

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 – TLEMEN
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

Melle BENAMEUR AbirNadjet

En vue de l'obtention du

Diplôme de MASTER

En Hydrogéologie.

Thème

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

Soutenu le 2025, devant le jury composé de :

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

**Année Universitaire :
2024-2025**

Remerciement

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

Je remercie Madame Guettaia Sabrina et Monsieur Boudjemaa Abdelrezak, d'avoir accepté de m'encadrer, pour leur disponibilité, leur patience, leurs conseils tout au long de ce travail.

Un grand remerciement aux membres du jury : Monsieur BENCHAI.B d'avoir accepté de présider le jury et Madame DJELAD.R pour sa participation, afin d'évaluer ce travail.

Je remercie également l'ensemble des enseignants du département « Sciences de la Terre et l'univers », qui ont contribué à ma formation tout long de mon parcours universitaire. Leur dévouement et leur professionnalisme ont été pour moi une source d'inspiration.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail,

A mes chers parents, qui m'ont toujours soutenu avec amour, patience et encouragement. Votre confiance en moi a été ma plus grande force. Ce travail est

le fruit de vos sacrifices et de votre bienveillance. Merci pour tout.

A mes frères, pour leur constante, leur soutien inconditionnel tout au long de ce parcours.

A mes amis, merci pour votre amitié sincère, votre aide, vos encouragements, et les moments de partage qui ont rendu cette aventure plus légère et plus agréable.

ABIR

ملخص

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو إعداد خريطة تحدد المناطق ذات الإمكانيات العالية لإعادة شحن المياه الجوفية في حوض مويلح الذي يمتد بين دولة الجزائر و المغرب، عن طريق إستعمال نظام المعلومات الجغرافية SIG و كذلك مختلف معلومات الخاصة بحوض مثل (الجيولوجيا، المنحدرات، الشبكة الهيدروغرافية، الغطاء الأرضي، هطول الأمطار و كثافة الخطوط) ، كل من هذه معلومات تمثل في شكل خرائط، يتم تحليلها وتصنيفها وفقا لتأثيرها على عملية إعادة الشحن، و هذا قمنا به من خلال طريقة التسلسل الهرمي التحليلي (AHP) المطور من طرف Saaty.

من أجل إعداد خريطة مناطق إعادة الشحن قمنا بأدراج جميع البيانات التي تحصلنا عليها في نظام المعلومات الجغرافية ثم قمنا بدمجها للحصول على الخريطة.

الخريطة المتحصل عليها تنقسم إلى ثلاث مناطق لإعادة الشحن كل منطقة تتميز بشدة إعادة شحن خاصة بها، حيث شدة إعادة الشحن العالية تتواجد في جزء صغير من حوض في منطقة الشمالية، أما شدة المتوسطة فهي تتمركز بكثرة داخل الحوض وفي الأخير شدة القليلة تقع خصوصا في جزء الجنوبي للحوض.

تعتبر هذه الخريطة أداة رئيسية في إدارة الموارد المائية، حيث من خلالها نستطيع وضع خطة حول كيفية إستغلال موارد المائية في الحوض مويلح. الكلمات المفتاحية: تافنة ، حوض مويلح، نظام المعلومات الجغرافية (SIG)، إمكانات إعادة التغذية ، (عملية التسلسل الهرمي التحليلي AHP).

Résumé

L'objectif principal de cette étude est de réaliser une carte qui identifie les zones à fort potentiel de recharge des eaux souterraines dans le sous bassin versant de Mouillah, qui s'étend entre l'Algérie et le Maroc, en utilisant le SIG et diverses informations spécifiques au bassin (géologie, pentes, occupation du sol, précipitations, densité de drainage....), chacune étant représentée sous forme de carte, analysée et classée en fonction de son impact sur le processus de recharge, à travers la méthode Analytical Hierarchy Process (AHP) développée par Saaty.

Afin de préparer la carte des potentiels de recharge, nous avons introduit toutes les données obtenues dans le SIG et les avons ensuite fusionnées pour obtenir la carte.

La carte obtenue est divisée en trois zones de recharge, chaque zone est caractérisée par sa propre intensité de recharge, où l'intensité élevée est située dans une petite partie du sous bassin dans la région nord, l'intensité moyenne est concentrée à l'intérieur du bassin, et l'intensité faible est située principalement dans la partie sud du bassin.

