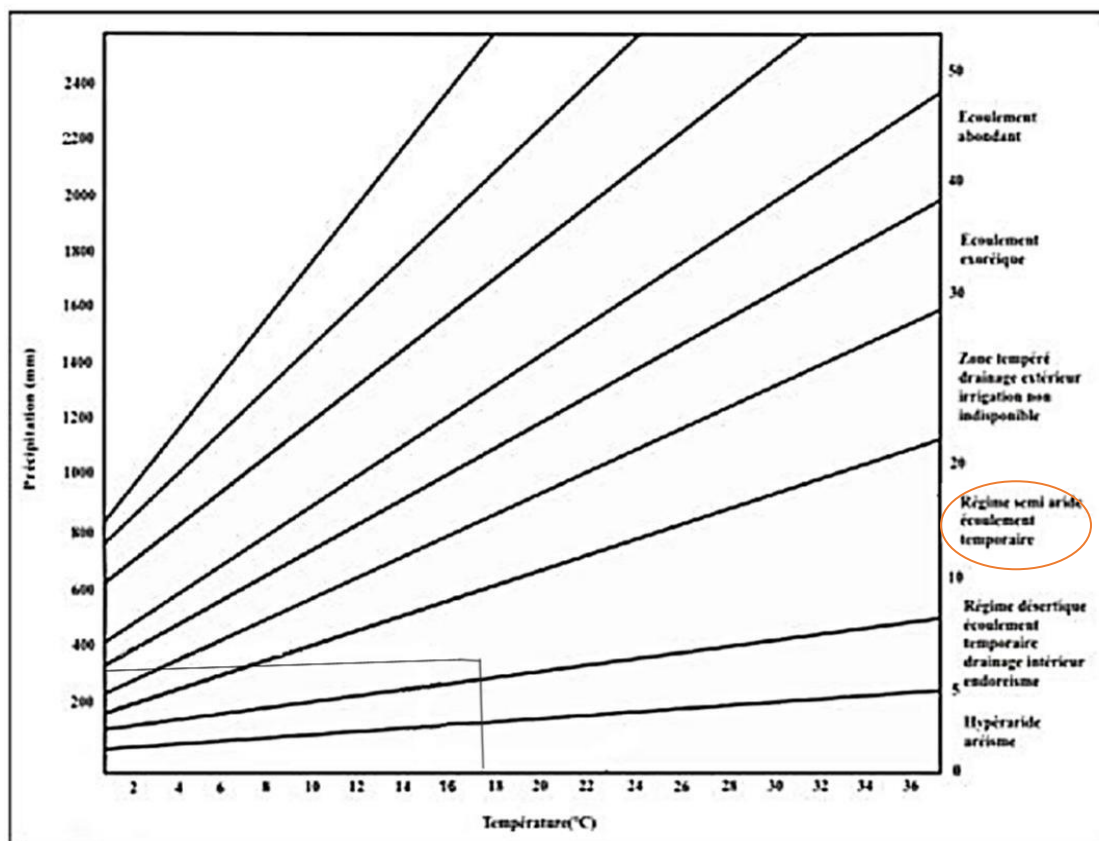


Figure (15) : Abaque de l'indice d'aridité annuel.

Interprétation de l'indice :

VALEUR DE I	TYPE DU CLIMAT
I > 50	Climat équatorial et montagnard
20 < I < 50	Froid tempéré ou tropical
10 < I < 20	Climat semi-aride
5 < I < 10	Climat désertique
I < 5	Climat hyper-aride

Le calcul de l'indice d'aridité annuel a donné une valeur de 13.45. Une valeur comprise entre 10 et 20 indique un climat *semi-aride*.

3.3 Indice d'aridité mensuel :

Formule de l'indice d'aridité mensuel :

$$i = \frac{12P}{T+10}$$

P : Précipitations moyennes mensuelles (mm).

T : Températures moyennes mensuelles (°C).

i : indice d'aridité mensuelle.

Tableau (11) : Indices d'aridité mensuelle de DE Martonne.

MOIS	JAN	FEV	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEP	OCT	NOV	DEC
i	27.7	13.9	18.67	16.80	11.87	3.81	0.51	5.02	12.95	18.02	22.44	16.24
Type du régime	T	S	T	S	S	Ha	Ha	Ha	S	S	T	T

T : Froid tempéré ou tropical

S : Semi-aride

Ha : Hyper aride.

Climagramme d'EMBERGER :

Le climagramme d'Emberger est un outil utilisé pour caractériser les types de climat méditerranéens, en particulier dans les régions semi-arides à arides. Il a été conçu par le botaniste LOUIS EMBERGER pour établir une relation entre la végétation et le climat, notamment en Afrique du Nord et dans les zones méditerranéennes. Il est utilisé pour déterminer le type de l'étage bioclimatique d'une station donnée, à partir la relation suivante :

$$Q_2 = \frac{1000P}{((M+m)/2)(M-m)}$$

- **P** : Précipitations annuelles (en mm)
- **M** : Moyenne des maximas de la température en (°K) du mois le plus chaud
(Août 29.3+273=302.3°k)
- **m** : Moyenne des minimas de la température en (°K) du mois le plus froid
(Février: 7.9+273=280.9°k)
- **Q₂** : Quotient pluvio-thermique d'Emberger

Avec : **K = T (°C) + 273**

Tableau (12) : Indice d'Emberger.

P(mm)	M (°k)	M(°k)	Q ₂
372.8	302.3	280.9	59.72

Interprétation des valeurs de Q_2 :

Valeur de Q_2	Type de climat
$Q_2 > 100$	Humide
$60 < Q_2 \leq 100$	Sub-humide
$40 < Q_2 \leq 60$	Semi-aride supérieur
$20 < Q_2 \leq 40$	Semi-aride inférieur
$5 < Q_2 \leq 20$	Aride
$Q_2 \leq 5$	Saharien / Climat désertique

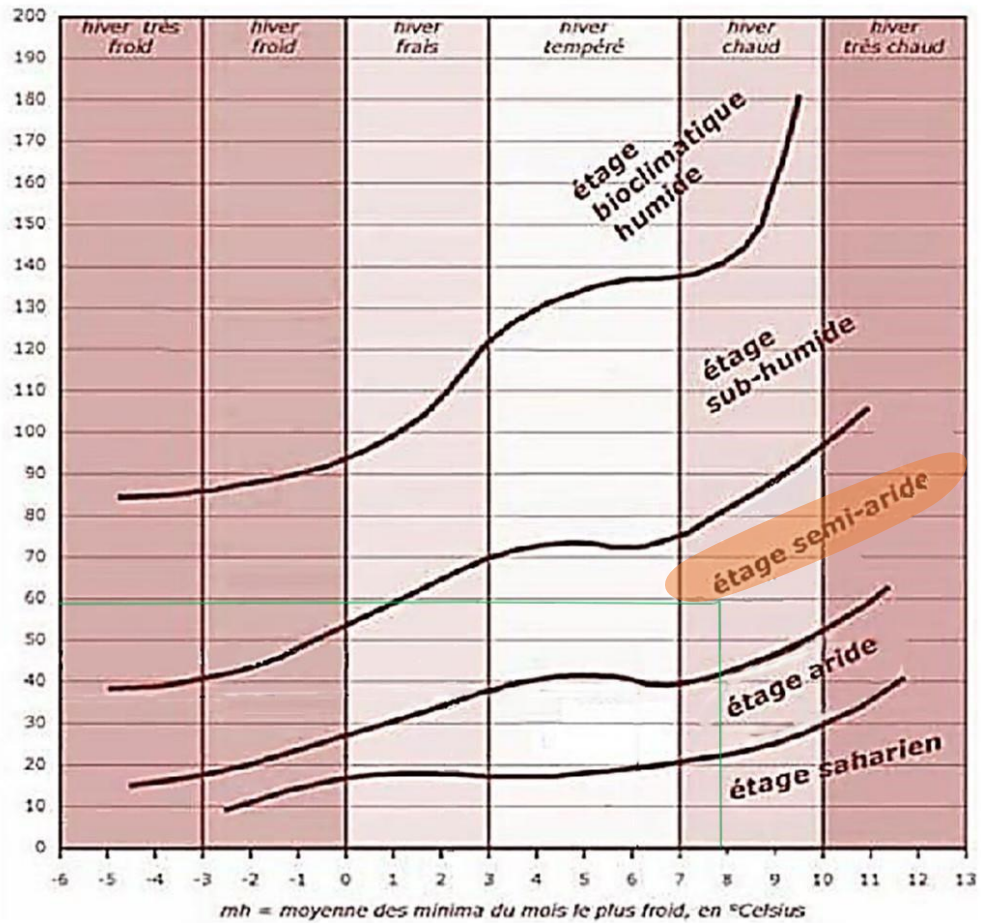


Figure (16) : Climagramme d'EMBERGER.

Indice de Stewart (1969) :

Calculé par la formule suivante :

$$Q_2 = \frac{3.43P}{M+m}$$

Avec :

Q₂ : Quotient d'Emberger.

P: Précipitations moyennes annuelles (372.8mm).

M: Moyenne des températures maximales quotidiennes du mois le plus chaud (Août 29.3°C).

m: moyenne des minimas de la température du mois le plus froid (février : 7.9°C).

Tableau (13) : Indice de Stewart.

P(mm)	M(°C)	m(°C)	Q₂
372.8	29,3	7.9	34.28

Pour :

10 < Q₂ < 50 climat semi-aride.

2 < Q₂ < 10 climat désertique

Q₂ < 2 climat insaturé

Donc : Q₂=34.28 le climat est *semi-aride*.

4-Bilan Hydrologique :

Le bilan hydrologique constitue un élément fondamental pour l'analyse des flux d'eau au sein d'une zone géographique déterminée (telle qu'un bassin versant ou une région) sur une durée spécifique. Il repose sur la loi de conservation de la masse, selon laquelle l'ensemble des volumes d'eau entrants, sortants ou emmagasinés dans le système hydrologique doivent être considérés.

Formule générale du bilan hydrologique :

$$P = E + R + \Delta S$$

Où

- **P** = précipitations (pluie, neige, etc.)
- **E** = évapotranspiration (évaporation + transpiration des plantes)
- **R** = ruissellement (écoulements de surface et écoulement souterrain)
- **ΔS** = variation de stock d'eau (dans le sol, les nappes, les lacs, etc.)

4-1 Evapotranspiration :

C'est la quantité d'eau présente qui s'évapore du sol et sa transpiration.

Il existe deux types d'évapotranspiration :

. **L'évapotranspiration potentielle (ETP)**:est définie comme la quantité d'évaporation qui pourrait se produire en cas d'approvisionnement en eau suffisant (WWW.Wikipédia.org).

.**L'évapotranspiration réelle (ETR)** :est la quantité totale d'eau qui s'évapore du sol et des plantes lorsque le sol est à son taux d'humidité naturel.(www.aquaportail.com) .

Il existe plusieurs méthodes pour l'estimation de ces paramètres:

o La méthode de TURC.

o La méthode de COUTAGNE .

o La méthode de VERDEIL .

o La méthode de WUNDT.

4.1.1-Méthode de Turc (1954) :

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \left(\frac{P}{L}\right)^2}}$$

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

P :Précipitations moyennes annuelles (mm)

T :Températures moyennes annuelles (C°)

ETR :Evapotranspiration réelle annuelle (mm/an).

Tableau14 : Résultat du calcul de l'ETR par la méthode de Turc

Station	P(mm)	T(C°)	L	ETR (mm/an)	Écoulement et infiltration
Sebdou	372.8	17.7	1019.76	366.82	5.98 soit 1.60 % de P

4.1.2 Méthode de Coutagne :

C'est l'équivalent de l'évapotranspiration réelle et il peut être calculé à partir de la hauteur moyenne annuelle des précipitations (mm) et la température moyenne annuelle °C.

$$D = P - \lambda P^2 \text{ Où}$$

D : Déficit d'écoulement (mm/an).

P : Précipitations annuelles (mm).

T : Température moyenne annuelle (°C).

$$\lambda: 1/(0,8+0,14T).$$

1. Calcul de la longueur d'onde λ

Application de la méthode de Coutagne

$$D = P - \lambda P^2 \text{ avec } \lambda = \frac{1}{0.8 + 0.14T}$$

Pour les valeurs climatiques observées :

$$P = 372.8 \text{ mm/an} = 0.3728 \text{ m/an}$$

$$T = 17.7 \text{ °C}$$

$$\lambda = 0.30$$

La méthode n'est pas applicable, car P n'est pas comprise entre $1/8\lambda < P < 1/2\lambda$

4.1.3 Méthode de Wundt :

Le déficit d'écoulement est calculé à partir de la projection de la température moyenne annuelle et des précipitations moyennes annuelles sur un abaque établi par Wundt.

Tableau (15) : Valeur du déficit d'écoulement d'après Wundt

Station	P(mm)	T(°C)	D (mm/an)	Ecoulement et infiltration (P-D)
Sebdou	372.8	17.7	320 soit 85.84 de P	52,8 soit 14.16% de P

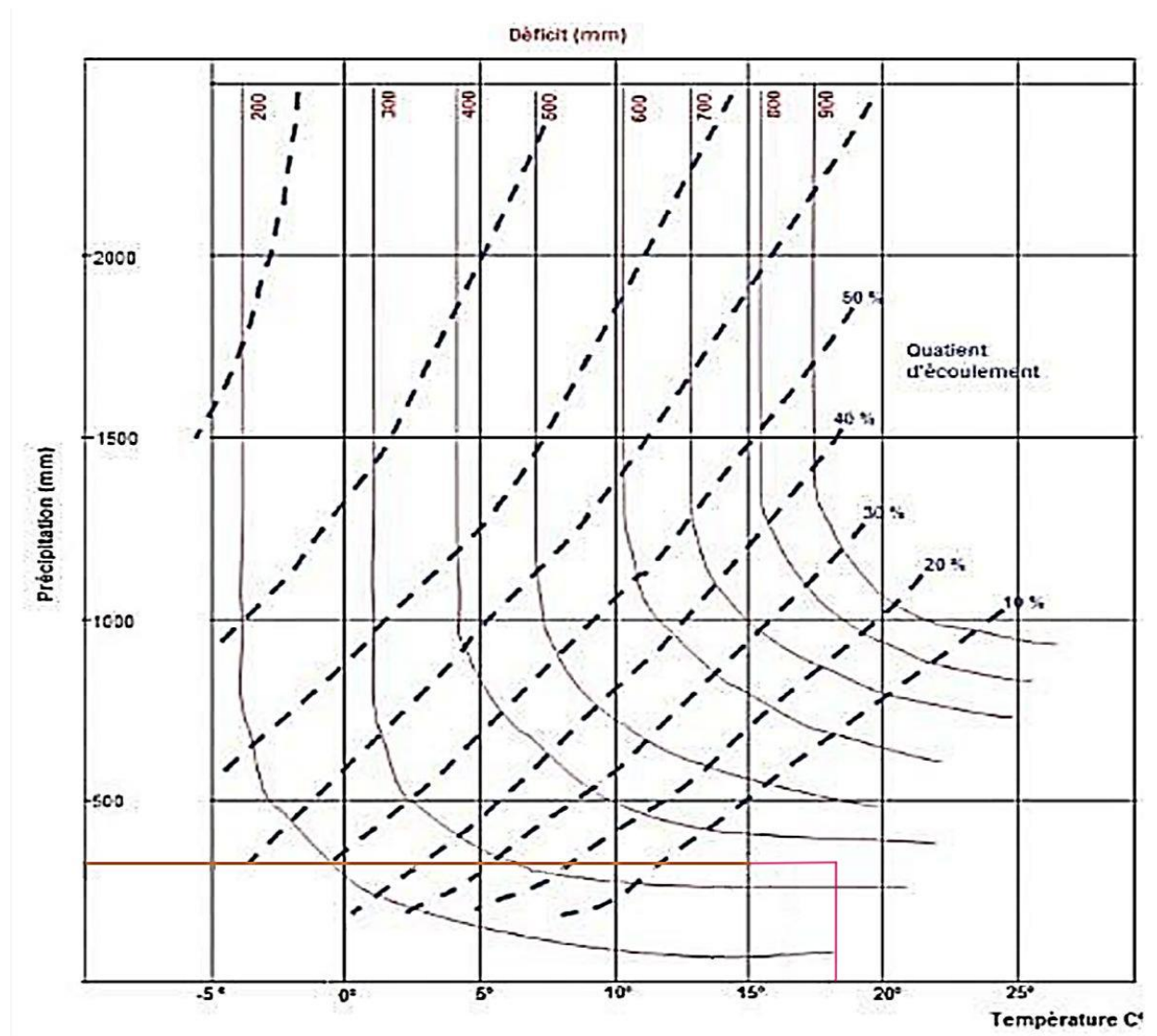


Figure (17) : Détermination du déficit d'écoulement d'après l'Abaque de WUND

4.1.4 Méthode de P. VERDEIL

Verdeil (1988), a établi en Algérie un abaque bi-logarithmique pour les régions semi-arides, En tenant compte uniquement des précipitations annuelles. Les résultats de cette Méthode sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau (16) : Valeur du déficit d'écoulement d'après P. VERDEIL.

Précipitations (mm)	Déficit (mm/an)	Écoulement et infiltration (mm)
372.8	356 soit 95.5 de p	16.8 soit 4.50% de P

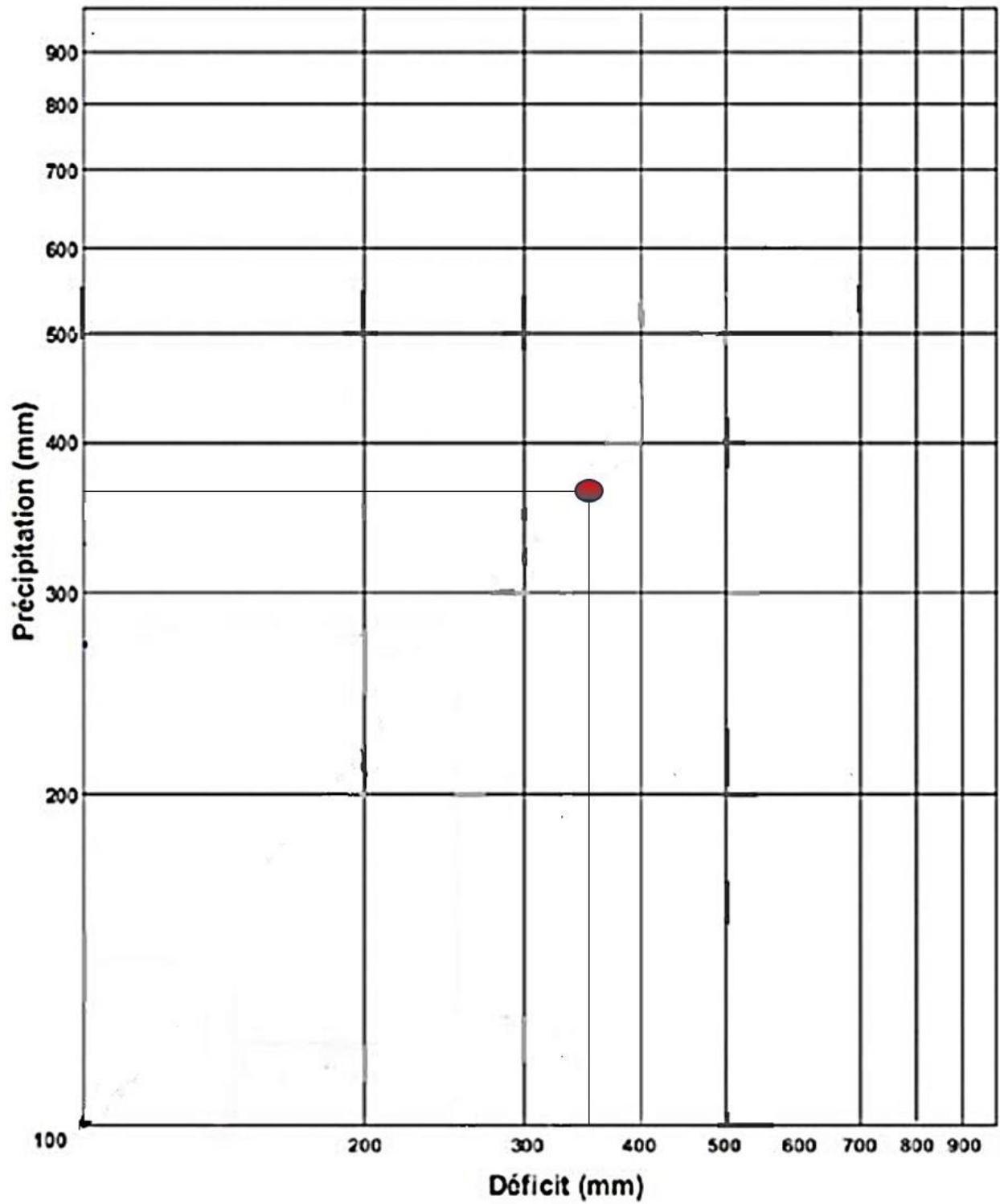


Figure (18) : Abaque pour le calcul du déficit d'écoulement selon (P. VERDEIL, 1988).