Cette carte est un outil clé dans la gestion des ressources en eau, par laquelle nous pouvons développer un plan sur la façon d'exploiter les ressources en eau dans le sous bassin de Mouillah.

Mots clés : Tafna, Sous bassin versant de Mouillah, SIG, Potentiel de recharge, AHP.

Abstract

The main objective of this study is to realize a map that identifies areas with high potential for groundwater recharge in the Mouillah basin, which extends between Algeria and Morocco, by using the SIG geographic information system and various basin-specific information (geology, slopes, hydrographic network, land cover, precipitation and line density), each of which is represented in the form of maps, analyzed and classified according to their impact on the recharge process, which we did through the Analytical Hierarchy Process (AHP) method developed by Saaty.

In order to prepare a map of transshipment areas, we entered all the data we obtained into a GIS and then merged them to obtain the map.

The obtained map is divided into three recharge zones, each zone is characterized by its own recharge intensity, where high recharge intensity is located in a small part of the basin in the northern region, medium intensity is highly concentrated within the basin, and low intensity is located mainly in the southern part of the basin.

This map is a key tool in water resources management, through which we can develop a plan on how to utilize the water resources in the Mouillah basin.

Keywords: Tafna, Mouillah catchment area, SIG, Recharge potential, AHP.

SIG: System Information Geographic.

AHP: Analytic Hierarchy Process.

Figure 1: La situation géographique de sous bassin versant d'Oued Mouillah (Benameur.A, 2025).....	3
Figure 2: Carte des altitudes de sous bassin versant d'Oued Mouillah. .. Erreur ! Signet non défini.	
Figure 3: Courbe hypsométrique.	9
Figure 4: Carte des pentes de sous bassin versant d'Oued Mouillah. Erreur ! Signet non défini.	
Figure 5: Carte de classification de cours d'eau selon stralher 1957.....	14
Figure 6: Carte de densité de drainage de sous bassin versant d'Oued Mouillah.	16
Figure 7: Carte d'occupation de sol de sous bassin versant d'Oued Mouillah.	18
Figure 8: Carte des précipitations de sous bassin versant d'Oued Mouillah	21
Figure 9: Variation des précipitations moyennes annuelles a la station Maghnia (1990 - 2024).....	23
Figure 10: Variation des précipitations moyennes mensuelles (1990 - 2024).....	24
Figure 11: Variation des précipitations saisonnières.....	25
Figure 12: Températures moyennes mensuelles, maximales et minimales de station de Maghnia.	26
Figure 13: Digramme pluviothermique de Bagnouls et Gausсен.....	27
Figure 14: Abaque de l'indice d'aridité annuel.	29
Figure 15: Climagramme d'Emberger.....	31
Figure 16: Détermination du déficit d'écoulement (Abaque de WUNDT).	35
Figure 17: Abaque pour la calcul de déficit d'écoulement en Algérie (P.VERDEIL, 1988).	36
Figure 18: Carte géologique de sous bassin versant d'Oued Mouillah.....	45
Figure 19: Carte de densité des linéaments de sous bassin versant d'Oued Mouillah.	48
Figure 20: Interface de QGIS 3.36.	57
Figure 21: Interface de Arc Map 10.8.	58
Figure 22: Délimitation de sous bassin versant d'Oued Mouillah.	59
Figure 23: Le MNT de sous bassin d'Oued Mouillah (https://earthexplorer.usgs.gov/).....	60
Figure 24 : Méthode d'élaboration de la carte des potentialités hydriques	62
Figure 25: Organigramme pour l'élaboration de la carte géologique (lithologie).	64
Figure 26: Organigramme pour l'élaboration de carte d'occupation de sol.	66
Figure 27: Organigramme pour l'élaboration de la carte des altitudes.	67
Figure 28: Organigramme pour l'élaboration de la carte des pentes.	69
Figure 29: Organigramme pour l'élaboration de la carte des linéaments.	71
Figure 30: Organigramme pour l'élaboration de la carte de densité de drainage.	72
Figure 31: Organigramme pour l'élaboration de la carte des précipitations.	74
Figure 32: Tableau de calcul des valeurs de pondération dans ArcGIS.....	81
Figure 33: La carte finale des potentiels de recharge du sous bassin versant d'Oued Mouillah.	82