4.2-Evapotranspiration potentielle (ETP) :

L'estimation de l'ETP est fondamentale pour déterminer la part exacte des précipitations qui peut intervenir dans la recharge des nappes. En effet, une part importante des apports pluviométriques est perdue par évapotranspiration, particulièrement dans les zones semi-arides comme celle du sous bassin de Sebdou, où le climat est marqué par une irrégularité des précipitations et une demande évaporative élevée.

Plusieurs méthodes permettent d'estimer l'ETP, qui varie de l'ordre des approches très pratiques et empiriques, comme Thornthwaite et Turc, le choix de la technique se fait essentiellement en fonction de ce qui est disponible et de la qualité des données climatiques (température, précipitation...), ainsi que du contexte environnemental et agro-climatique local.

4.2.1 Méthode de THORNTHWAITE :

Dans cette Méthode on doit calculer :

$$\text{ETP non corrigée} = 16(T \times 10)^a$$

$$\text{avec : } a = 0,016 I + 0,5$$

$$\text{ETP corrigée} = 16(T \times 10)^a \times K$$

ETP : Evapotranspiration potentielle (mm)

i: Indices thermique mensuelle Avec $i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1,514}$

I : La somme des indices mensuels des 12 mois de l'année (i), $I = \sum 12 i$

T : Température moyenne mensuelle du mois considéré en °C.

$$a = 1,60$$

K : Coefficient de correction, en fonction de la latitude de la station de Sebdou et de 34°

Tableau (17) : Coefficient de correction en fonction de la latitude et du mois
Formule de Thornthwaite d'après Brochet.L Gerbier 1968

Lat. N.	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0	1.04	.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04
5	1.02	.93	1.03	1.02	1.06	1.03	1.06	1.05	1.01	1.03	.99	1.02
10	1.00	.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	.98	.99
15	.97	.91	1.03	1.04	1.11	1.08	1.12	1.08	1.02	1.01	.95	.97
20	.95	.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	.93	.94
25	.93	.89	1.03	1.06	1.15	1.14	1.17	1.12	1.02	.99	.91	.91
26	.92	.88	1.03	1.06	1.15	1.15	1.17	1.12	1.02	.99	.91	.91
27	.92	.88	1.03	1.07	1.16	1.15	1.18	1.13	1.02	.99	.90	.90
28	.91	.88	1.03	1.07	1.16	1.16	1.18	1.13	1.02	.98	.90	.90
29	.91	.87	1.03	1.07	1.17	1.16	1.19	1.13	1.03	.98	.90	.89
30	.90	.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.20	1.14	1.03	.98	.89	.88
31	.90	.87	1.03	1.08	1.18	1.18	1.20	1.14	1.03	.98	.89	.88
32	.89	.86	1.03	1.08	1.19	1.19	1.21	1.15	1.03	.98	.88	.87
33	.88	.85	1.03	1.09	1.19	1.20	1.22	1.15	1.03	.97	.88	.86
34	.88	.85	1.03	1.09	1.20	1.20	1.22	1.16	1.03	.97	.87	.86
35	.87	.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	.97	.86	.85
36	.87	.85	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16	1.03	.97	.86	.84
37	.86	.84	1.03	1.10	1.22	1.23	1.25	1.17	1.03	.97	.85	.83
38	.85	.84	1.03	1.10	1.23	1.24	1.25	1.17	1.04	.96	.84	.83
39	.85	.84	1.03	1.11	1.23	1.24	1.26	1.18	1.04	.96	.84	.82
40	.84	.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	.96	.83	.81
41	.83	.83	1.03	1.11	1.25	1.26	1.27	1.19	1.04	.96	.82	.80
42	.82	.83	1.03	1.12	1.26	1.27	1.28	1.19	1.04	.95	.82	.79
43	.81	.82	1.02	1.12	1.26	1.28	1.29	1.20	1.04	.95	.81	.77
44	.81	.82	1.02	1.13	1.27	1.29	1.30	1.20	1.04	.95	.80	.76
45	.80	.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	.94	.79	.75
46	.79	.81	1.02	1.13	1.29	1.31	1.32	1.22	1.04	.94	.79	.74
47	.77	.80	1.02	1.14	1.30	1.32	1.33	1.22	1.04	.93	.78	.73
48	.76	.80	1.02	1.14	1.31	1.33	1.34	1.23	1.05	.93	.77	.72
49	.75	.79	1.02	1.14	1.32	1.34	1.35	1.24	1.05	.93	.76	.71
50	.74	.78	1.02	1.15	1.33	1.36	1.37	1.25	1.06	.92	.76	.70
Lat. S.												
5	1.06	.95	1.04	1.00	1.02	.99	1.02	1.03	1.00	1.05	1.03	1.06
10	1.08	.97	1.05	.99	1.01	.96	1.00	1.01	1.00	1.06	1.05	1.10
15	1.12	.98	1.05	.98	.98	.94	.97	1.00	1.00	1.07	1.07	1.12
20	1.14	1.00	1.05	.97	.96	.91	.95	1.00	1.00	1.08	1.09	1.15
25	1.17	1.01	1.05	.96	.94	.88	.93	.98	1.00	1.10	1.11	1.18
35	1.23	1.04	1.06	.94	.89	.82	.87	.94	1.00	1.13	1.17	1.25
40	1.27	1.06	1.07	.93	.86	.78	.84	.92	1.00	1.15	1.20	1.29
42	1.28	1.07	1.07	.92	.85	.76	.82	.92	1.00	1.16	1.22	1.31
44	1.30	1.08	1.07	.92	.83	.74	.81	.91	.99	1.17	1.23	1.33
46	1.32	1.10	1.07	.91	.82	.72	.79	.90	.99	1.17	1.25	1.35
48	1.34	1.11	1.08	.90	.80	.70	.76	.89	.99	1.18	1.27	1.37
50	1.37	1.12	1.08	.89	.77	.67	.74	.88	.99	1.19	1.29	1.41

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant

Tableau (18) :Résultats de l'indice thermique mensuel, l'ETP non corrigée et corrigée à la station de Sebdou (1995-2024).

MOIS	J	F	M	A	M	J	JT	AT	S	O	N	D	Annuel
T(moy)	10.5	11.2	13.3	15.5	18.8	23.1	26.1	26.5	22.8	19.5	14.2	11.2	17.7
I	3.07	3.39	4.39	5.54	7.42	10.14	12.20	12.48	9.94	7.85	4.85	3.39	84.66
ETP non corrigée	22.58	25.04	32.96	42.11	57.35	79.24	96.94	99.33	78.09	60.80	36.60	25.04	656.08
K	0.88	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	0.97	0.85	0.85	*****
ETP corrigée	19.87	21.28	33.95	45.90	69.39	95.88	119.2	115.23	80.43	58.98	31.11	21.28	712.5

4.3-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 long temps que les réserves en eau du sol se rontcapables d'équilibrer la balance, au-delà, il y a un déficit.

4.3.1Calcul de la réserve facilement utilisable (R.E.U).

D'après Hallaire (1960) La R.E.U est calculée par la formule suivante :

$$RU = \frac{C - f}{1000} H \cdot D + 30$$

- **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 apparente 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=100 mm

• **f** : Capacité au point de flétrissement.

• **H** : Profondeur du sol (H=500mm).

**Tableau (19) : Calcul du bilan hydrologique de la station de Seb dou.
Selon C. W Thornthwaite.**

Mois	Jan	Fev	Mars	Avil	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	annuelle
P	48.8	32.3	43.1	38.8	27.4	8.8	1.2	11.6	29.9	41.6	51.8	37.5	372.8
ETP	19.87	21.28	33.95	45.9	69.39	95.88	119.2	115.23	80.43	58.98	31.11	21.28	712.5
RU (100mm)	28.93		9.15	2.05	39.94	0	0	0	0	0	20.69	36.91	*****
ETR	19.87	21.28	33.95	45.9	69.39	8.81	1.2	11.6	29.9	41.6	31.11	21.28	335.89
DA	0	0	0	0	0	87.07	118	103.63	50.53	17.38	0	0	376.61
EXE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E	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

5.Conclusion:

L'analyse des paramètres morphométriques est essentielle pour interpréter la dynamique du sous bassin de l'Oued Seb dou, l'ensemble de ces caractéristiques présente une hétérogénéité spatiale, influençant directement les mécanismes de circulation de l'eau.

L'étude climatologique de la zone d'étude met en avant l'importance fondamentale des interactions entre les paramètres climatiques et la dynamique de la recharge des nappes pour améliorer la compréhension du fonctionnement hydrologique du sous bassin étudié

Les températures et les prescriptions montrent une variabilité dans le temps, typique des climats semi-arides avec une répartition très inégale tout au long de l'année. La température moyenne annuelle s'élève à 17.7 °C et les prescriptions moyennes annuelles sont de 372.8 mm. Le climat est semi aride, caractérisé par :

*Une saison sèche : de la mi-avril au début octobre.

*Une saison humide : couvre le reste des mois de l'année.

Les calculs effectués dans le bilan hydrique ont permis d'estimer une évapotranspiration potentielle annuelle de 712.5 mm. Cependant, l'évapotranspiration réelle (quantité d'eau effectivement évaporée et transpirée par végétation en fonction de la disponibilité en eau du sol) n'atteint que 335.89 mm. Cette différence met en évidence un déficit de 376.61 mm/an traduisant un stress marqué dans la zone d'étude.

CHAPITRE II :
GÉOLOGIE ET HYDROGÉOLOGIE

1. Introduction :

L'étude géologique et hydrogéologique du sous-bassin de Sebdou constitue une étape fondamentale pour évaluer le potentiel de recharge des nappes souterraines. L'analyse des formations géologiques permet d'identifier la nature des roches, leur répartition spatiale, ainsi que les principales structures tectoniques (failles, plis, zones fracturées) influençant le comportement hydrodynamique du milieu. Ces éléments conditionnent la capacité des terrains à permettre l'infiltration et la circulation de l'eau. Sur le plan hydrogéologique, l'objectif est de déterminer les types d'aquifères présents dans la région. L'évaluation de la perméabilité des formations et l'identification des zones favorables à l'infiltration naturelle sont essentielles pour localiser les secteurs à fort potentiel de recharge. Cette approche intégrée permet d'orienter les efforts de protection et de gestion des ressources en eau souterraine. (FAO,1994;DEMMAK,1982;ROSE,1994).

2. Géologie :

La géologie du bassin de la Tafna a été étudiée dans une série de travaux qui ont débuté par ceux de Gentil (1903) et ont continué avec Collignon (1993). Ces recherches ont permis d'identifier les grands ensembles stratigraphiques et de reconstituer l'histoire géologique ainsi que la structure de la région. Le bassin de la Tafna est caractérisé par l'abondance de deux faciès : un faciès carbonaté d'âge secondaire, largement dominant dans le secteur d'étude, et un faciès marneux du Miocène moins étendu. Les formations carbonatées, représentées principalement par des calcaires et des dolomies fortement karstifiées, confèrent à cette partie de l'Ouest algérien une spécificité hydrogéologique notable. Selon Collignon (1993), ces roches présentent une perméabilité secondaire élevée due à la karstification et à la fracturation, ce qui favorise l'infiltration des eaux de surface et contribue de manière significative à la recharge des aquifères. Ces formations affleurent notamment dans les Monts des Traras au Nord, et dans les régions de Khémis, Sikkak et Sebdou au Sud. En revanche, les formations marneuses du Miocène, bien que couvrant principalement les zones de plaines, se distinguent par leur imperméabilité, leur caractère meuble et leur forte érodabilité. Toujours selon Collignon (1993), ces terrains favorisent le ruissellement au détriment de l'infiltration, ce qui limite leur rôle dans le processus de recharge. De plus, en raison de l'activité tectonique intense ayant affecté la région, ces dépôts peuvent localement se retrouver en position sous-

jacente par rapport aux unités calcaires, inversant parfois l'ordre stratigraphique. Enfin, la structure tectonique du bassin, marquée par une alternance de horsts et de grabens, avec des rejets de failles atteignant parfois les 1000 m, joue un rôle de premier plan dans la dynamique hydrogéologique. Cette configuration structurale peut favoriser, dans certains cas, l'accumulation et l'infiltration des eaux dans les zones basses, tandis que dans d'autres, elle contribue à leur drainage latéral rapide hors des zones d'alimentation. (KOURA .M ,LAGRAA.A ,BOUSSOUAR .A,2021).

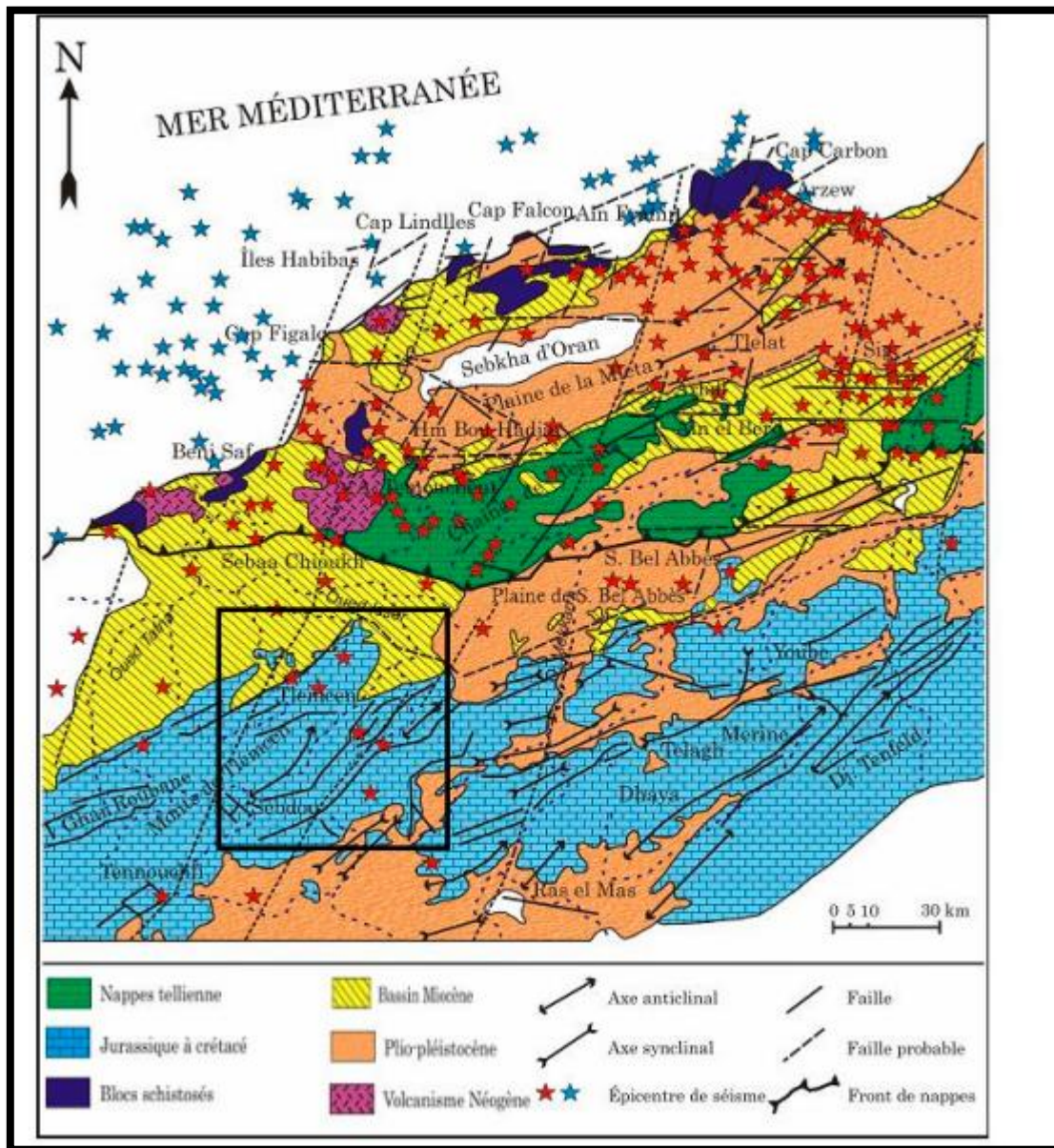


Figure (19) : Formations géologiques de la région d'étude(Thomas, 1985).

2.1. Les séries anciennes : Les séries géologiques anciennes de la région d'étude comprennent plusieurs formations représentatives du Jurassique supérieur et du Crétacé inférieur:

Grès de Boumediène : datés de l'Oxfordien supérieur au Kimméridgien inférieur, ce sont des grès cimentés au calcaire, avec des passées argileuses, souvent masqués par la végétation.

Calcaires de Zarifet : reposent en concordance sur les grès précédents, ils forment des bancs calcaires fins alternant avec des niveaux marneux, bien exposés aux alentours de Tlemcen. Cette formation est attribuée au Kimméridgien supérieur.

Dolomies de Tlemcen : Datées du Kimméridgien moyen à supérieur, elles apparaissent sous forme de dolomies grises cristallines riches en cavités et d'aspect ruiniforme.

Marno-calcaires de Raouraï : D'âge Tithonien basal. Composés d'une alternance de marnes et de calcaires durs, ces dépôts sont bien visibles sur le plateau de Terny.

Dolomies de Terny : D'âge Tithonien inférieur. D'aspect massif et vacuolaire, elles se distinguent facilement par leurs stratifications obliques. se développent sur les hauteurs de Terny et près du barrage Meffrouche.

Marno-calcaires de Hariga : Formation de marnes et de calcaires alternés, bien affleurante au Djebel Hariga, avec une puissance atteignant 165 m. D'âge Tithonien inférieur.

Formation d'Ouled Mimoun : D'âge Tithonien supérieur- Berriasien inférieur. Elle assure la transition entre le Jurassique et le Crétacé. Elle est bien développée sur la bordure nord du fossé de Sebdou.

Argiles de Lamoricière : D'époque Berriasien moyen-Valanginien, composées d'argiles et de grès à dominance calcaire vers le sommet, elles affleurent à Hassi Zerga.

Grès de Berthelot : Datées de l'Hauterivien, ils contiennent des minéraux argileux, tels que smectite et la chlorite, avec présence de bancs dolomitiques friables à la base.

2.2. Les séries récentes :

Formation de Sebou : Attribuée au Plio-Quaternaire, occupant principalement le fossé de Sebdou, constituée de matériaux détritiques plio-quaternaires peu consolidés. Ces dépôts sont

hétérogènes et recouvrent des terrains plus anciens.

Formations quaternaires : Ce sont des dépôts alluviaux, de terrasses ou de pentes, souvent peu épais mais largement répartis. Ils jouent un rôle important dans l'alimentation des nappes peu profondes.

Travertins : Présents sous forme de grandes accumulations rocheuses en falaises, ces dépôts sont liés à l'activité ancienne et récente de sources karstiques, notamment issues des formations du Kimméridgien (Benest,1982).

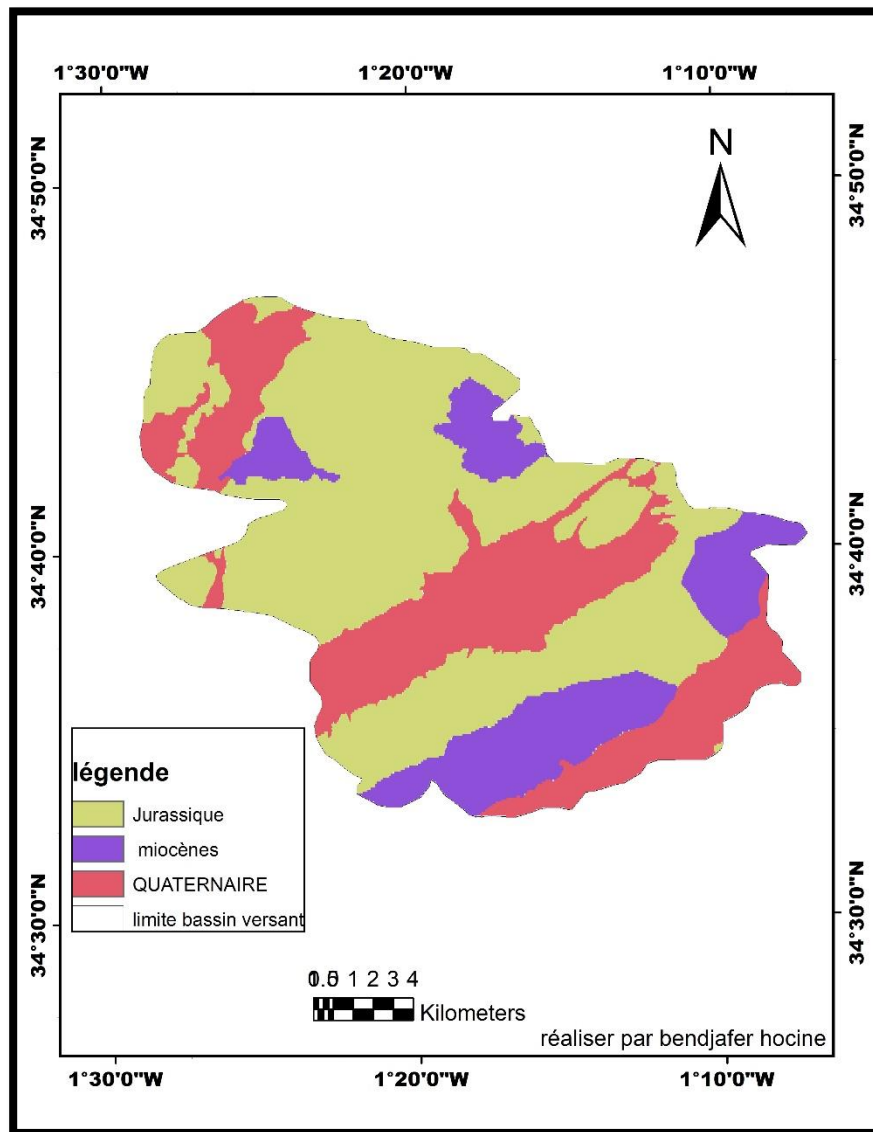


Figure (20) : Carte géologique du sous bassin de Sebdou.

*** Synthèse structurale :**

La structure actuelle de l'Algérie du Nord est liée aux mouvements hercyniens et alpins qui ont permis l'individualisation de plusieurs domaines. En Oranie, nous avons du Nord au Sud :

- Le domaine Tellien,
- Les Monts de Tlemcen parfois qualifiés de Meseta Oranaise,
- Le domaine atlasique,
- Le domaine saharien.

Les Monts de Tlemcen, domaine intracratonique plissé, s'interposent entre :

- Le domaine nappé du Tell ,au Nord,
- Le domaine stable des hautes plaines oranaises, au Sud.

L'étude structurale des monts de Tlemcen met en évidence la présence de deux systèmes de décrochements, parfois conjugués :

- L'un senestre, sensiblement N.S. et lié à de nombreux chevauchements vers le NW.
- L'autre dextre, en moyenne E.W. (N 50° - N110°) fréquemment impliqué dans le rejeu des failles les plus récentes (Plio-Quaternaire).

*** Les principales phases tectoniques :**

Selon M. Benest (1982), cinq phases tectoniques principales peuvent être envisagées de l'Eocétacé à une période récente.

- Phase éocétacée : Dans les monts de Tlemcen aucune discordance ne sépare les dépôts de la plate

forme carbonatée du Jurassique supérieur-Berriasien inférieur des faciès terrigènes transgressifs du Berriasien moyen et supérieur. Mais on constate que la subsidence durant le Jurassique supérieur et l'Eocène y est largement contrôlée par le jeu ou le rejeu des grands accidents SW-NE et subméridiens, hérités de l'orogénèse hercynienne (M. Benest, 1981).

- Phase atlasique : Elle doit correspondre sensiblement aux mouvements qui, dans les Monts des Traras (P. Guardia, 1975), se sont produits à partir du Sénonien et se terminent avant la mise en place des nappes telliennes.

L'analyse tectonique effectuée dans les Monts de Tlemcen et des Daïas permet d'envisager des mouvements d'abord compressifs puis distensifs.

- Une phase à dominance distensive:

En continuité apparente avec la précédente, elle a contribué à la surrection de la plupart des reliefs actuels.

- Une phase récente (Plio-Quaternaire) :

Elle s'est traduite par des mouvements, soit compressifs, soit distensifs.

* Les unités structurales : s'individualisent comme suit:

- La zone effondrée de Tlemcen,
- La zone synclinale de Terny,
- Le synclinal de Rhoraba,
- La zone effondrée de Sebdou,

Cette distribution en horsts et grabbens tend parfois à isoler les aquifères karstiques les uns des autres. Le style tectonique déterminera la caractéristique hydrogéologique majeure des Monts de Tlemcen : l'existence de nombreux compartiments mal interconnectés (M. Benest, 1981, 1982).

3.Hydrogéologie:Cette section mettra en évidence les principales caractéristiques hydrogéologiques propres à la zone étudiée. L'objectif est de différencier les différents aquifères en fonction de leurs caractéristiques lithologiques et de leur comportement hydrodynamique, notamment leur degré de perméabilité, qui influence directement la recharge des eaux souterraines dans l'ensemble du sous bassin.

3.1.Formations à fort potentiel aquifère : Ce sont les formations calcaréo-dolomitiques (dolomie de Tlemcen et de Terny), les formations gréseuses (grès de Merchiche) et les

formations du Plio-Quaternaire. Il s'agit d'ensembles lithologiques importants, tant en ce qui concerne leur structure géologique (épaisseur et répartition), mais ils ont pour caractère commun une capacité d'accumulation en eau élevée, surtout en ce qui concerne les massifs dolomitiques qui donnent naissance à de nombreuses émergences karstiques :

-Dolomies de Tlemcen et de Terny, avec les calcaires de Zarifet : elles affleurent en grande partie vers le Nord-Ouest et le Nord-Est du sous bassin.

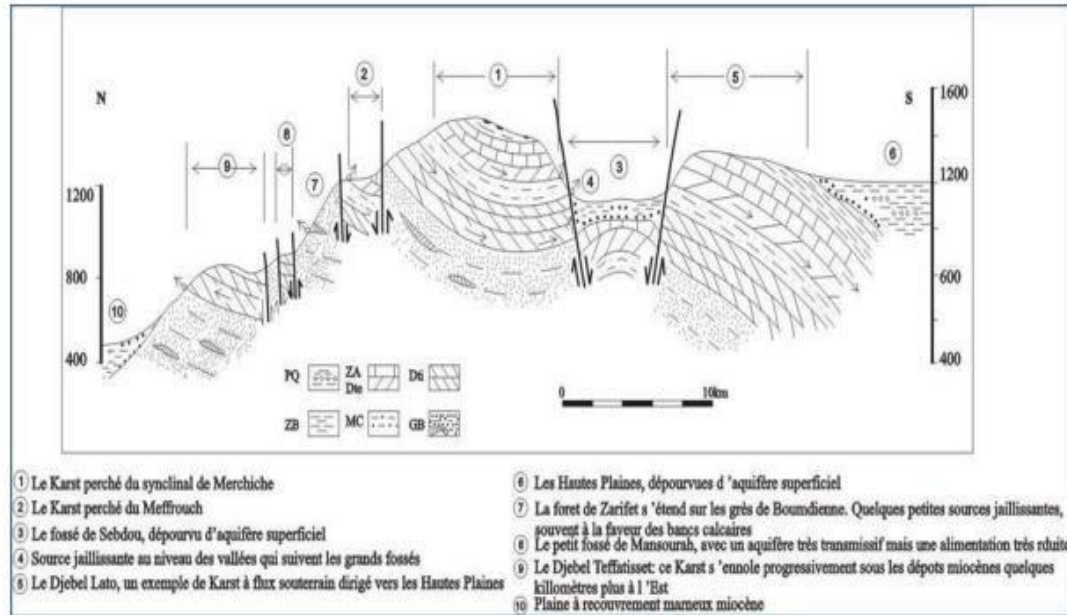
-Alluvions Plio-quaternaires : Nous considérons, aussi bien les alluvions récentes formées le long des Oueds que les terrasses, croûtes calcaires du Quaternaire ancien et les conglomérats qui comblent le fossé de Sebdu. Bien que leur épaisseur soit généralement faible, ces formations ont une extension spatiale considérable, ce qui favorise l'extension d'une nappe phréatique plus ou moins continue et facilement exploitable. Parmi les sources qui drainent ces formations, nous citons : Ain Soltane, Deillen, Sidi Aissa, Berdil, Hadjar.

3.2- Formations aquifères à faible potentiel : constituées d'un ensemble très diversifié de formations lithologiques, les séries argileuses ou marneuses les plus courantes occupant une position dominante. Il n'y a pas d'aquifères notables, car l'ensemble des formations en question présente une faible perméabilité interstitielle ou de fissures. Les grès ont généralement une perméabilité faible ou nulle, à l'exception des puissants bancs de grès qui s'enferment dans les roches, qui présentent une perméabilité accrue, en raison de leurs diaclases.

Marno-calcaires de Raouraï, Hariga et Ouled Mimoun : Ces formations montrent localement une certaine perméabilité horizontale dans les niveaux calcaires. Toutefois, elles sont globalement imperméables dans le sens vertical, ce qui limite leur contribution à la recharge des nappes.

Argiles de Lamoricière : Ce sont des formations massivement argileuses, ne présentent aucune réserve aquifère exploitable, en raison de leur imperméabilité quasi totale. L'étude des caractéristiques hydrogéologiques de ces unités permet ainsi de les classer parmi les terrains à faible potentiel aquifère.

Elles jouent un rôle essentiellement protecteur vis-à-vis des aquifères sous-jacents, et peuvent également servir de barrières hydrauliques naturelles. (BOUSSOUAR.A, KOURA.M LAGRAA, 2021).



Figure(21) : Coupe transversale aux Monts de Tlemcen (Collignon, 1986).

La carte de la figure (22) représente la densité des linéaments dans le sous bassin versant de Sebdu, avec une échelle de couleurs allant du vert (faible densité) au rouge (très forte densité).

- **Faibles et moyennes densités :** La majeure partie du sous bassin versant est caractérisée par des densités de linéaments faibles à moyennes (couleurs vertes et jaunes claires). Cela indique une présence généralisée de fractures et de discontinuités, mais sans concentration excessive sur de vastes étendues.

- **Zones de forte concentration :** Des zones de forte et très forte densité (couleurs orange et rouge) sont clairement identifiables. Ces zones sont particulièrement marquées :

- Dans la partie Sud-Ouest du bassin, où une concentration notable de linéaments rouges et oranges est visible. Dans la partie centre-Est du bassin, où l'on observe également des regroupements de linéaments de haute densité.

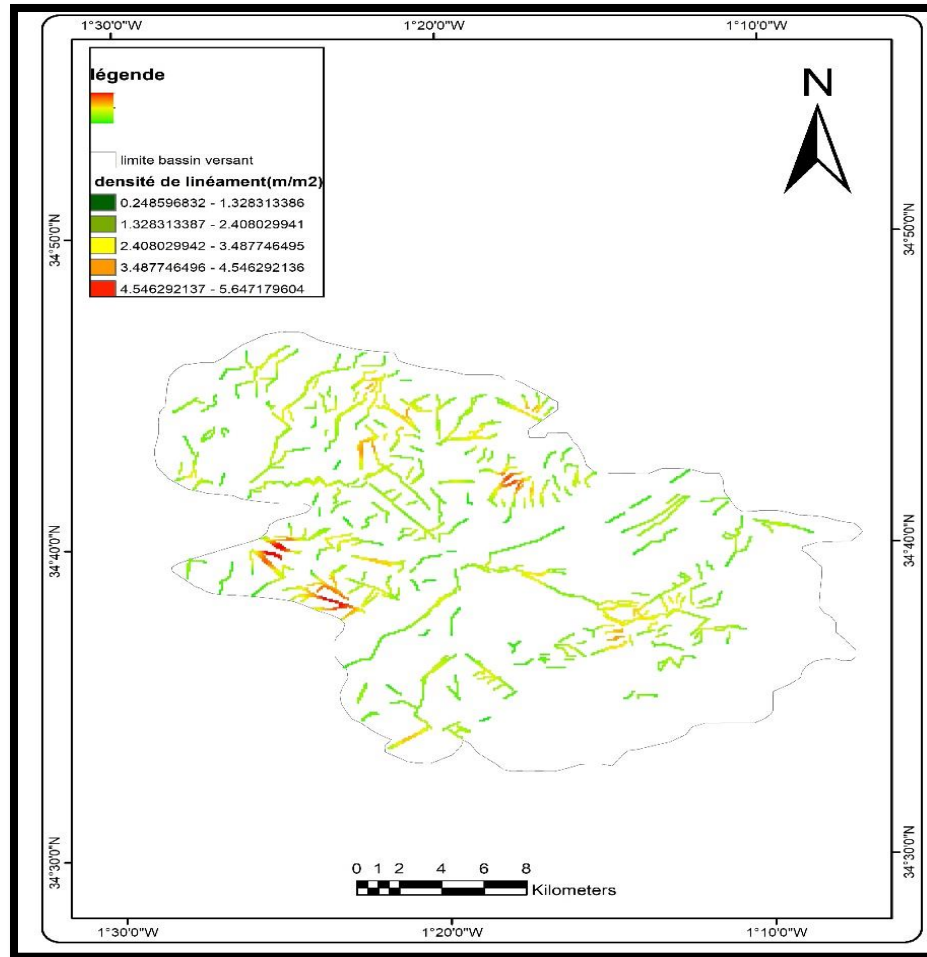
- Quelques autres petites zones isolées de forte densité sont réparties dans le reste du bassin.

La répartition non uniforme des linéaments suggère une hétérogénéité dans la structure géologique du bassin. Les zones de forte densité de linéaments pourraient indiquer :

- *La présence de zones de failles majeures ou de réseaux de fractures intenses.

- *Des zones de déformation tectonique plus importantes, où les contraintes ont généré un plus grand nombre de discontinuités.

- *Des changements lithologiques où certains types de roches sont plus fracturés que d'autres.



Figure(22) Carte de linéament reclassifié

La carte met en évidence des zones où l'activité tectonique ou la nature des roches a conduit à une densité élevée de linéaments, ce qui aide dans l'interprétation pour l'identification des zones de recharge.

4. Conclusion : En conclusion, l'analyse géologique et hydrogéologique du sous-bassin de Sebdoou révèle l'impact marqué des formations géologiques sur la dynamique des eaux superficielles et souterraines. La structure tectonique complexe, caractérisée par de multiples phases de déformation, ainsi que les caractéristiques lithologiques du terrain jouent un rôle clé dans le contrôle des flux hydrauliques. Une compréhension approfondie des interactions entre géologie et hydrogéologie est essentielle pour localiser les zones de recharge et pour une meilleure gestion des ressources hydriques.

CHAPITRE III :

APPLICATION DU SYSTÈME SIG POUR

L'ÉLABORATION DE LA CARTE DES

POTENTIALITÉS HYDRIQUES:

1. INTRODUCTION :

Le Système d'Information Géographique (SIG) constitue un instrument clé pour une gestion durable des ressources hydriques, particulièrement dans les zones touchées par le stress de l'eau, tel que le Nord-Ouest algérien. Ce dernier simplifie la collecte, l'analyse et l'affichage des données géospatiales pour améliorer la planification et le processus décisionnel. Le SIG, qui intègre des données liées à la géologie, à la topographie et au climat, offre la possibilité de repérer les zones menacées, d'évaluer les capacités de recharge des nappes phréatiques et de surveiller la qualité des ressources. En utilisant des techniques telles que la superposition, la pondération ou l'interpolation, il génère des cartes thématiques exactes pour guider la gestion de l'eau de manière scientifique (MHAWAJ et al., 2015).

2. Rôle du système SIG dans la protection et la gestion des potentialités hydriques

2.1. Application du système SIG en hydrologie:

Le Système d'Information Géographique (SIG) représente un instrument essentiel en hydrologie pour l'étude spatiale des éléments du cycle de l'eau. Le SIG, qui intègre des données provenant de la topographie, des stations météorologiques, des sols et de l'usage du sol, offre la possibilité de simuler le comportement hydrologique d'une région.

Il contribue notamment à la définition des bassins versants, l'évaluation des débits de ruissellement, l'estimation de l'infiltration ainsi que la cartographie des zones à risque comme les zones inondées ou celles sujettes à l'érosion (JHA, CHOWDARY et CHOWHURY, 2010).

Ces études sont essentielles pour organiser l'utilisation des ressources en eau de surface et prévoir les conséquences du changement climatique. Les SIG offrent aux décideurs des outils précis pour élaborer des stratégies d'adaptation basées sur des données concrètes et à jour (MACHIWAL, JHA, et MAL, 2011).

2.2. Application du système SIG en hydrogéologie:

Les SIG sont essentiels dans le domaine de l'hydrogéologie pour comprendre, gérer et préserver les ressources en eaux souterraines. Le SIG facilite la détection des aquifères, la simulation de l'écoulement souterrain et l'évaluation de la recharge naturelle des nappes, à travers l'analyse numérique des cartes géologiques, des données piézométriques, des tests de perméabilité et d'autres paramètres hydrogéologiques (TODD et MAYS, 2005).

De plus, il permet de localiser les zones de captage, d'évaluer leur vulnérabilité à la pollution et de suivre leur évolution dans le temps. Grâce aux modèles prédictifs, les décideurs peuvent prendre des décisions éclairées sur la préservation des zones de recharge et la gestion durable des ressources en eau souterraine, tout en tenant compte des impacts anthropiques (FITTS, 2013).

2.3. Méthodes d'évaluation des potentialités hydriques à l'aide des SIG:

Les potentialités hydrogéologiques reposent sur des méthodes d'analyse multicritères (AMC), qui permettent la combinaison, la pondération et la superposition de différents types de données environnementales et hydrogéologiques. La géologie, la perméabilité des formations, la pente, la pluviométrie, la texture des sols et l'occupation du sol constituent autant de critères pris en compte. Chaque facteur est standardisé et reclassé selon son influence sur la recharge des nappes phréatiques (Malczewski, 1999).

Une fois les critères hiérarchisés selon leur importance relative, une carte synthétique est élaborée, mettant en évidence les zones à potentiel de recharge élevé, moyen ou faible. Cette méthode permet aux autorités locales, aux gestionnaires de bassins et aux urbanistes de prendre des décisions éclairées, en identifiant les zones prioritaires à préserver ou à exploiter de manière raisonnée pour assurer une gestion durable des ressources en eau (Nas, Ekercin, Berktaş et Karabork, 2010).