Tableau 1: Surface et périmètre de sous bassin d'Oued Mouillah.....	4
Tableau 2: Répartition altimétriques (l'altitude) de sous bassin versant d'Oued Mouillah.	6
Tableau 3: Classification de relief selon Orostom.	13
Tableau 4: Classification des cours d'eau selon stralher.	15
Tableau 5: Classification des longueurs des cours d'eau.	15
Tableau 6: Situation géographique de la station climatologique de Maghnia.	19
Tableau 7: Précipitations moyennes annuelles.	22
Tableau 8: Précipitations moyennes mensuelles (1990 – 2024).	23
Tableau 9: Les précipitations saisonnières.....	24
Tableau 10: Valeurs des températures mensuelles moyennes, maximales et minimales.....	25
Tableau 11: Précipitations et Températures moyennes mensuelles à la station de Maghnia (1990-2024).	27
Tableau 12: Indice d'aridité de DE Martonne.	28
Tableau 13: Classification de DE Martonne.	29
Tableau 14: Indices d'aridité mensuelles de DE Martonne.	30
Tableau 15: Indice d'Emberger.	31
Tableau 16: Classification de l'indice Q_2	32
Tableau 17: Calcul de l'ETR par la méthode de TURC.....	34
Tableau 18: Valeur du déficit d'écoulement d'après WUNDT.	35
Tableau 19: Valeur du déficit d'écoulement d'après P.VERDEIL.....	35
Tableau 20: Valeurs de l'ETP corrigée à la station de Maghnia (1990 - 2024).	37
Tableau 21: Calcul du bilan hydrologique de la station de Maghnia (1990 - 2024).....	38
Tableau 22: Les classes de densité des linéaments.....	49
Tableau 23: Les aquifères de sous bassin versant d'Oued Mouillah.....	51
Tableau 24: Les polygones de carte géologique.	64
Tableau 25: Les critères et pondération du module final.	79

Remerciement	3
Dédicaces	
Résumé	
LISTE DES ABREVIATIONS.....	
LISTE DES FIGURES.....	
LISTE DES TABLEAUX	
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 1 : SITUATION GEOGRAPHIQUE ET CLIMATOLOGIE	
I. Situation géographique :	3
Caractéristiques physiques du sous bassin versant d'Oued Mouillah :	3
1.La forme du sous bassin versant :	4
1.1. Surface et périmètre :.....	4
1.2. . Indice de compacité de Gravelius « Kc » :	4
1.3. . Rectangle équivalent :	5
Les caractéristiques topographiques	5
1. Répartition altimétriques (l'altitude):	6
2. La courbe hypsométrique :	9
a. Altitude Moyenne :	10
b. Altitude la plus fréquente :	10
c. Altitude médiane :	10
d. Altitude minimale et maximale :	10
3. Etude de pente :	10
3.1. Indices de pente :	12
a. Indice de pente globale :	12
b. Dénivelée spécifique « Ds » :	12
Etude du réseau hydrographique :	13
1. Classification de cours d'eau selon Stralher 1957 :	13
2. Les paramètres du réseau hydrographique :	14
a. Rapport de confluence « Rc » :	14
b. Rapport des longueurs « R _L » :	15
c. Densité de drainage « Dd » :	16
Occupation du sol.....	17

II. CLIMATOLOGIE :	19
□ Etude des paramètres climatologiques :	20
1. Les précipitations :	20
A. Variations des précipitations moyennes annuelles :	21
B. Les précipitations moyennes mensuelles :	23
C. Les précipitations saisonnières :	24
2. Les températures :	25
A. Les températures moyennes, maximales et minimales :	25
3. L'étude du climat :	26
3.1. Méthodes de visualisation (Méthodes graphiques) :	27
3.2. Les indices climatiques :	28
4. Bilan Hydrologique :	32
4.1. L'évapotranspiration réelle ETR :	33
a. Méthode de TURC (1954) :	33
b. Méthode de COUTANGE :	34
c. Méthode de WUNDT :	34
d. Méthode de P. VERDEIL :	35
4.2. Evapotranspiration potentielle ETP :	36
4.3. Evapotranspiration réelle :	37
4.3.1. Réserve facilement utilisable (R.F.U) :	37
Conclusion	38
CHAPITRE II : LA GEOLOGIE ET HYDROGEOLOGIE	
I. Introduction	40
II. La géologie :	40
III. Etude Structurale de la région:	46
IV. L'hydrogéologie :	49
Conclusion	52
CHAPITRE III : APPLICATION DU SYSTEME SIG POUR L'ELABORATION DE LA CARTE DES POTENTIALITES HYDRIQUES	
I. Introduction	54
II. Rôle du système SIG dans la protection et la gestion des potentialités hydriques :	54
III. Méthodes d'évaluation des potentialités hydriques :	55
IV. Technique d'élaboration de la carte des potentialités hydriques :	56
1. Outils et données :	56