3. Technique d'élaboration de la carte des potentialités hydriques :

Repose sur une méthodologie scientifique rigoureuse, combinant des données spatiales, environnementales et hydrogéologiques, intégrées à l'aide des outils des Systèmes d'Information

Géographique (SIG) et de la télédétection. L'objectif principal de cette carte est d'identifier les zones susceptibles de contribuer efficacement à la recharge des nappes phréatiques. Pour ce faire, plusieurs sources d'informations ont mobilisées : images satellitaires (Landsat 8, Sentinel-2), Modèles Numériques d'Élévation (MNE), ainsi que des données sur la géologie, le climat et l'occupation du sol. Ces données sont traitées à l'aide de logiciels spécialisés comme ArcGIS et QGIS, selon une démarche multicritère. Chaque facteur influençant la recharge (pluviométrie, pente, couverture végétale, perméabilité des sols, etc.) est standardisé et pondéré à l'aide de la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process). Le résultat final consiste en une carte synthétique mettant en évidence les zones à fort, moyen ou faible potentiel de recharge, fournissant ainsi un outil d'aide à la décision pour une gestion durable des ressources en eau. (Maachou et al. 2020).

3.1 Matériels utilisés et Données utilisées :

Ce travail est fait à l'aide des logiciels Qgis 3.36.2, ArcMap 10.8 et le programme Excel.

3.1.1 ArcMap 10.8

Est un composant central de la suite du logiciel ArcGIS Desktop, développé par ESRI (Environmental Systems Research Institute). Cette version représente l'une des dernières mises à jour majeures avant la transition vers ArcGIS Pro. ArcMap permet la visualisation, l'analyse, la gestion et la production cartographique de données géospatiales dans un environnement SIG puissant et professionnel. ArcMap 10.8 offre une interface conviviale pour manipuler des données raster et vectorielles, effectuer des traitements spatiaux avancés, générer des cartes thématiques précises et exécuter des analyses spatiales complexes (comme la modélisation hydrologique, l'analyse de terrain ou l'évaluation multicritère). Il prend en charge un large éventail de formats de données SIG (Shapefile, GeoTIFF, File Geodatabase, etc.) et permet d'intégrer des données provenant de sources diverses (imagerie satellite, bases de données spatiales, levés de terrain, etc.).

Dans le cadre de cette étude, ArcMap 10.8 a été utilisé pour la préparation, l'analyse et la superposition des différentes couches d'information spatiales, nécessaires à l'identification des zones potentielles de recharge des aquifères. Grâce à sa précision et à sa capacité à croiser des données complexes, ce logiciel a permis de produire des cartes thématiques pertinentes appuyées par des analyses multicritères.

3.1.2 QGIS

QGIS (Quantum GIS) est un outil open-source utilisé pour le traitement de données géospatiales. Ce logiciel propose une plateforme robuste, flexible et extensible pour l'analyse géographique. Dans cette recherche, il a été employé pour réaliser des analyses spécifiques comme l'interpolation des données climatiques et l'intégration de cartes thématiques. En complément d'ArcGIS, QGIS a facilité la réalisation de tâches d'analyse géospatiale supplémentaires grâce à ses fonctionnalités ouvertes et sa capacité à gérer divers formats de données géographiques (<https://www.qgis.org>).

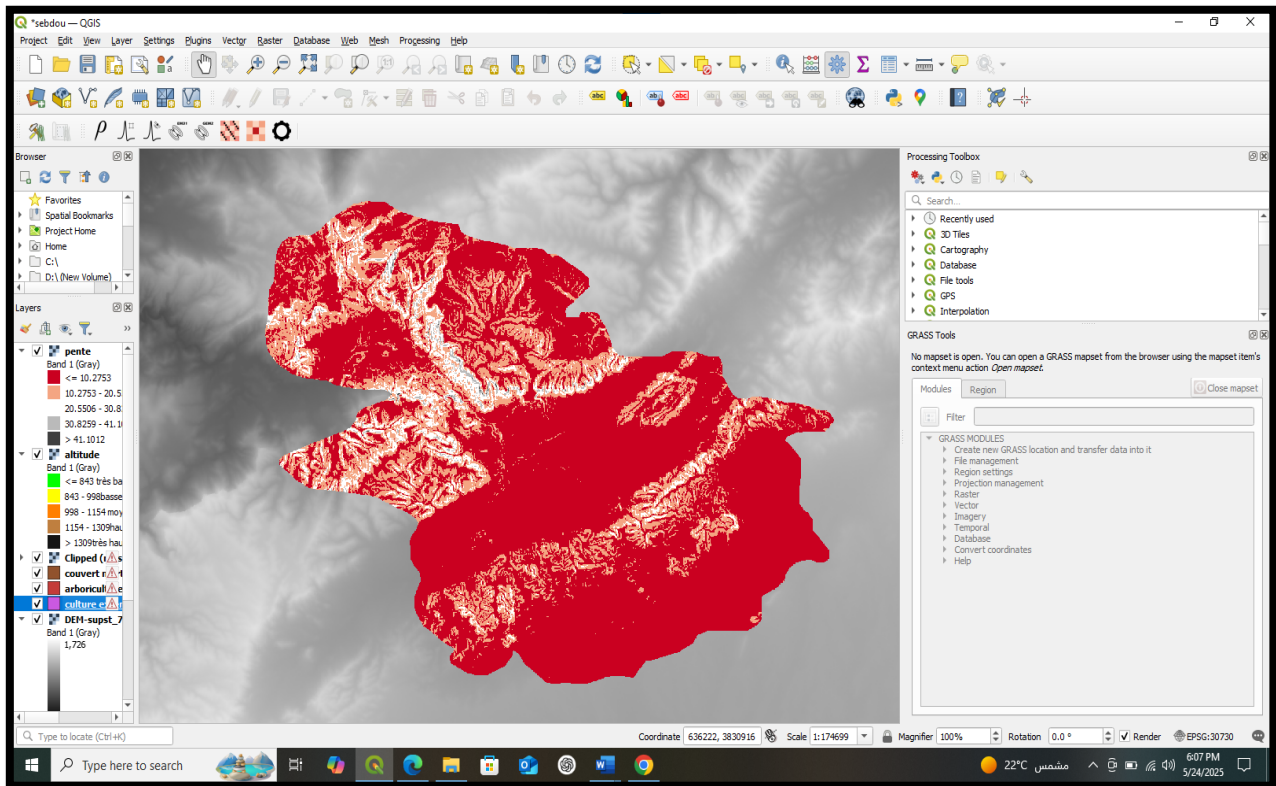


Figure (23) : Interface QGIS 3.36.2

3.1.3 Microsoft Excel

Pour ce qui est du traitement des données tabulaires, le logiciel Microsoft Excel a été utilisé. En effet, Microsoft propose que « Excel est un logiciel d'utilisation général qui peut

devenir un élément incontournable dans n'importe quel secteur d'activité ». Ce logiciel est généralement utilisé pour l'organisation et l'analyse des données quantitatives. Dans cette étude, ce programme est utilisé pour organiser et traiter les données climatiques, géologiques et hydrogéologiques, avant de les lancer dans le SIG. Cette analyse m'a ensuite aidé dans le processus d'analyse spatiale dans ArcGIS et QGIS.

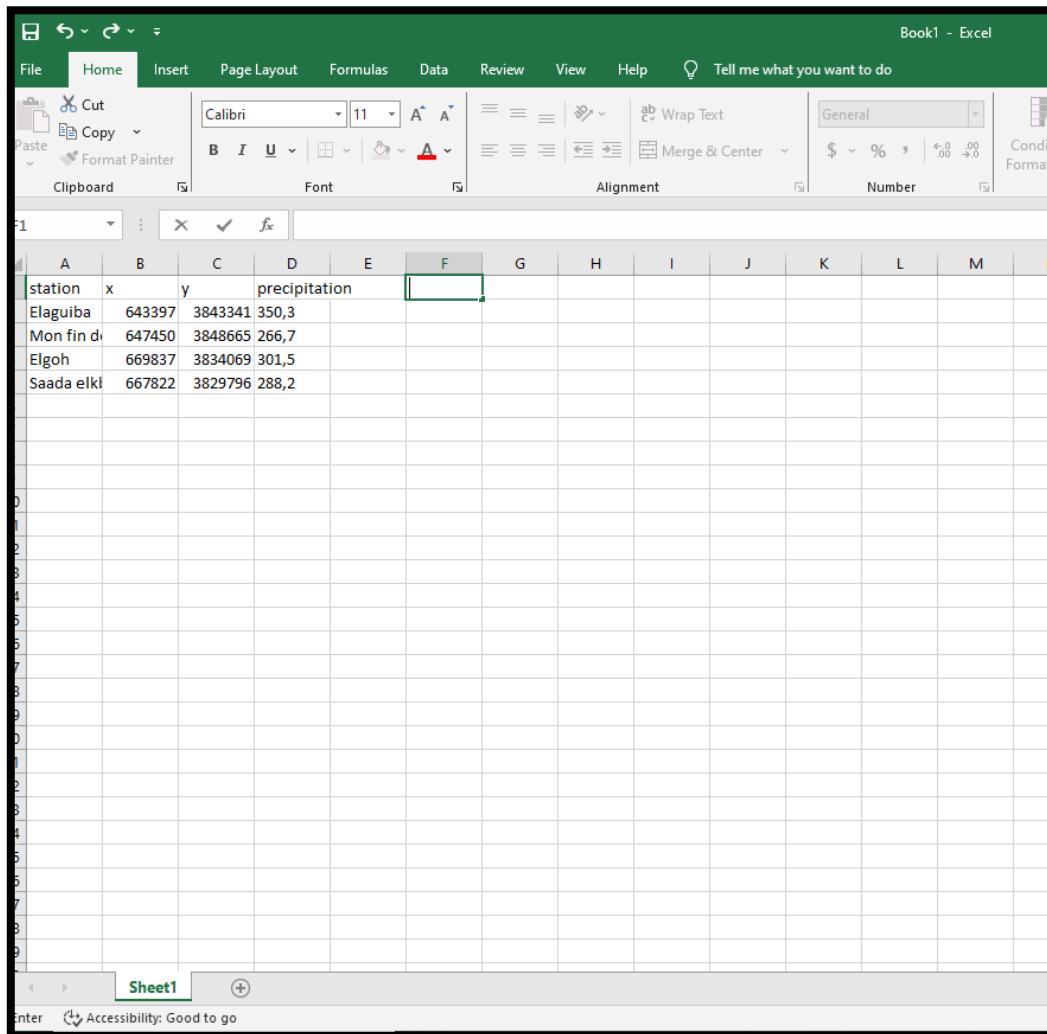


Figure (24) : Interface Excel

3.1.4 Données climatiques : Données sur les précipitations, température : Dans le cadre de ce mémoire, nous avons travaillé avec les données climatiques issues de la station de Sebdu. Les

données manquantes ont été complétées en les téléchargeant du site spécialisé en données climatiques : <https://www.climateengine.org>.

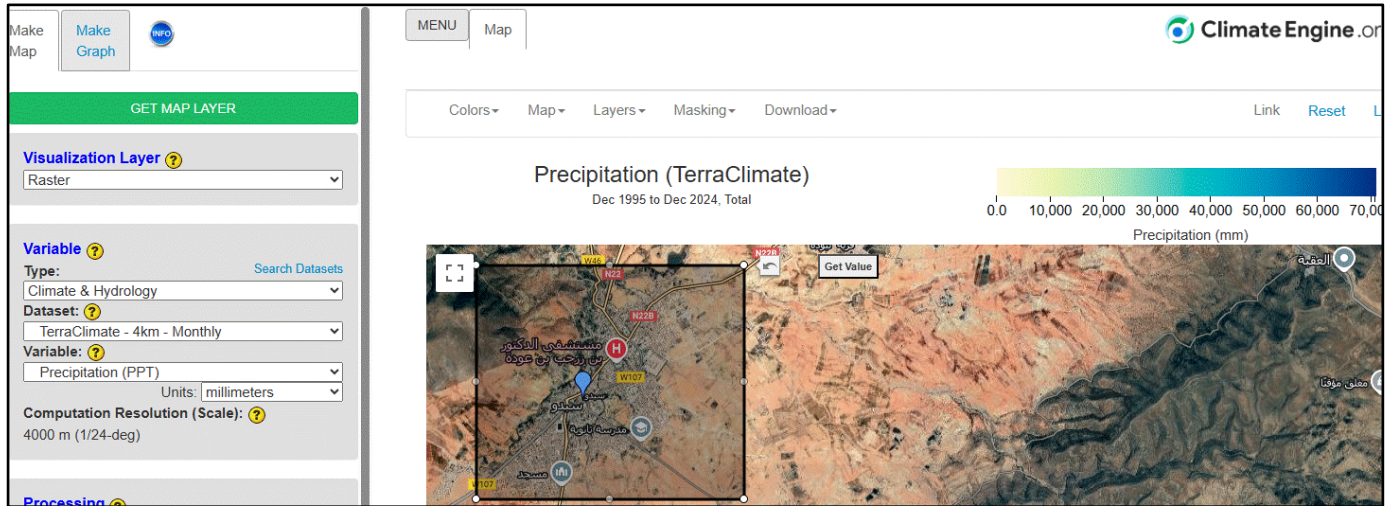


Figure (25) : Site de téléchargement des données climatiques «climateengine».

3.1.5 Délimitation du sous bassin versant de Sebdu :

À partir d'une carte établie par Mr Bouanani.A, les limites du bassin ont été tracées à l'aide du logiciel QGIS. Suite à l'intégration de la carte par le logiciel , un modèle polygonal a été créé pour délimiter manuellement les limites du bassin en fonction des reliefs et des caractéristiques topographiques observées sur la carte .Deux systèmes de coordonnées ont été utilisés afin de garantir une localisation précise et la compatibilité avec diverses données géographiques : le WGS 84 et le système Zone 30 du Sahara septentrional de 1959.

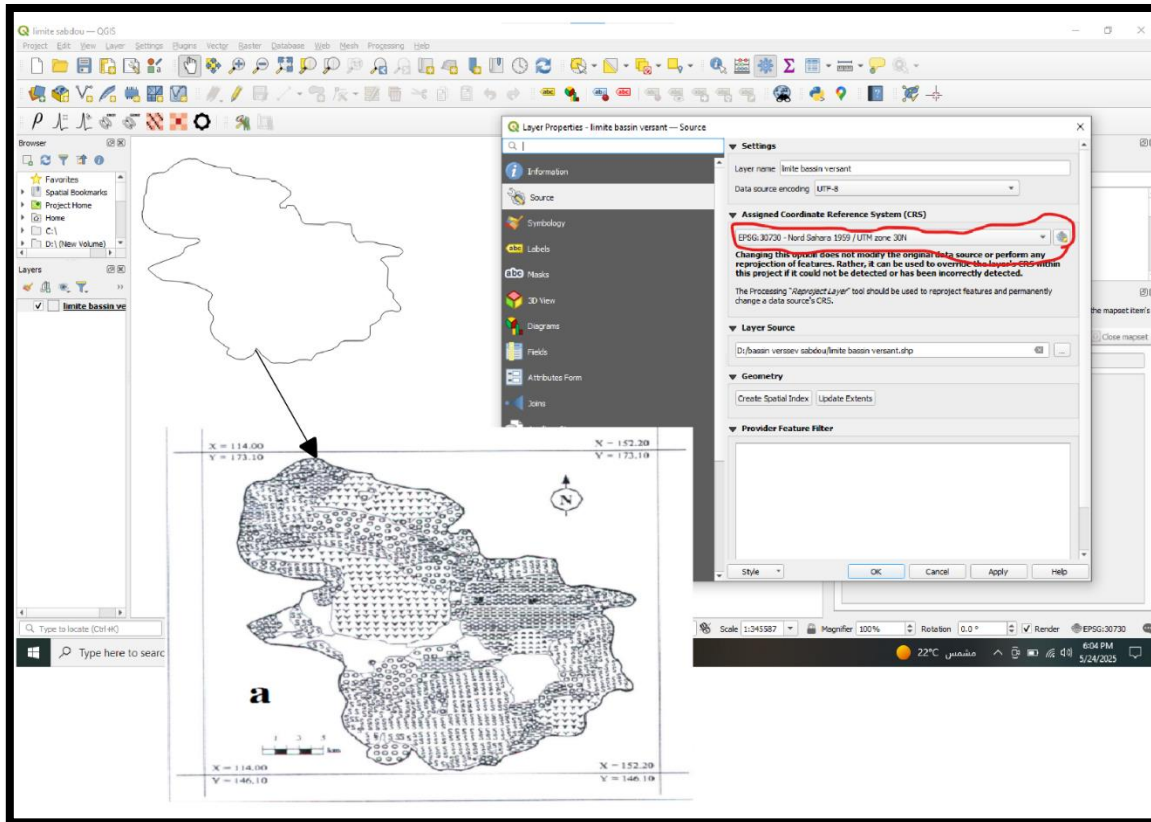


Figure (26) : Méthode utilisée pour la délimitation du sous bassin.

Les documents cartographiques utilisés sont des cartes de l'ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques 2008), couvrent les régions de Tlemcen figure (27), Telagh figure (28), Ghazaouet figure (29) Oran figure (30), à l'échelle 1/200 000.

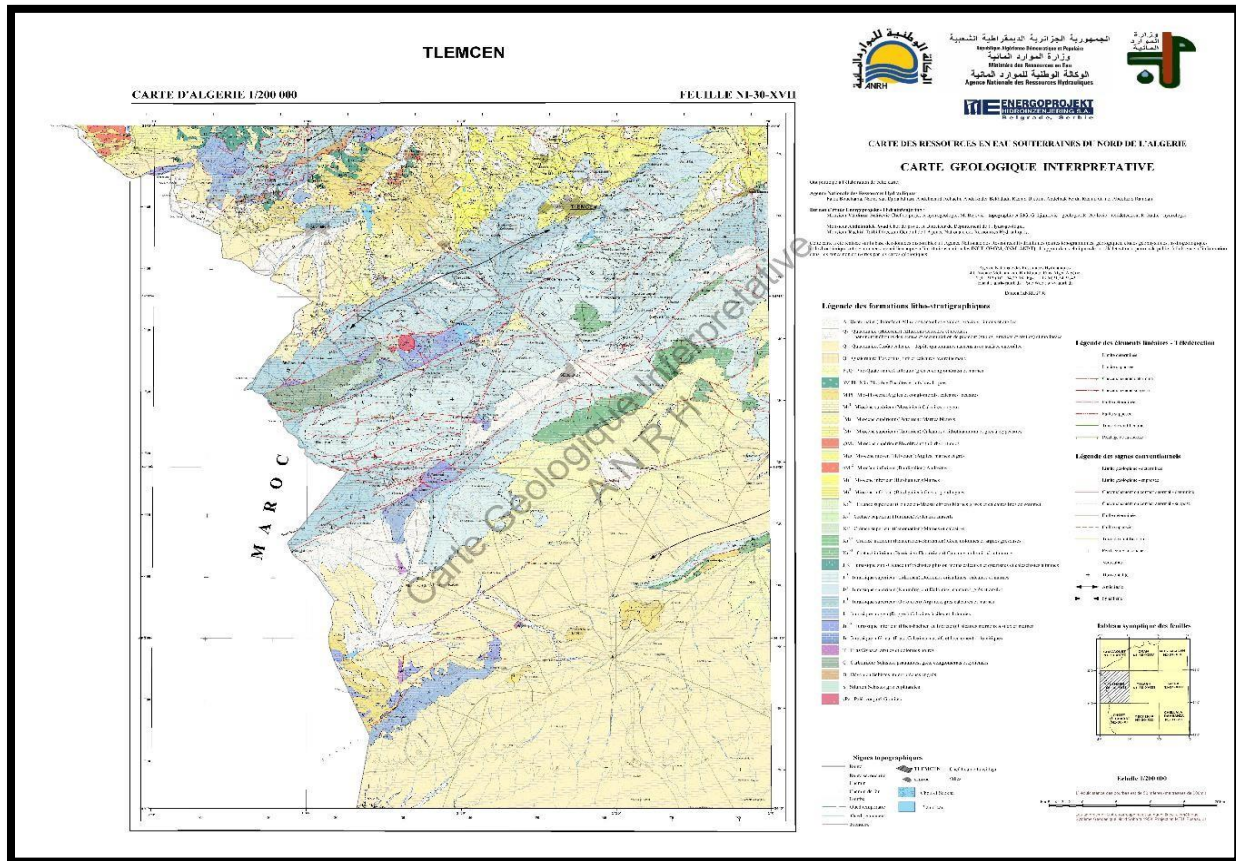


Figure (27) : Carte géologique de Tlemcen (ANRH 2008).

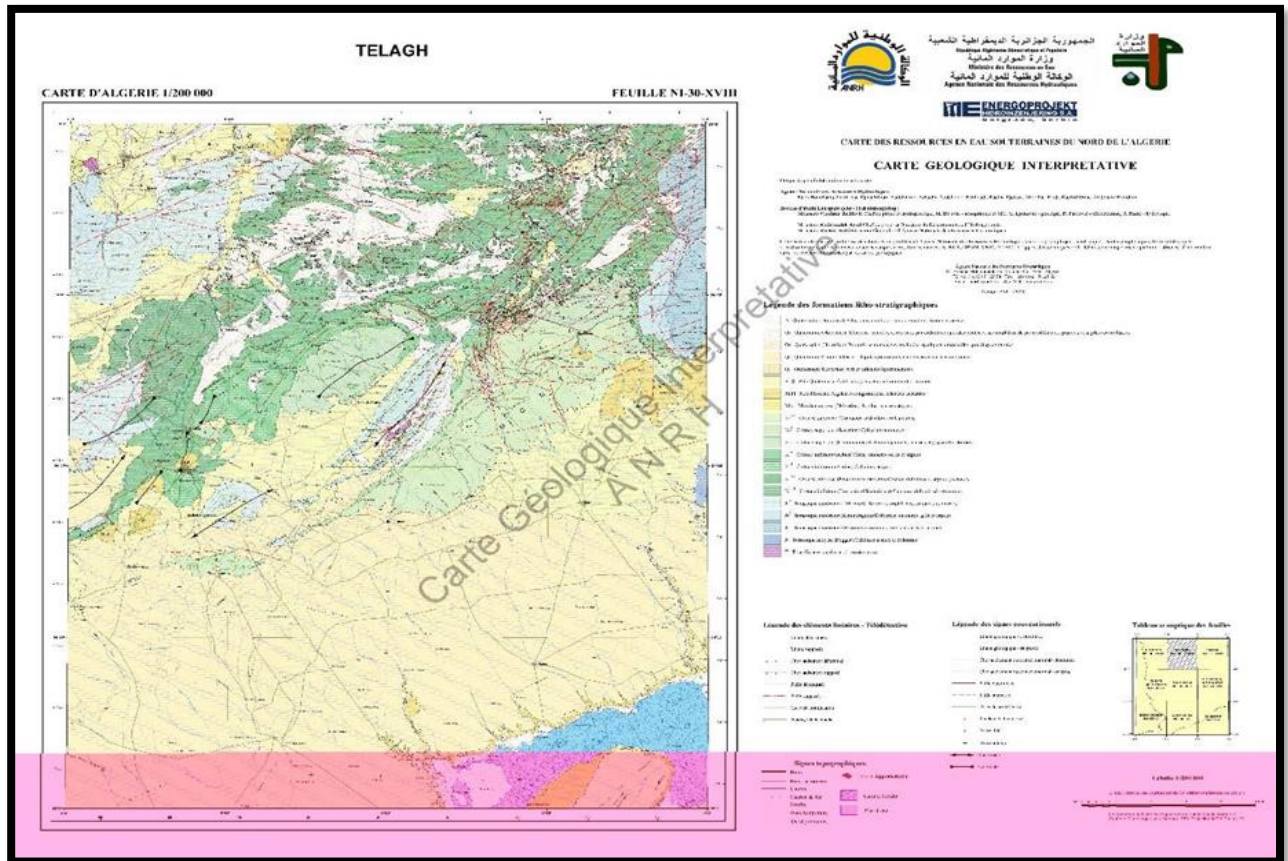


Figure (28) : Carte géologique de Telagh (ANRH 2008).

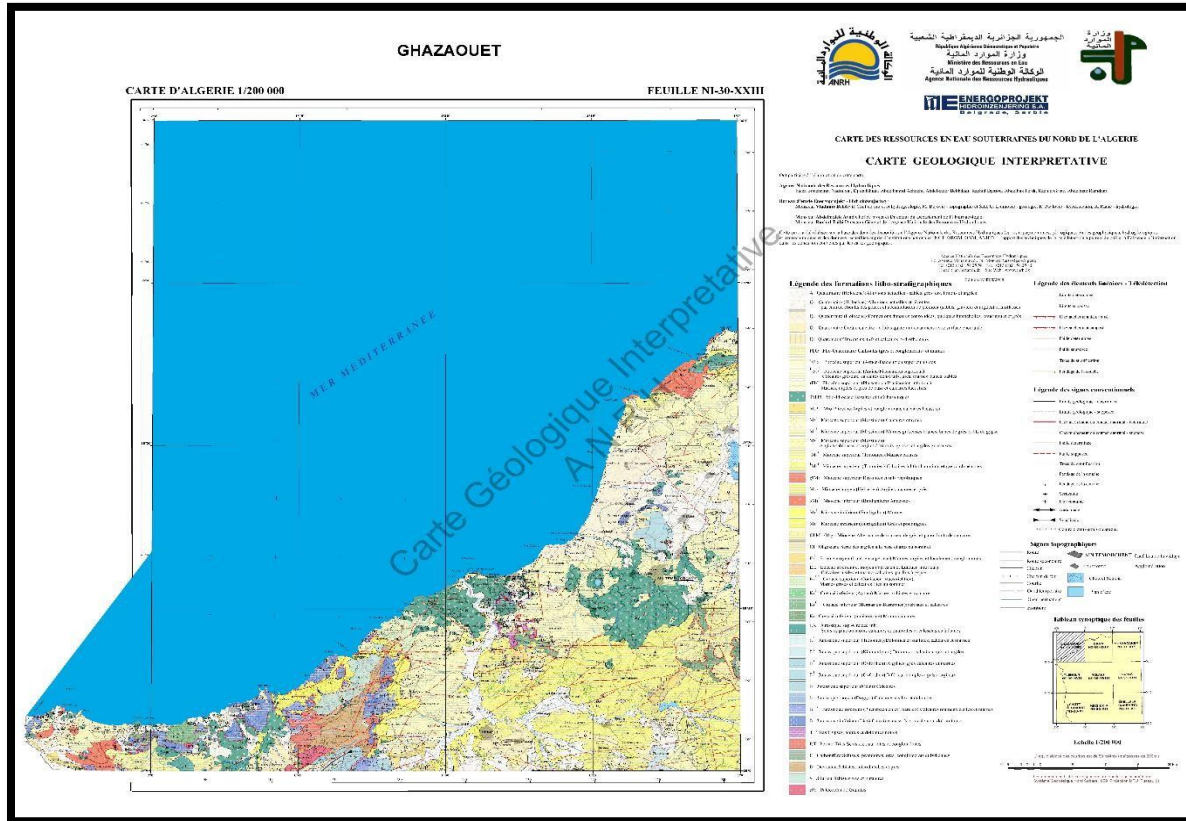


Figure (29) : Carte géologique de Ghazaouet (ANRH 2008).

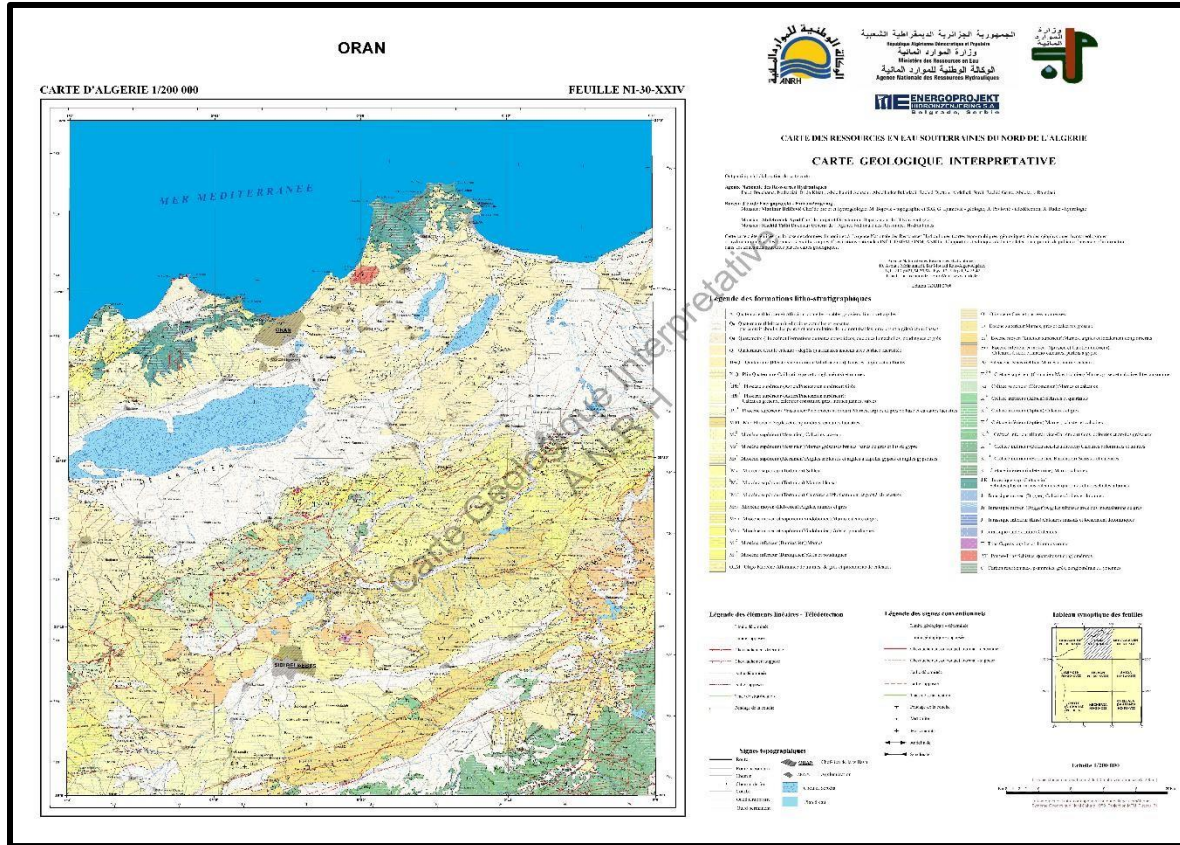


Figure (30) : Carte géologique d'Oran (ANRH 2008).

3.1.6 Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) :

Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) constitue une représentation numérique du relief d'une zone donnée, généralement sous forme d'une grille de points caractérisés par des valeurs d'altitude. Il permet l'analyse des caractéristiques topographiques, telles que la déclivité, l'azimut, la courbure, ainsi que l'altitude elle-même, correspondant à la hauteur par rapport au niveau de la mer. Le MNT est couramment utilisé dans les domaines de l'hydrologie, de l'aménagement du territoire et de la modélisation environnementale. Il sert notamment au calcul de la densité de drainage, un indicateur clé qui exprime le rapport entre la longueur du réseau

hydrographique et la superficie du bassin versant, permettant d'évaluer la capacité du sol à drainer les eaux. Dans cette étude, le MNT a été téléchargé à partir du site Earth Explorer (USGS), au format SRTM et avec une résolution spatiale de 30 mètres, afin de produire les cartes d'altitude, de pente et de densité de drainage.

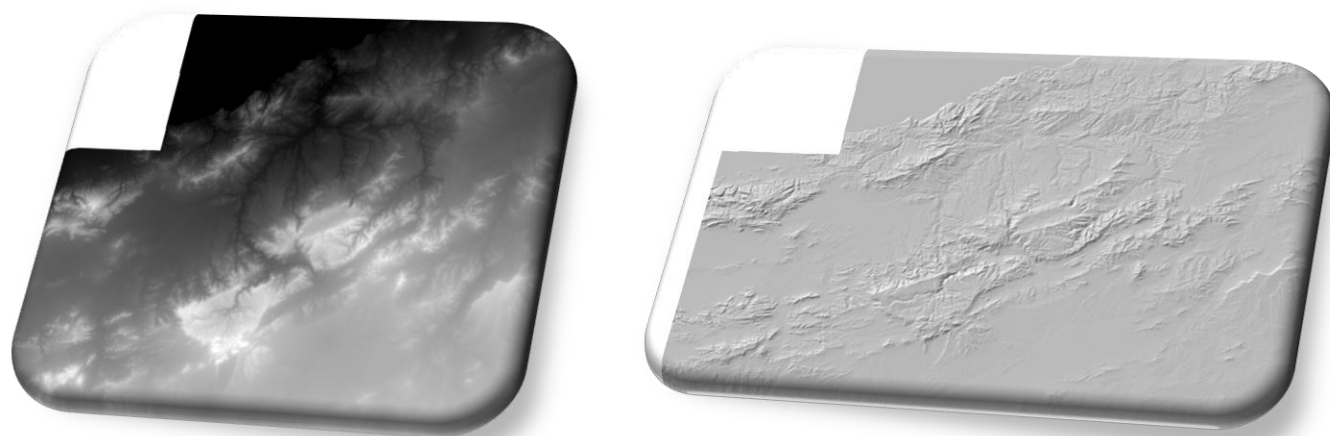


Figure (31) : Exemple des images satellitaires LANDSAT

3.2 Méthodologie :

La méthodologie utilisée dans cette étude repose sur l'analyse et l'intégration de données spatiales afin de déterminer les facteurs influençant le processus de recharge de la nappe phréatique dans le bassin de Sebdou. Dans un premier temps, chaque facteur a été examiné indépendamment pour évaluer son impact sur l'infiltration de l'eau dans les formations géologiques. La répartition spatiale de ces facteurs dans la zone d'étude a été représentée à l'aide de cartes thématiques. Une classification a ensuite été appliquée, attribuant à chaque paramètre un poids relatif reflétant son importance dans le processus de recharge (AL-Asfour, 2016).

L'approche adoptée est fondée sur une méthode d'évaluation multicritère (MCE), permettant d'attribuer des poids différenciés aux divers éléments selon leur influence sur l'infiltration. Le travail a été structuré en quatre étapes principales:

(1) La sélection des facteurs pertinents pour la recharge,

- (2) La production de cartes thématiques,
- (3) L'application de la méthode multicritère pour déterminer les poids relatifs,
- (4) L'identification des zones les plus favorables à la recharge des nappes.

Parmi les facteurs considérés dans l'analyse du sous bassin de Sebdo : la géologie locale, le système de failles, l'occupation des sols, l'altitude, la pente, le réseau de drainage et la répartition des précipitations. Ces données ont été cartographiées à partir de documents existants et de techniques de télédétection, puis analysées afin d'identifier les zones présentant un potentiel significatif de recharge des eaux souterraines.

3.3 Cartographie des paramètres et reclassification :

3.3.1. Géologie :

La carte lithologique du sous bassin versant de Sebdo a été élaborée à partir des cartes géologiques publiées par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH, 2008), couvrant les feuilles de Tlemcen, Oran, Ghazaouet et Telagh à l'échelle 1/200 000. Ces cartes ont été assemblées, harmonisées, puis numérisées à l'aide du logiciel QGIS, permettant une délimitation précise du sous bassin.

Cette étape a permis d'identifier trois principales unités lithologiques à l'intérieur du sous bassin:

- Le Quaternaire (Formations Alluviales Modernes).
- Le Miocène (Formations de type Marnes et grès).
- Le Jurassique (Formation calcaire).

Ces caractéristiques géologiques sont essentielles au fonctionnement hydrogéologique du bassin car elles impactent directement la capacité d'infiltration des eaux de surface, leur résistance à l'érosion et le potentiel de recharge de la nappe phréatique.

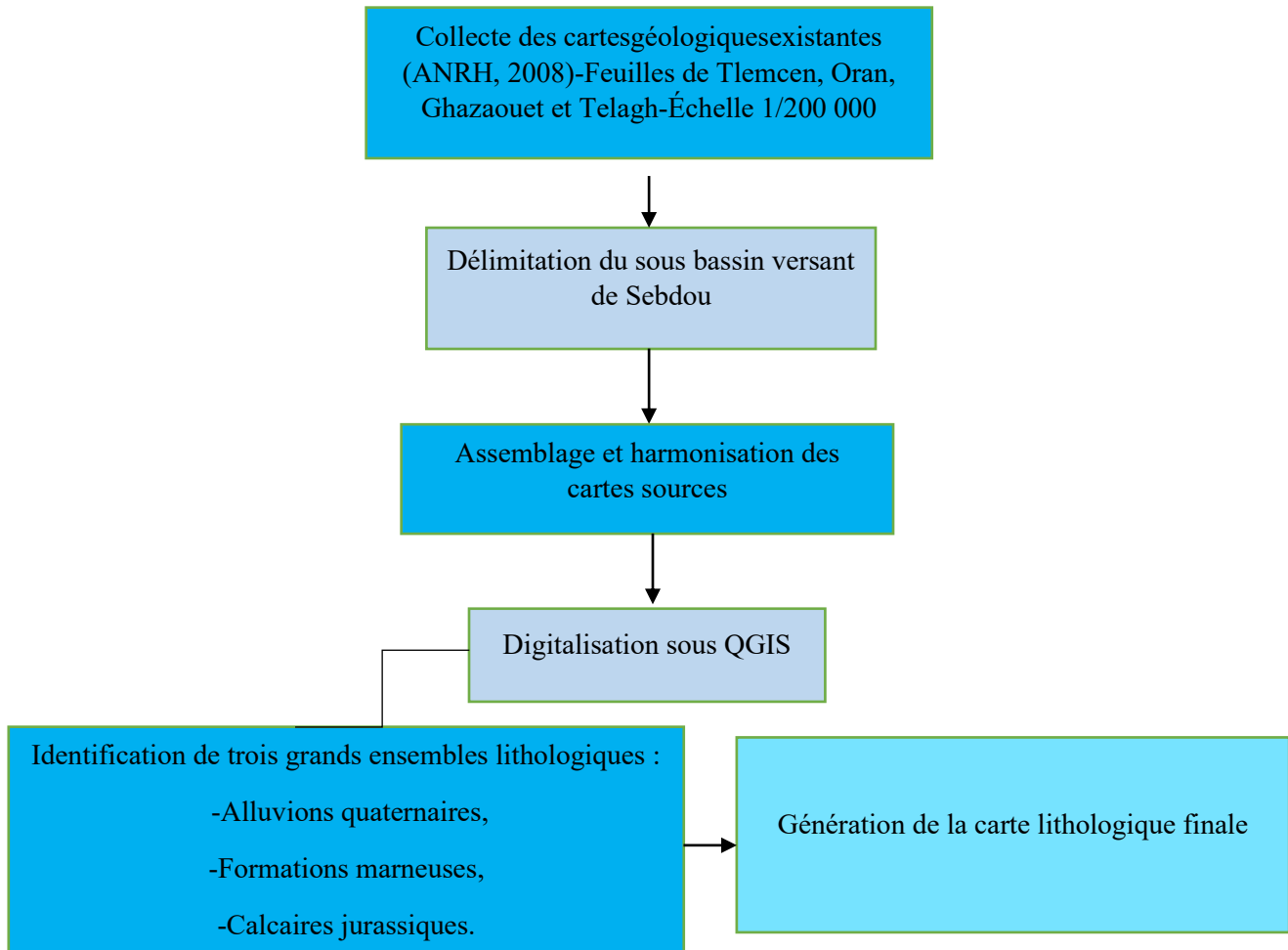


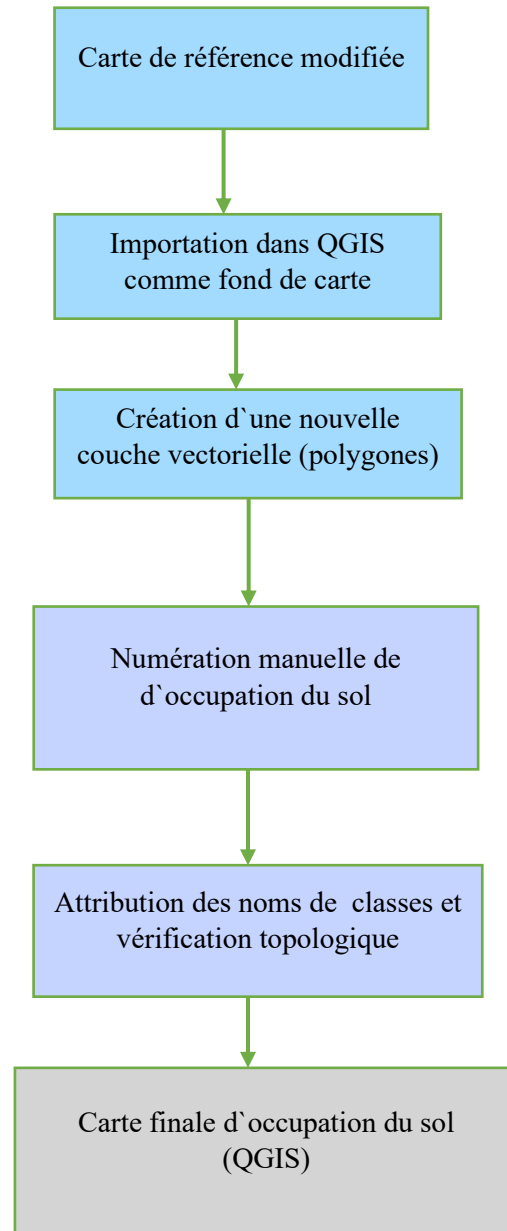
Figure (32):Schéma de la méthodologie de cartographie lithologique.