2.Méthode de travail :	61
2.1. Cartographie des paramètres :	62
A. La géologique :	62
B.Occupation du sol :	65
C.Altitude :	66
D.Pente :	68
E.Densité des linéaments :	69
F.La carte de densité de drainage (Arcmap) :	71
G.La carte de précipitations :	72
2.1.1.Analyse multicritères :	74
2.2. La reclassification des paramètres :	77
2.3. Superposition et pondération des critères :	80
2.4. Résultat et discussions :	81
Conclusion	83
COCLUSION GENERALE	84
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	
Web références	
Logiciels	
Annexes	

INTRODUCTION GENERALE

L'eau, source de vie et pilier de nos sociétés, est une ressource naturelle essentielle dont la disponibilité et la qualité sont de plus en plus préoccupantes à l'échelle mondiale. Longtemps considérée comme abondante et inépuisable, la réalité contemporaine nous confronte à une situation complexe où la demande croissante, les pressions anthropiques et les effets exacerbés du changement climatique mettent en péril cet élément vital.

Les changements climatiques exercent une pression significative et croissante sur les ressources en eau à travers le monde. Ces changements se manifestent de multiples façons, affectant la disponibilité, la qualité et la gestion de cette ressource essentielle. Donc, La gestion des ressources en eau peut être définie comme le processus de planification, de développement, de distribution et d'utilisation optimale des ressources en eau, qu'elles soient superficielles (rivières, lacs, réservoirs) ou souterraines (nappes phréatiques), en tenant compte des aspects environnementaux, sociaux et économiques.

Parmi les méthodes de gestion des ressources en eau est l'utilisation des SIG et Télédétection. Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) et la télédétection jouent un rôle crucial et de plus en plus important dans la gestion des ressources en eau. Ils fournissent des outils puissants pour la collecte, l'analyse, la visualisation et la modélisation des données spatiales et temporelles liées à l'eau.

Dans cette étude nous étudierons le potentiel de recharge en eau dans le sous bassin versant d'Oued Mouillah par l'utilisation de SIG et de la télédétection afin de localiser les zones de recharge.

Ce travail se divise en trois chapitres :

CHAPITRE 1 : Situation géographique et climatologie. Dans, ce chapitre, nous présentons la localisation de la zone d'étude avec ses caractéristiques physiques et son climat.

CHAPITRE 2 : Géologie et hydrogéologie. Ce chapitre est consacré à l'identification des formations géologiques de la zone d'étude, ainsi que les aquifères qu'abrite cette région.

CHAPITRE 3 : est dédié à la technique d'élaboration de la carte des potentialités hydriques, à l'aide du système SIG et de la télédétection.

CHAPITRE I
SITUATION GEOGRAPHIQUE ET
CLIMATOLOGIE

I. Situation géographique :

Le sous bassin versant d'Oued Mouillah, objet de notre étude, fait partie du bassin versant de la Tafna. Il est situé au niveau de la rive gauche de la moyenne Tafna (figure 1), il s'étale sur une superficie de 2650 km² pour un périmètre de 230 km. Une bonne partie de cette surface se trouve dans le territoire marocain. La longueur du cours d'eau principale est de 124 km, il prend naissance dans la région d'El Abed en Algérie à 1250 m d'altitude. Il pénètre au Maroc pour s'appeler tantôt Oued Isly tantôt Oued Bou Naïm puis revient en Algérie aux environs de Maghnia, sous l'appellation d'Oued Mouillah. Il draine un bassin constitué de zones très hétérogènes formées de montagnes (les monts des Traras au Nord-Ouest et ceux de Tlemcen au Sud), de plaines et de vallées (Mahi.M , 2023).