3.3.2. Occupation du sol :

La carte d'occupation du sol, modifiée à partir des données fournies par Mr Bouanani.A, a été élaborée afin de représenter avec précision les unités d'occupation, en fonction des spécificités de la zone d'étude. Le contenu de cette carte a été numérisé manuellement à l'aide du logiciel QGIS. Cette carte met en évidence une occupation du sol qui reflète en grande partie la structure naturelle de la région, ce qui contribue à une meilleure compréhension des interactions entre la surface terrestre et le cycle de l'eau.

La carte d'occupation du sol, créée pour la zone d'étude, montre une variété de types d'occupation. La classe dominante est constituée par le couvert forestier dégradé. Si l'arboriculture occupe une surface plus réduite, des zones de dépérissement sont également

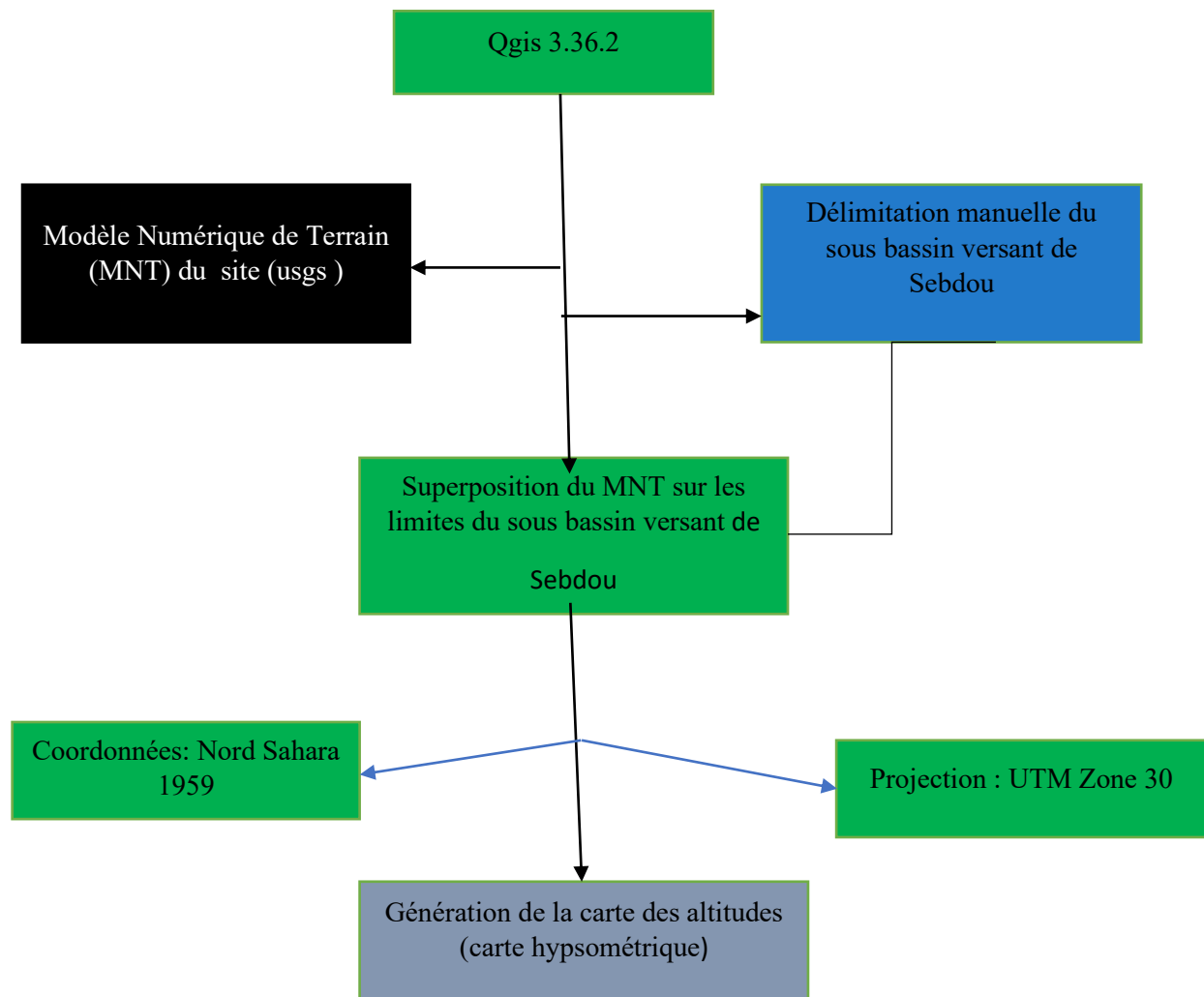
présentes. Afin de numérotter directement cette carte, une nouvelle couche vectorielle a été créée, dans laquelle les différentes unités d'occupation du sol ont été délimitées au niveau principal, à l'aide de polygones pour suivre précisément les contours. aux informations visibles sur la carte originale. L'ensemble a été réalisée nutilisant le système de coordonnées Nord Sahara de 1959 et la zone UTM 30. Cette méthode a permis de représenter l'occupation de sol précise et individuelle dans la zone d'étude.



Figure(33): Schéma du processus de création de la carte d'occupation du sol

3.3.3. Les altitudes :

La réalisation de la carte des altitudes repose sur l'utilisation d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT), permettant de représenter la topographie d'une région sous forme de données raster. Ces données ont été superposées aux limites du sous bassin versant Sebdou, et la projection a été effectuée en utilisant le système de coordonnées Nord Sahara 1959 / UTM Zone 30.



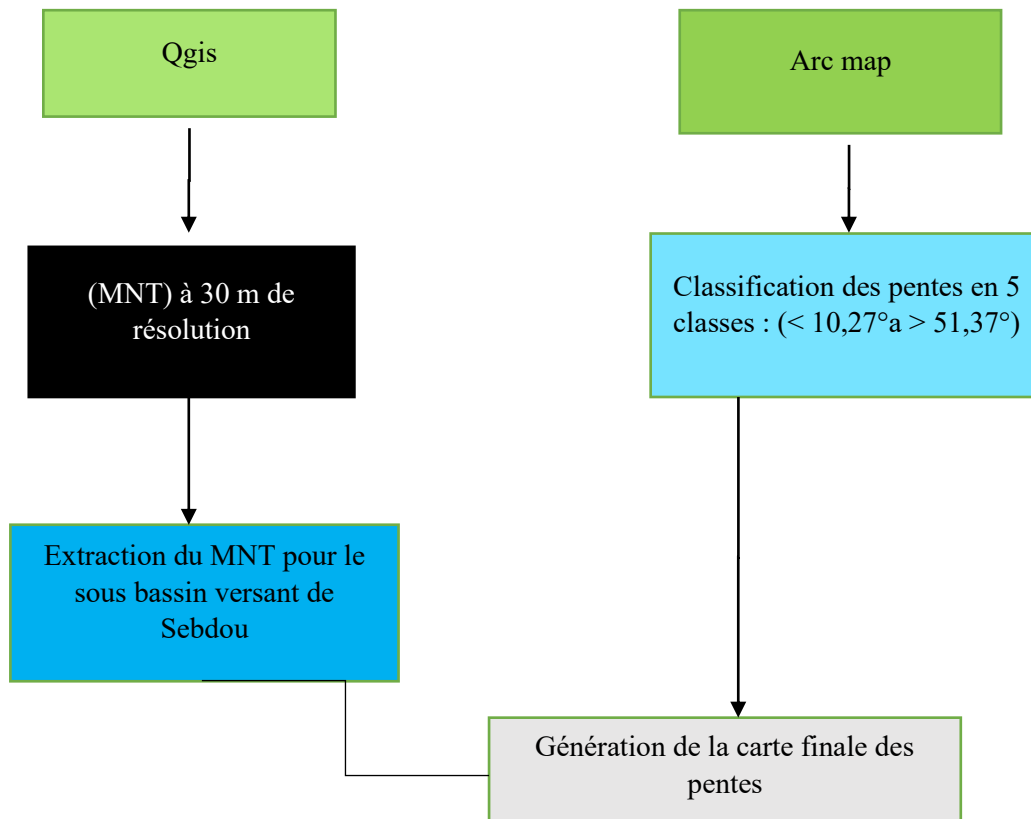
Figure(34):Schéma des étapes de création d'une carte des altitudes.

3.3.4. Les pentes :

Les pentes ont été extraites à l'aide du logiciel QGIS, à partir d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) avec une résolution spatiale de 30 mètres. L'analyse des valeurs de pente a été réalisée par la suite à l'aide du logiciel ArcMap 10.8. Ces pentes, exprimées en degrés, varient entre 0° et $51,37^{\circ}$, et ont été classées en cinq catégories :

- Faibles ($0^{\circ} - 10,27^{\circ}$),
- Modérées ($10,27^{\circ} - 20,55^{\circ}$),
- Moyennes ($20,55^{\circ} - 30,82^{\circ}$),
- Fortes ($30,82^{\circ} - 41,10^{\circ}$),
- Extrêmement fortes ($41,10^{\circ} - 51,37^{\circ}$).

Les résultats révèlent que la majorité du sous bassin présente des pentes modérément faibles, ce qui favorise l'infiltration des eaux de surface et, par conséquent, la recharge des nappes phréatiques. En revanche, les pentes supérieures à 25° , représentant environ 49 % de la superficie totale, se caractérisent par un phénomène d'érosion rapide. Cette dynamique limite l'infiltration, réduit la capacité de recharge et accentue les risques d'érosion des sols.



Figure(35):Schéma des étapes de création d'une carte des pentes.

3.3.5. Linéaments :

La carte des linéaments a été réalisée à l'aide des deux logiciels QGIS et ArcGIS, en se basant sur l'analyse du Modèle Numérique de Terrain (MNT) de la région de Sebdo. Un ombrage (Hillshade) a d'abord été généré sous QGIS afin de faire ressortir les contrastes topographiques. Des filtres directionnels sont ensuite appliqués pour accentuer les structures linéaires. Les linéaments ont été identifiés visuellement sur les images ombrées puis digitalisés manuellement sous forme de polygones. La couche obtenue a été exportée vers ArcGIS pour produire une carte de densité à l'aide de l'outil Kernel Density. Cette dernière a été classée en cinq classes de densité allant de 1.07 à 5.36 m/m², permettant de localiser les zones à forte concentration de linéaments, souvent associées à des failles ou fractures influençant l'écoulement souterrain.

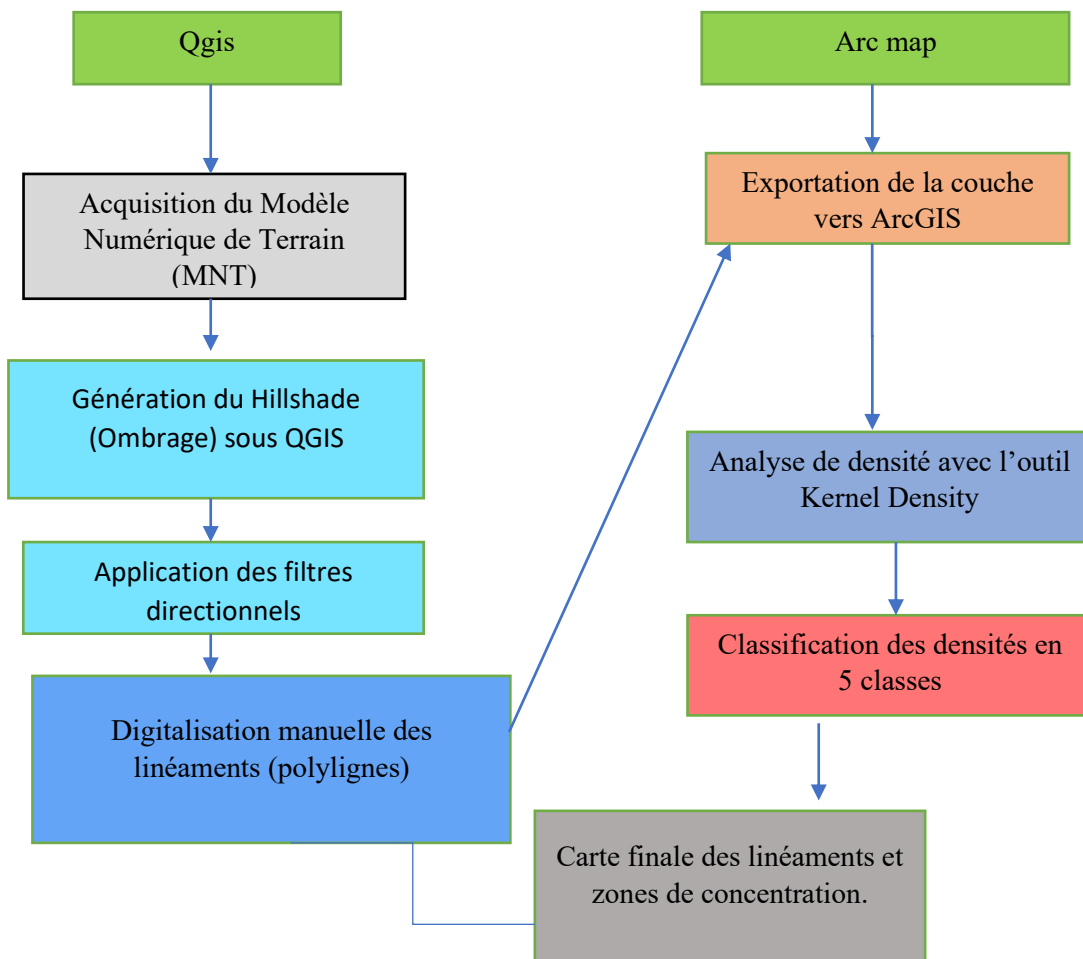


Figure (36) : Schéma des étapes de création de la carte des linéaments.

3.3.6. Densité de drainage : La carte des densités de drainage a été créée à partir du réseau hydrographique du sous bassin versant de l'Oued Seb dou, grâce du logiciel ArcGIS avec l'outil Kernel Density.

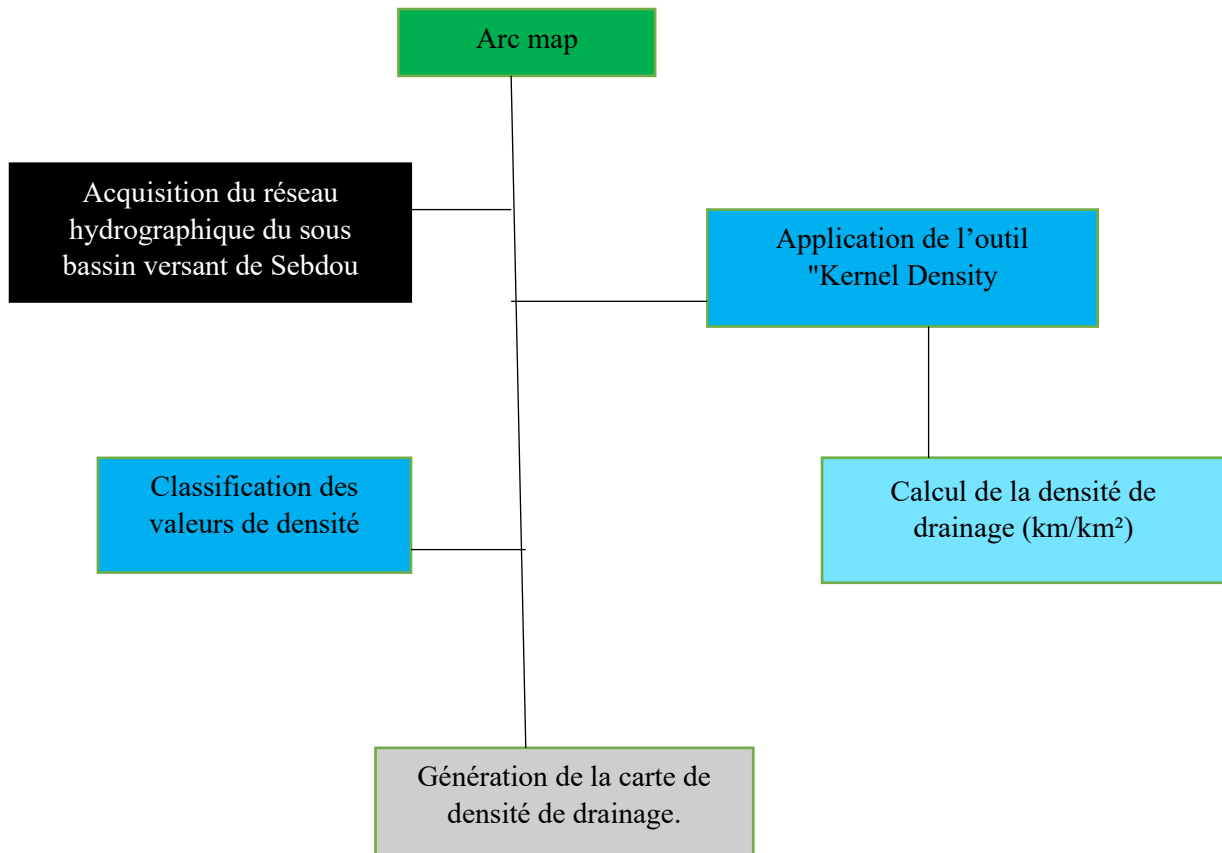


Figure (37) : Schéma des étapes de création de la carte de densité de drainage.

3.3.7. Précipitations :

Pour réaliser la carte des précipitations annuelles, nous avons commencé par collecter les données climatiques à partir de deux sources principales. D'abord, nous avons utilisé les données enregistrées par la station climatologique de Seb dou, puis nous avons complété les données manquantes en téléchargeant des informations climatiques en ligne, du site ClimateEngine. Les données obtenues sous forme de fichiers CSV ont ensuite été importées dans ArcGIS nous avons ajouté le fichier CSV dans la table des matières, puis utilisé l'outil "Display XY Data" pour afficher les points sur la carte, à partir des coordonnées géographiques (latitude et longitude).

Une fois les points affichés, nous avons défini un système de projection adapté à notre zone d'étude, en l'occurrence la projection Nord Sahara 1959/ UTM zone 30. Ensuite, pour représenter la répartition spatiale des précipitations, nous avons procédé à une interpolation en accédant à l'outil "Spatial Analyst Tools > Interpolation. Après génération de la couche interpolée, nous avons appliqué une symbologie graduée en couleurs, allant du bleu clair au bleu foncé pour illustrer les différentes intensités de précipitations. Enfin, nous avons utilisé l'outil "Extract by Mask" pour découper notre carte interpolée selon les limites précises de notre zone d'étude (sous bassin versant de Sebdu).

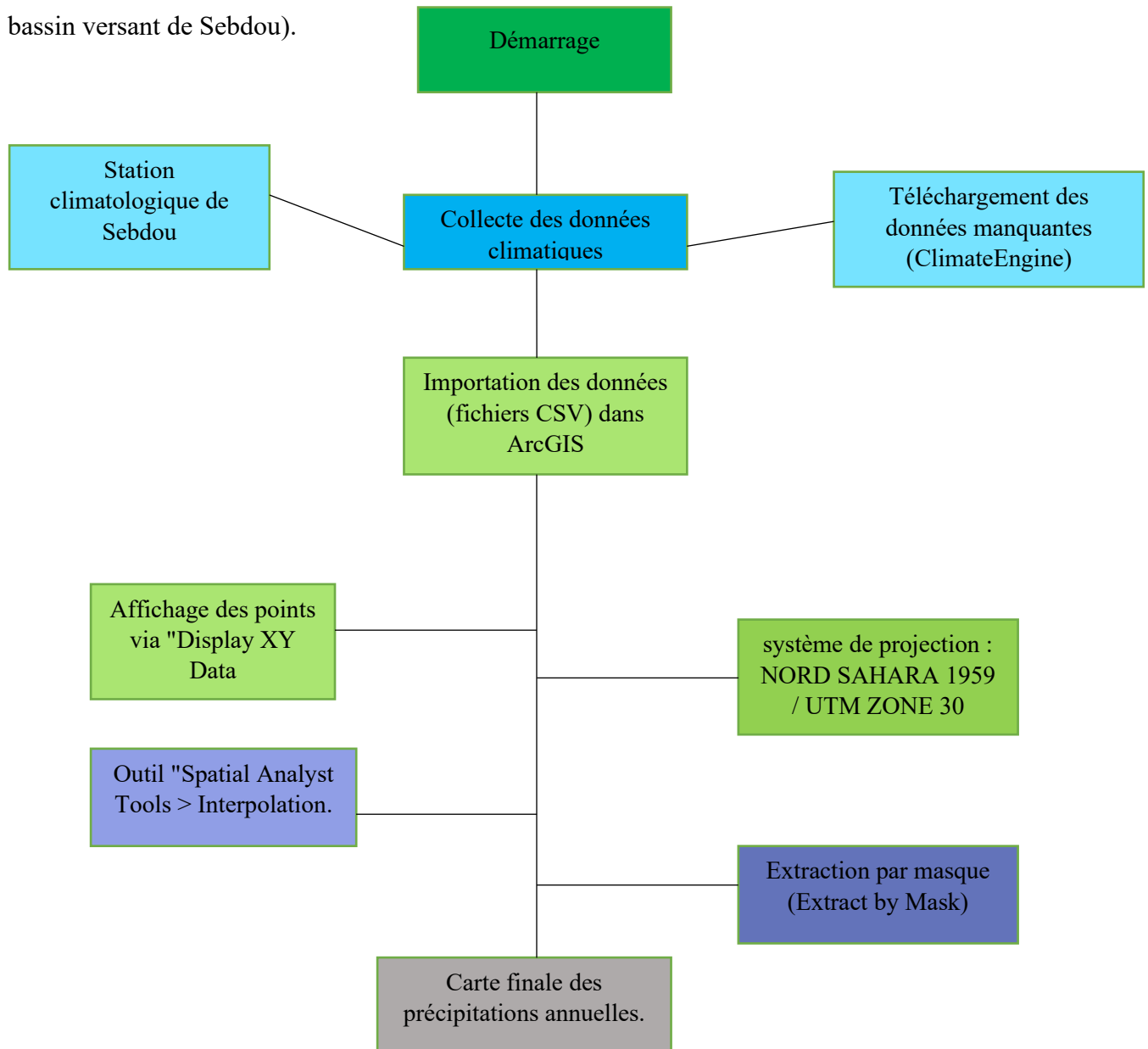


Figure (38) : Schéma des étapes de création de la carte des précipitations.

4. Analyse multicritère:

L'analyse multicritère (AMC), également utilisée pour évaluer la recharge des nappes phréatiques est une technique efficace pour traiter des problèmes géoscientifiques complexes. Cette méthode permet de combiner et d'analyser un certain nombre de facteurs environnementaux et géologiques dans le contexte du sous-bassin de Sebdou, afin de mieux comprendre la dynamique d'infiltration et de recharge des nappes souterraines. L'utilisation de logiciels SIG (Système d'Information Géographique) tels que QGIS et ArcGIS permet de superposer et d'intégrer diverses couches de données spatiales (cartes et modèles numériques), offrant ainsi une vue d'ensemble détaillée et précise de la zone d'étude.

4.1. Critères géologiques: La géologie joue un rôle déterminant dans la capacité d'infiltration de l'eau. Les roches perméables, telles que les calcaires et les grès, facilitent l'infiltration vers les couches profondes, contribuant ainsi à la recharge des nappes phréatiques. À l'inverse, les formations imperméables comme les schistes et les argiles limitent fortement cette infiltration. L'identification des zones favorables à la recharge devient possible grâce à l'analyse croisée de cartes géologiques et d'autres données spatiales, ces éléments jouent un rôle clé dans l'orientation des écoulements souterrains. Enfin, des facteurs tels que la compacité des affleurements rocheux, l'altitude ou encore la présence de fractures et de diaclases influencent également la capacité d'infiltration des formations géologiques (Krishnamurthy, 1996 ; 2000 ; Bhuiyan et al., 2009).

4.2. Occupation du sol: L'occupation du sol joue un rôle déterminant dans la gestion de l'eau. Dans le sous-bassin d'Oued Sebdou, les zones urbaines, agricoles, forestières ou naturelle sont des comportements hydrologiques différents. Par exemple, les surfaces imperméables liées à l'urbanisation (routes, bâtiments, etc.) limitent l'infiltration de l'eau, favorisant le ruissellement. À l'inverse, les zones végétalisées, comme les forêts ou les prairies, offrent une plus grande capacité d'infiltration. L'analyse des cartes d'occupation du sol permet de repérer les zones avec une couverture végétale dense qui favorisent l'infiltration de l'eau, et celles où les activités humaines créent une barrière à cette infiltration.

4.3. Pente et altitude: La topographie, notamment la pente du terrain et l'altitude, influence directement les processus d'écoulement de l'eau. Les pentes fortes favorisent le ruissellement et réduisent l'infiltration de l'eau dans le sol. En revanche, les zones de faible pente et les dépressions topographiques peuvent favoriser l'accumulation de l'eau, augmentant ainsi les possibilités de recharge des nappes phréatiques. L'analyse des cartes topographiques, combinée avec un modèle numérique de terrain (MNT), permet de cartographier les zones de forte pente (généralement moins propices à la recharge) et les zones de faible pente (plus favorables à l'infiltration).

4.4. Densité de drainage : Le rapport entre la longueur totale des cours d'eau d'un bassin et sa surface est appelé densité de drainage (RAMBERT, 1973). Les zones à forte densité de drainage sont fréquemment celles où les eaux de surface s'écoulent rapidement vers certaines nappes phréatiques ou aquifères.

4.5. Densité Linéaments : L'évaluation de la densité des fractures, fondée sur la longueur totale ou le nombre de fractures par unité de surface, reflète le degré de fracturation des roches. Ces structures géologiques incluant fissures et cassures dans la croûte terrestre constituent souvent des voies préférentielles pour la circulation des eaux souterraines. Des recherches récentes sur les formations carbonatées ont montré que ces fractures augmentent significativement la perméabilité, facilitant ainsi le passage de l'eau à travers des roches initialement peu perméables. La cartographie des linéaments et des réseaux de drainage permet d'identifier les zones à écoulement rapide ainsi que celles où l'eau reste confinée.

4.6. Précipitations: La répartition des précipitations doit être examinée avec une attention particulière dans l'analyse de la recharge des nappes phréatiques. Les régions bénéficiant de fortes précipitations disposent généralement d'un apport direct en eau, bien que cet apport puisse être modifié par plusieurs facteurs, tels que la pente du terrain, la nature de la couverture végétale ou encore les caractéristiques géologiques. L'exploitation des données pluviométriques, notamment à travers les cartes spécifiques, permet d'identifier les zones où la fréquence de recharge est élevée, ainsi que celles où les pertes d'eau par évaporation ou érosion sont plus probables.

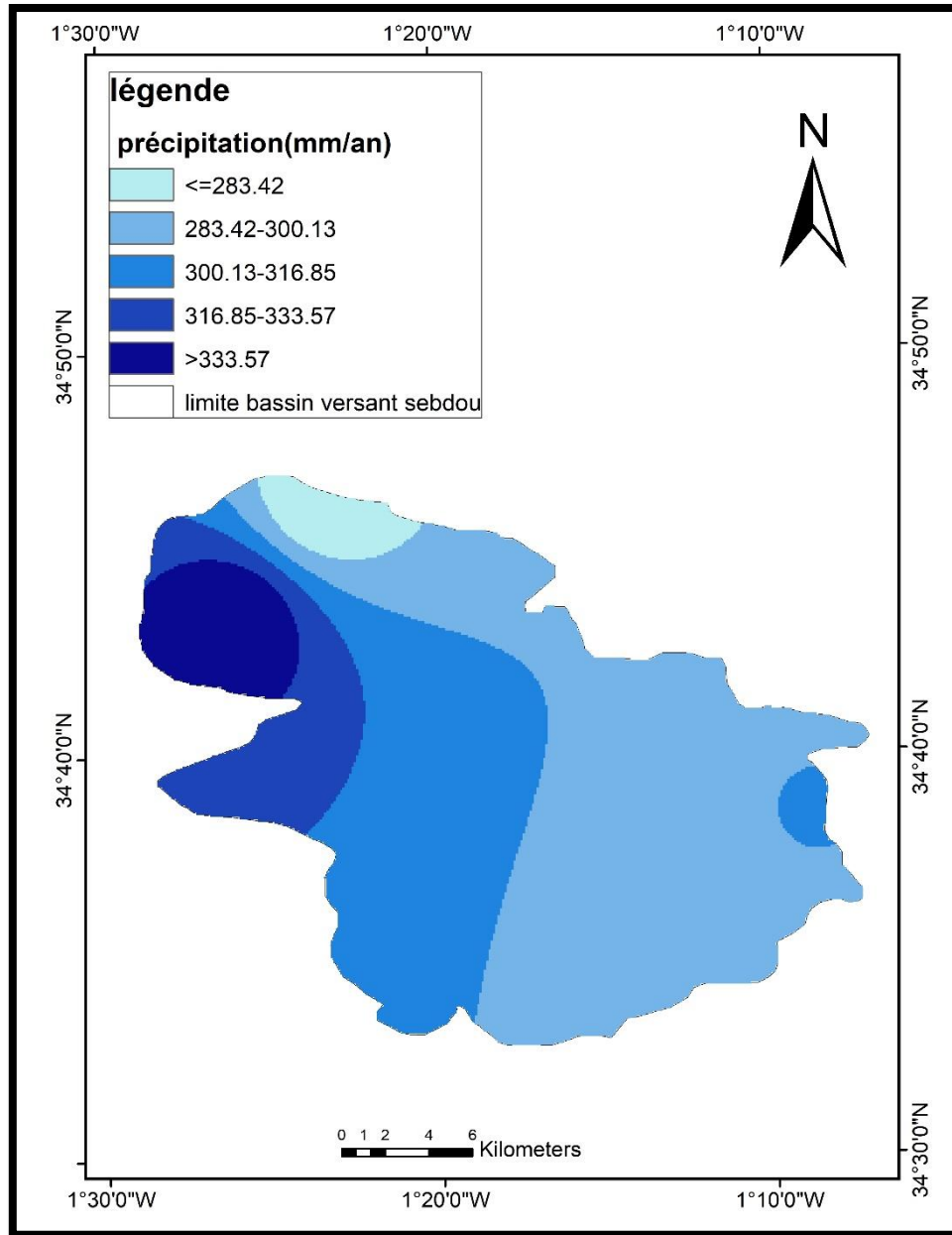


Figure (39) : Carte des précipitations.

4.a) Reclassification des paramètres :

À partir du tableau ci-dessous, les facteurs influençant la recharge des eaux souterraines ont été classés selon leur capacité à favoriser ou à limiter l'infiltration. Une valeur numérique, allant de 1 à 5, a été attribuée à chaque classe en fonction de son degré d'influence. La méthode AHP (Analyse Hiérarchique des Processus) a ensuite été appliquée afin de hiérarchiser les facteurs et

de déterminer leur pondération relative, assurant ainsi une évaluation rigoureuse dans le processus d'élaboration de la carte des potentiels de recharge.

TABLEAU 20 : LES CRITÈRES ET PONDÉRATION DU MODULE FINAL

Facteurs	Les classes	Poids	Justification	Note	Influence
La géologie	Jurassique	20	Facteur importante sur la perméabilité et la structure des aquifères.	5	20.00
	Miocène			1	4.00
	Quaternaire			4	16.00
Densité de drainage	0-1.07	5	Rôle secondaire dans la modulation des écoulements de surface.	1	1.00
	1.07-2.14			2	2.00
	2.14-3.21			3	3.00
	3.21-4.29			4	4.00
	4.29-5.36			5	5.00
Altitude	673-831.8	20	Rôle important sur les variations de gradients hydrauliques et les zone de recharge	5	20.00
	831.8-990.6			4	16.00
	990.6-1149.4			3	12.00
	1149.4-1308.2			2	8.00
	1308.2-1467			1	4.00
Pente	0-10.2	20	Paramètre essentiel influençant la répartition entre infiltration et l'écoulement de surface	5	20.00
	10.2-20.5			4	16.00
	20.5-30.8			3	12.00
	30.8-41.1			2	8.00
	41.1-51.3			1	4.00
Densité de linéament	0-1.07	5	Repère complémentaire des structures fracturées à potentiel d'infiltration.	1	1.00
	1.07-2.14			2	2.00
	2.14-3.21			3	3.00
	3.21-4.29			4	4.00
	4.29-5.36			5	5.00
Occupation du sol	Couvert forestier normal	10	Impact modéré sur le processus d'infiltration et l'évapotranspiration	1	2.00
	Couvert forestier degrade			2	4.00
	Prairies et terrains de pacage			4	8.00
	Cultures extensives			3	6.00
	Arboriculture			3	6.00
Couvert mort	5	10.00			
Précipitation	266.7-283.4	20	Principale apport en eau aux réservoirs souterrains.	1	4.00
	283.4-300.1			2	8.00
	300.1-316.8			3	12.00
	316.8-333.5			4	16.00
	333.5-350.2			5	20.00

4.b) Superposition et pondération des critères :

Lors du traitement des différentes couches géographiques dans un environnement SIG (QGIS ou ArcGIS), la méthode de hiérarchie analytique (AHP), développée par Saaty en 1980, a été utilisée pour déterminer les poids relatifs des facteurs influençant la recharge des

nappes phréatiques. Cette méthode repose sur des comparaisons par paires entre les critères, permettant d'évaluer leur importance relative à l'aide d'une échelle allant de 1 (importance égale) à 5 (importance extrêmement forte). Elle permet ainsi de calculer des poids quantitatifs reflétant la contribution de chaque paramètre (tels que la géologie, la pente ou l'occupation du sol) au processus d'infiltration de l'eau. Ces poids sont ensuite intégrés de manière structurée pour générer une carte synthétique identifiant les zones les plus favorables à la recharge des eaux souterraines, tout en tenant compte des facteurs naturels ainsi que des pressions anthropiques susceptibles d'affecter l'infiltration.

L'influence d'une classe spécifique est calculée selon la formule suivante :

$$\textbf{Influence} = (\textbf{Note de la classe} / \textbf{Note maximale possible}) \times \textbf{Poids du facteur}$$

Où :

- La note de la classe est l'évaluation de 1 à 5
- La note maximale possible est 5
- Le poids du facteur est exprimé en pourcentage (%).

D'après le tableau des pondérations, on peut créer une carte de potentiel de recharge avec le logiciel ARC GIS en utilisant l'outil (Weighted Overlay) tableau (20), en utilisant l'équation d'indice de recharge:

$$\textbf{IR (Indice de recharge)} = \sum \textbf{influence de la classe considérée.}$$

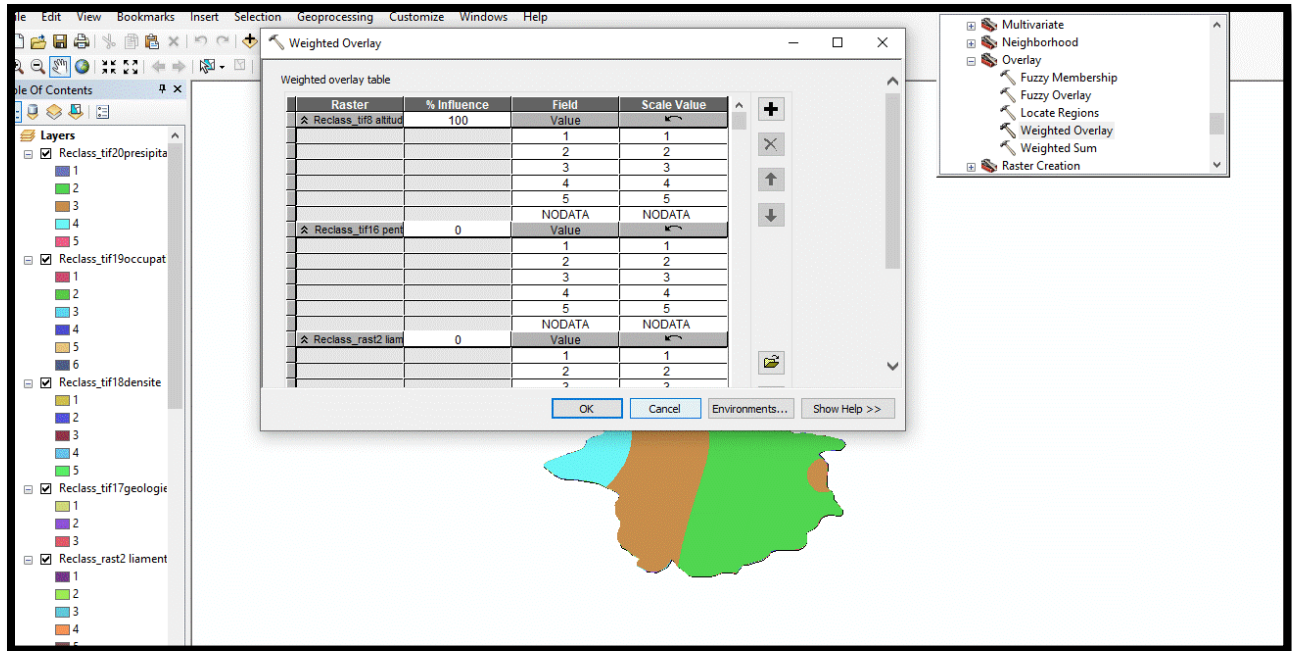


Figure (40) : Calculs des valeurs de pondération (ARC GIS).