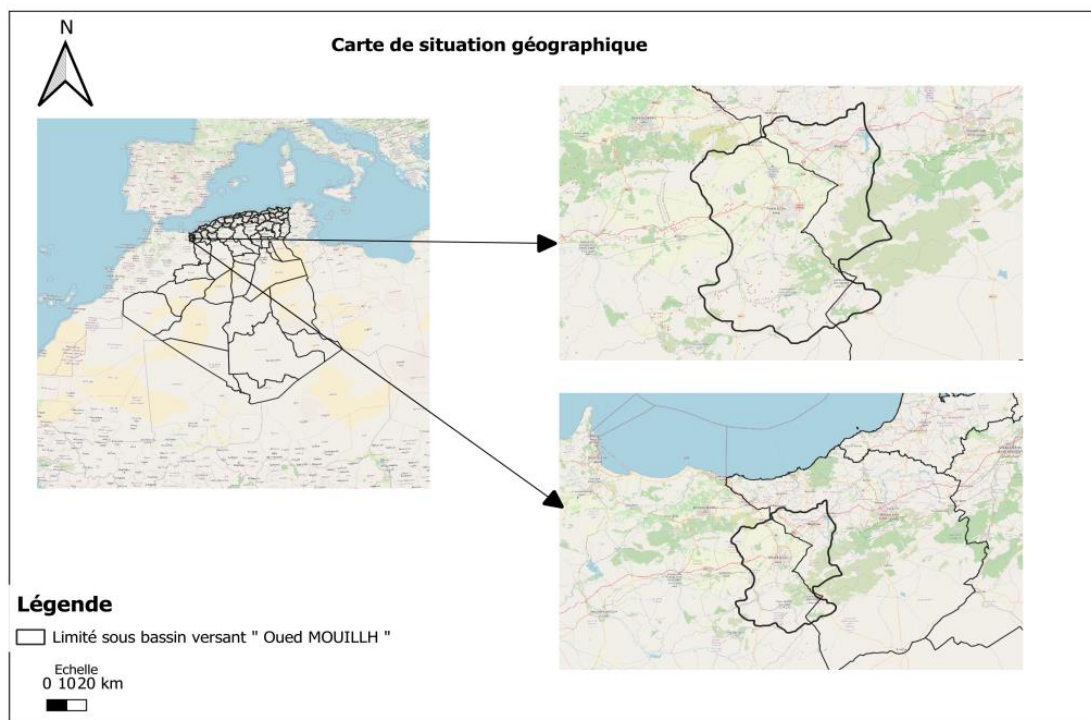


Figure 1: La situation géographique de sous bassin versant d'Oued Mouillah (Benameur.A, 2025).

Caractéristiques physiques du sous bassin versant d'Oued Mouillah :

Ce sont les éléments naturels et mesurables qui définissent la forme, la structure et le fonctionnement hydrologique du sous bassin. Ils influent directement sur la manière dont l'eau circule (ruissellement, infiltration, évaporation, etc.). Ces caractéristiques sont les suivantes :

1. La forme du sous bassin versant :

1.1. Surface et périmètre :

La surface et le périmètre d'un bassin versant sont des éléments cruciaux en hydrologie. Ils sont utilisés pour évaluer le comportement hydrologique d'un bassin, notamment en ce qui concerne le ruissellement, les crues et la gestion des ressources en eau.

La surface d'un bassin versant correspond à la zone entière du terrain où les eaux de pluie, de fonte ou de ruissellement s'écoulent vers le même point d'écoulement, comme un cours d'eau, un lac ou la mer.

Le périmètre représente la distance totale entre la ligne de partage des eaux et les bassins versants voisins.

Tableau 1: Surface et périmètre de sous bassin d'Oued Mouillah.

Sous bassin	Superficie (Km ²)	Périmètre (km)
Oued Mouillah	2650	230

1.2. Indice de compacité de Gravelius « Kc » :

C'est un paramètre morphométrique qui permet d'évaluer la forme d'un bassin versant en comparant sa forme réelle à celle d'un cercle (forme la plus compacte possible).