5. RESULTATS ET DISCUTIONS :

La carte du potentiel de recharge du sous bassin versant d'Oued Sebdou a été élaborée par superposition de sept cartes thématiques, chacune classée selon son importance relative. Les résultats ont été regroupés en quatre catégories principales : excellente, élevée, modérée et faible. L'analyse révèle que la majorité du sous bassin présente un potentiel modéré à élevé (zones en orange et vert clair), occupant une large portion centrale et occidentale du sous bassin. Ces zones traduisent une capacité d'infiltration allant d'acceptable à bonne, souvent associée à des terrains de perméabilité moyenne à élevée, comme les roches carbonatées, les grès fissurés ou les formations sablo-argileuses, ainsi qu'à une pente modérée. La présence d'une couverture végétale localement dense renforce également cette capacité d'infiltration. Les zones à potentiel excellent (en vert foncé), bien que limitées en superficie, apparaissent de manière localisée dans l'Ouest et certaines zones périphériques. Elles se distinguent par une très bonne capacité de recharge, en lien avec des formations alluviales très perméables, une topographie plane et une couverture végétale développée. Enfin, les zones à faible potentiel (en rouge), concentrées dans

le Nord-Est et le Sud-Est se situent généralement sur des reliefs marqués ou sur des formations de faible perméabilité, comme les marnes ou les argiles compactes. Ces conditions limitent fortement l'infiltration et favorisent le ruissellement, rendant ces zones défavorables à la recharge des nappes phréatiques.

En conclusion : La carte du potentiel des eaux souterraines du sous bassin versant d'Oued Seb Dou montre une variation spatiale étroitement liée aux caractéristiques géologiques, topographiques et pédologiques de la région. Nous remarquons qu'il y a :

- Zone de recharge excellente : dans la partie Ouest du sous bassin.
- Zone de recharge élevée : dans le Sud-Ouest, l'Ouest et centre du sous bassin.
- Zone de recharge modérée : dans le Nord-Est, centre et Sud-Est.
- Zone de recharge faible: dans l'Est et le Sud-Est du sous bassin.

Cette carte constitue un outil précieux pour la planification d'une gestion intégrée des ressources en eau, notamment pour l'identification des zones de recharge.

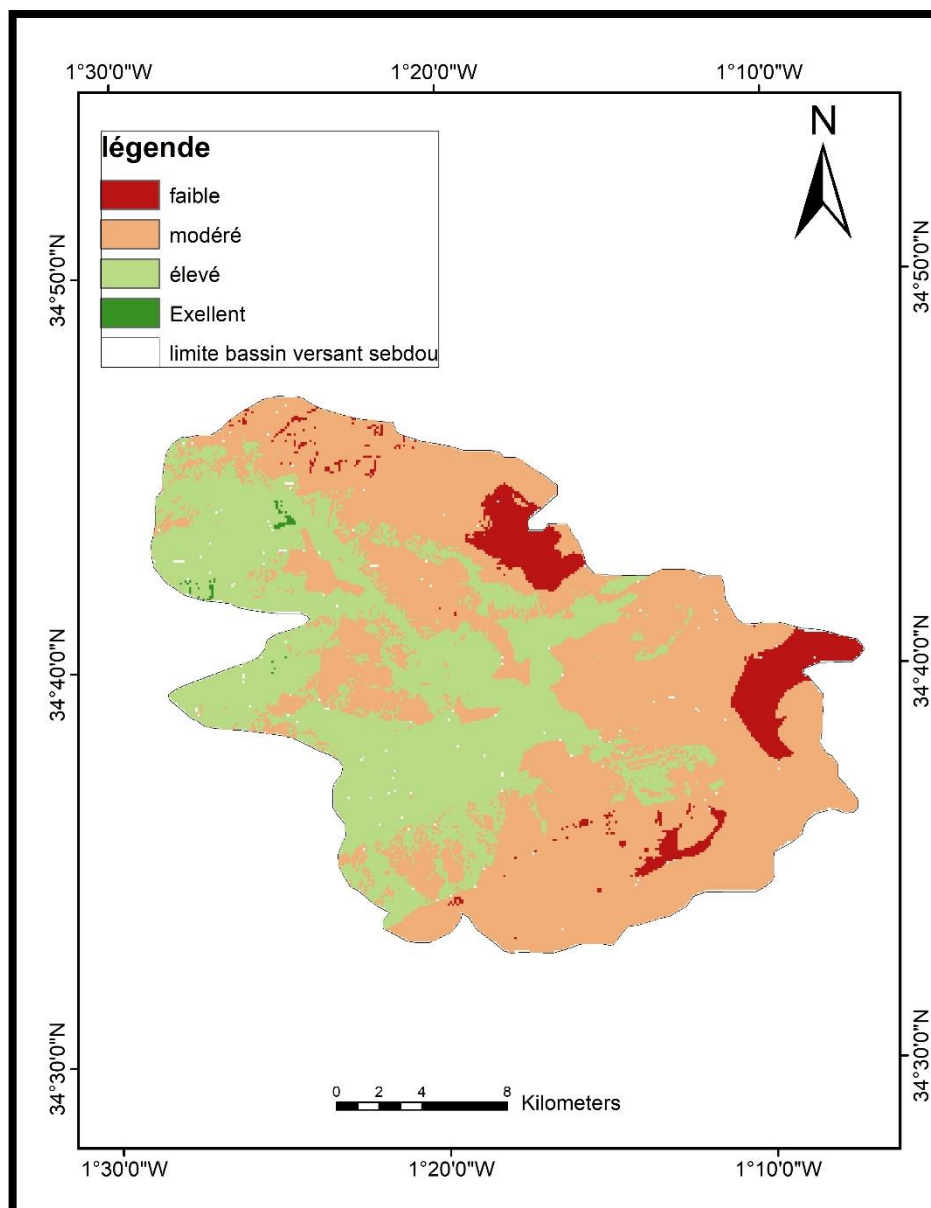


Figure (41) : Carte finale des potentiels de recharge.

6.Recommandations :

Grâce à une approche multicritère intégrée, le Système d'Information Géographique (SIG) a permis de produire une carte des potentialités de recharge du sous bassin versant de Sebdoou. Plusieurs zones favorables à l'infiltration ont été identifiées en croisant différents

paramètres, notamment la géologie, la densité de drainage, l'occupation du sol, les précipitations annuelles et la perméabilité des formations. Ces zones se caractérisent généralement par une fracturation intense, des formations géologiques perméables et une couverture végétale naturelle.

Bien que l'absence de données hydrogéologiques de terrain limite la précision de cette carte, elle constitue néanmoins un outil initial pertinent pour orienter les futures recherches et les stratégies de gestion des ressources en eau dans le sous bassin de Sebdou. Ainsi, il est recommandé de :

1. Protéger les zones à fort potentiel de recharge;
2. Encourager les agriculteurs à adopter des pratiques durables qui préservent la capacité d'infiltration naturelle des sols ;
3. Mettre en place un réseau de suivi hydrologique et hydrogéologique (piézométrie, pluviométrie...) afin d'améliorer la compréhension de la dynamique de recharge ;
4. Valider les zones identifiées par des études de terrain et affiner les stratégies de gestion en conséquence.

Ainsi, bien que cette étude constitue une première base précieuse pour la compréhension du potentiel de recharge dans le sous-bassin versant de Sebdou, elle doit être envisagée comme un point de départ plutôt qu'un aboutissement. La poursuite de recherches complémentaires sur le terrain, accompagnées d'actions de sensibilisation, de protection et d'aménagement, demeure essentielle pour assurer une gestion durable et efficace des ressources en eau.

Dans un contexte de pressions croissantes sur les ressources hydriques, la mise en valeur des zones identifiées comme favorables à la recharge représente un levier stratégique majeur pour sécuriser l'approvisionnement en eau souterraine et préserver les équilibres environnementaux à long terme.

CONCLUSION GENERALE.

Cette étude a permis d'éclairer la dynamique des potentialités hydriques du sous-bassin versant d'Oued Sebdou, situé au Nord-Ouest de l'Algérie, dans le bassin de la Tafna. Elle s'est appuyée sur une approche intégrée combinant des données géologiques, physiques et climatiques, à travers l'utilisation d'outils SIG et d'un modèle d'analyse multicritère.

La région est soumise à un climat semi-aride, ce qui influe sur la recharge des nappes phréatiques, en raison de la brièveté de la saison humide et d'un taux élevé d'évaporation, vu les changements climatiques. Les précipitations moyennes annuelles sont 372.8 mm et les températures moyennes mensuelles sont de 17.7 C°. La température moyenne maximale marquée en mois d'août (29.3°C) et la température moyenne minimale est marquée en février (7.9 C°).

Les courbes pluviothermiques de Bagnouls et Gaussens montrent une période déficitaire, enregistrée du mi-avril au début du mois d'octobre et une période excédentaire qui s'étale sur les autres mois de l'année.

L'analyse des caractéristiques géomorphologiques et géologiques a révélé une grande diversité, influençant fortement les processus d'écoulement et d'infiltration. Les formations carbonatées karstifiées et fracturées (calcaires et dolomies) favorisent la recharge, tandis que les formations imperméables (marnes et les argiles) en constituent des obstacles.

Grâce à l'application de la méthode AHP dans un SIG, il a été possible d'identifier et de hiérarchiser les zones à fort potentiel de recharge. Bien que certaines limites persistent, notamment l'absence de données de terrain pour la validation, les résultats obtenus offrent une base scientifique pertinente pour orienter les initiatives de gestion et de préservation durables.

Par conséquent, l'étude recommande plusieurs actions, notamment la protection des zones de recharge, la mise en place de systèmes de collecte des eaux, la régulation de l'urbanisation, ainsi que le renforcement des recherches futures par des investigations de terrain.

Dans un contexte marqué par le changement climatique et une pression croissante sur les ressources en eau, la valorisation et la protection de ces zones apparaissent comme des enjeux majeurs pour assurer la sécurité hydrique du sous-bassin versant d'Oued Sebdou.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

- Benest M. 1985. Evolution de la plateforme de l'Ouest algérien et du NE marocain. Thèse Doctorat. Univ. Lyon. 367 p.
- Benaissa A. 2016. Étude de la recharge potentielle des nappes dans le bassin de Tlemcen à l'aide des SIG. Mémoire de Master, Université de Tlemcen. 82 p.
- Bhuiyan C., Singh R.P. et Flügel W.A. 2009. Modelling of ground water recharge potential in the hard-rock Aravalli terrain, India: a GIS approach. Pub. Environ .Earth.Sci. (2009) .59 p.
- Bouanani A. 2004. Hydrologie, Transport Solide et Modélisation. Etude de quelques sous-bassins de la Tafna (NW Algérie). Thèse Doctorat, Univ. Tlemcen. 236 p
- Collignon B. 1986. Hydrogéologie appliquée des aquifères karstiques des monts de Tlemcen (Algérie). Thèse Doctorat. Université d'Avignon. 282 p
- Coutagne A. 1948. Méthode de détermination du module des cours d'eau.
- Demmak, A. (1982). Contribution à l'étude de l'érosion et du transport solide en Algérie septentrionale. Thèse de doctorat, Université de Strasbourg. 250 p.
- Fitts C. 2012. Groundwater Science. 2nd Edition, Academic Press. 672 p.
- FAO (1994). Crop Evapotranspiration – Guidelines for ComputingCrop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, Rome. 300 p.
- Gentil L. 1903. Etude géologique du bassin de la Tafna (Algérie). Bull. Serv. Carte géol. Algérie, Alger, 2ème édition, n° 4. 425 p.
- Jha-Chaudhary et Chaudhury. 2010. Groundwater potential zone mapping using GIS and remotesensing: A case study. Journal of Indian Society of RemoteSensing, 38(2), 401–412.
- Koura. M,& Lagraa. A,& Boussouar. A. 2021.Estimation de la recharge à l'aide d'un Modèلهydrologique "GARDENIA". Application au bassin versant d'ouedSebdou (Haute Tafna). .38 p.

- Krishnamurthy J, Venkatesa Kumar N, Jayaraman V, Manivel M.1996. An approach to demarcate groundwater potential zones through remote sensing and a geographical information system. Article. International Journal of Remote Sensing · July 1996 VOL. 17, N°. 10, 1867-1884.
- Krishnamurthy J, Arul Mani, Jayaraman V, and M Manive.2000. Ground water resources development in hard rock terrain - An approach using remote sensing and GIS techniques. Article in International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. p204-215.
- Maachou H., et al. 2020. Délimitation des zones favorables à la recharge des nappes souterraines à l'aide des Systèmes d'Information Géographique (SIG) et de la méthode AHP : cas du bassin de Sebdou, Nord-Ouest algérien. Algerian Journal of Arid Environment, 10(1), 43–55p.
- Malczewski J. 1999. GIS and Multicriteria Decision Analysis. John Wiley & Sons. 392 p.
- Mhawej M. et al. 2005. Using GIS and remote sensing to assess land degradation at multiple scales: The case of Lebanon. Lebanese Science Journal, 6(1), 23–32p.
- Nas B., Ekerçin S., Berktaş A. et Karabörk H. 2010. Mapping of groundwater potential zones in the Sivas basin (Turkey) using remote sensing and GIS. Hydrogeology Journal, 18(7), 1625–1637p.
- Perrodon A. 1957. Etude géologique des bassins néogènes sublittoraux de l'Algérie Occidentale. Bul. Serv. Carte géol. Algérie, Alger, n° 12, 328p.
- Rambert B. 1973. Application à la détermination et à la cartographie de l'écoulement souterrain. Rapport d'étude sur la recherche de la signification hydrogéologique de la densité du drainage, Bureau de recherches Géologiques et Minières, Paris, France. 63 p.
- Rose, M. 1994. Études hydrologiques appliquées aux petits bassins versants méditerranéens. Rapport technique. 60 p.
- Saaty T. 1980. The Analytic Hierarchy Process. McGraw-Hill. 19 p.

- Soufi M. et Mahi A. 2019. Impact des paramètres Hydro-Climatique sur les pertes du sol dans la haute Tafna : Cas du Bassin versant de l'Oued Sebdu. 52 p.
- Shaban A. 2003, 2006. Études hydrogéologiques du Liban occidental.Utilisation de la télédétection. Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1 202 p.
- Strahler A.N. 1952. Hypsometricanalysis of erosionaltopology. Geological Society of America Bulletin, 63(11), 1117-1142p.
- Thomas. 1985. Référence géologique ou hydrologique.
- Thornthwaite C.W. 1948.An approach toward a rational classification of climateGeographical.Review, 38, p. 55-94.
- Todd D.K. et Mays L.W. 2005. GroundwaterHydrology.
- Turc, L.1961.Évaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle : formule climatique simplifiée et mise à jour.
- Wundt W. 1935. Grundlagen der Hydrologie, 2^{ème} édition., Leipzig. 230 p.

Web ographie:

<https://www.wikipedai.com>

<https://www.aquaportale.com>

<https://www.qgis.org>

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

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

ANNEXES :

TABLEAU 1: Valeurs des précipitations moyennes annuelles.

Année	Précipitations (mm)	Années	Précipitations (mm)	Années	Précipitations (mm)
1995	337.5	2006	332.2	2017	258.4
1996	443.0	2007	485.2	2018	501.0
1997	263.7	2008	590.6	2019	300.6
1998	216.2	2009	395.5	2020	210.9
1999	411.3	2010	469.3	2021	285.0
2000	237.3	2011	464.1	2022	325.0
2001	337.5	2012	506.2	2023	256.0
2002	363.9	2013	474.6	2024	304.0
2003	511.5	2014	400.6		
2004	511.5	2015	305.9		
2005	332.2	2016	353.3		

ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تحديد المناطق المناسبة لتغذية المياه الجوفية في الحوض الفرعي سبدو، الواقع في الجزء العلوي من الحوض المائي تافنة. ولتحقيق هذا الهدف، تم اعتماد مقاربة (SIG) خرائطية مدمجة ضمن نظام المعلومات الجغرافية.

تعتمد عملية تقييم قابلية التغلغل على مجموعة من المعايير المكانية، تشمل الجيولوجيا، والانحدار، والشبكة الهيدروغرافية، واستعمالات الأراضي، والهطول المطري، وكثافة الفوالق، حيث تم تمثيل كل معيار بخريطة موضوعية.

(AHP) وقد تم ترتيب هذه المعايير وتوزينها حسب تأثيرها على عملية التغذية باستخدام منهجية التحليل الهرمي.

إنتاج خريطة توضح الإمكانيات المختلفة للتغذية، مقسمة إلى ثلاث درجات: مرتفعة، متوسطة، وضعيفة (SIG) أتاحت عملية إدماج هذه المعطيات ضمن بيئة.

أظهرت النتائج أن بعض المناطق في منطقة سبدو، والتي تتسم بتكوينات جيولوجية نفوذة، وطبوغرافيا معتدلة، وغطاء نباتي طبيعي، تمتلك إمكانيات عالية للتغذية.

في المقابل، تمثل المناطق ذات الإمكانيات الضعيفة أراض ذات انحدار شديد ونفاذية منخفضة. وتُعد هذه النتائج أساسًا علميًا مهمًا لتوجيه إجراءات الإدارة المستدامة لموارد المياه الجوفية، كما تبرز أهمية حماية المناطق ذات الإمكانيات العالية للتغذية من الضغوطات البشرية المتزايدة مثل التوسع العمراني، وذلك لضمان استدامة الموارد المائية المحلية.

الكلمات المفتاحية

عملية التسلسل الهرمي التحليلي (AHP)، إمكانية التزويد، نظم المعلومات الجغرافية، طريقة (SIG)، تافنة (العليا) الحوض الفرعي سبدو(.

Résumé:

Cette étude vise à identifier les zones favorables à la recharge des nappes phréatiques dans le sous bassin versant de Sebdo, situé dans la partie amont du bassin versant de la Tafna. Pour ce faire, une approche cartographique intégrée au sein d'un Système d'Information Géographique (SIG) a été mobilisée. L'évaluation de la capacité d'infiltration repose sur un ensemble de critères spatiaux, notamment la géologie, la pente, le réseau hydrographique, l'occupation du sol, les précipitations et la densité des linéaments, chacun représenté sous forme de carte thématique. Ces paramètres ont été hiérarchisés et pondérés selon leur influence sur le processus de recharge, à l'aide de la méthode AHP (Analyse Hiérarchique des Processus). L'intégration de l'ensemble des données dans l'environnement SIG a permis la génération d'une carte des potentialités de recharge, distinguant trois niveaux : fort, moyen et faible. Les résultats montrent que certaines zones de la région de Sebdo, caractérisées par des formations géologiques perméables, une topographie modérée et une couverture végétale naturelle, présentent un fort potentiel de recharge. À l'inverse, les zones de faible potentiel correspondent généralement à des terrains à forte pente et à faible perméabilité. Ces résultats constituent un socle scientifique pertinent pour orienter les actions de gestion durable des ressources en eau souterraine. Ils soulignent également l'importance de préserver les zones à fort potentiel de recharge, face aux pressions anthropiques croissantes, telles que l'urbanisation, afin d'assurer la pérennité des ressources hydriques locales.

Mots clés :

HAUT tafna(Sous -bassin versant de sebdo), Potentiel de recharge, SIG, AHP.QGIS

Abstract:

This study aims to identify areas favorable for groundwater recharge within the Sebdo sub-watershed, located in the upstream part of the Tafna watershed. To achieve this, an integrated cartographic approach within a Geographic Information System (GIS) environment was adopted. The evaluation of infiltration capacity is based on a set of spatial criteria, including geology, slope, hydrographic network, land use, precipitation, and lineament density, each represented by a thematic map. These parameters were ranked and weighted according to their influence on the recharge process using the Analytic Hierarchy Process (AHP) method. The integration of all data in the GIS environment enabled the generation of a recharge potential map, classifying areas into three levels: high, moderate, and low. The results indicate that certain zones in the Sebdo region, characterized by permeable geological formations, moderate topography, and natural vegetation cover, present a high potential for groundwater recharge. In contrast, areas with low recharge potential are generally associated with steep slopes and low permeability. These findings provide a relevant scientific basis for guiding sustainable groundwater resource management strategies. They also highlight the importance of preserving high recharge potential areas from increasing anthropogenic pressures, such as urbanization, to ensure the long-term sustainability of local water resources.

Keywords:

Upper tafna(Sebdo sub-watershed), Recharge potential, GIS, AHP.QGIS