Il est représenté par la formule suivante :

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

Avec :

- **Kc** : Indice de compacité de Gravelius .
- **A** : Superficie de sous bassin versant(km²).
- **P** : Périmètre de sous bassin versant (km).

Un Kc proche de 1 indique une forme circulaire, favorisant un drainage rapide et une réponse rapide aux précipitations.

Un Kc supérieur à 1 suggère une forme allongée, ce qui peut entraîner un écoulement plus lent et des débits de crue plus faibles, mais avec un retard dans l'atteinte du pic de crue.

$$Kc = \frac{230 \times 0.28}{\sqrt{2650}} = 1.25$$

$Kc = 1.25$ (supérieur à 1) donc le sous bassin versant de l'Oued Mouillah est de forme Allongée.

1.3 . Rectangle équivalent :

A partir de l'indice de compacité, le rectangle équivalent représentatif du sous bassin versant d'Oued Mouillah est déterminé par les relations suivantes :

$$L = \frac{Kc \times \sqrt{A}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{Kc}\right)^2} \right]$$

$$l = \frac{Kc \times \sqrt{A}}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{Kc}\right)^2} \right]$$

Avec :

- **L** : longueur de bassin versant (km).
- **l** : Largueur de bassin versant (km).
- **Kc** : Indice de compacité de Gravelius.

Pour le sous bassin versant d'Oued Mouillah longueur est de 82.96 km et largeur est de 31.94 km.

Les caractéristiques topographiques :

Les caractéristiques topographiques telles que le relief, l'altitude, la pente et la configuration du réseau hydrographique sont des éléments essentiels dans le comportement d'un bassin versant. Ils jouent un rôle principal dans les écoulements souterraines et superficiels, et par conséquents la recharge des aquifères.

1. Répartition altimétriques (l'altitude):

Le sous bassin de l'Oued Mouilah occupe une superficie de 2650 km², dont la majeure partie se trouve sur le territoire marocain, couvrant les plaines des Angads (partie marocaine) et de Maghnia (partie algérienne). Le relief assez varié est constitué de zones de montagnes, de plaines et de vallées (Bouanani, A, 2004).

Tableau 2: Répartition altimétriques (l'altitude) de sous bassin versant d'OueMouillah.

Tranches d'altitudes	Ai (km ²)	Ai cumulées (km ²)	Ai %	Ai cumulés %
>1200	224.28	224.28	8.46	8.46
900-1200	708.26	932.54	26.72	35.18
600-900	730.95	1663.49	27.68	62.86
300-600	161.32	1824.81	6.08	68.94
<300	825.19	2650	31.06	100

+

- Tranches d'altitudes : Les tranches d'altitude sont regroupées en cinq catégories, allant de plus de 1 200 mètres à moins de 300 mètres. Cette classification permet de visualiser la distribution des altitudes sur le territoire étudié.
- Ai (km²): C'est la surface, en kilomètres carrés, occupée par une tranche d'altitude donnée dans le sous bassin versant.
- Ai cumulées (km²) : C'est la somme des surfaces des tranches d'altitudes, par exemple (Ai₁=Ai₁, Ai₂=Ai₁ + Ai₂, ...)
- Ai % : C'est la proportion que représente chaque tranche d'altitude par rapport à la surface totale du bassin.

$$Ai \% = \left(\frac{Ai}{A_{totale}} \right) \times 100$$

- Ai cumulés % : La somme progressive des pourcentages s'établit de la manière suivante : on part de la tranche la plus haute pour descendre jusqu'à celle considérée.

Le tableau 02, montre que la plus grande partie de surface de sous bassin versant d'Oued Mouillah se situe dans les tranches d'altitudes inférieure à 300 m avec une superficie de 825.19 km² représente 31.06% de la surface totale.

Une petite partie de surface du sous bassin versant est situé dans l'intervalle d'altitudes (300 à 600) avec une superficie de 161.32 km² représente 6.08% de surface totale.

Les altitudes les plus élevées (supérieures à 1200 m) sont représentées avec 224.28 km², et de 8.46 % de surface de totale.

Cette répartition indique que la région étudiée est majoritairement composée de zones de basse altitude (des plaines, des vallées ou des plateaux) et pour les zones des haute altitude, sont moins étendues et pourraient correspondre à des massifs montagneux ou des collines.

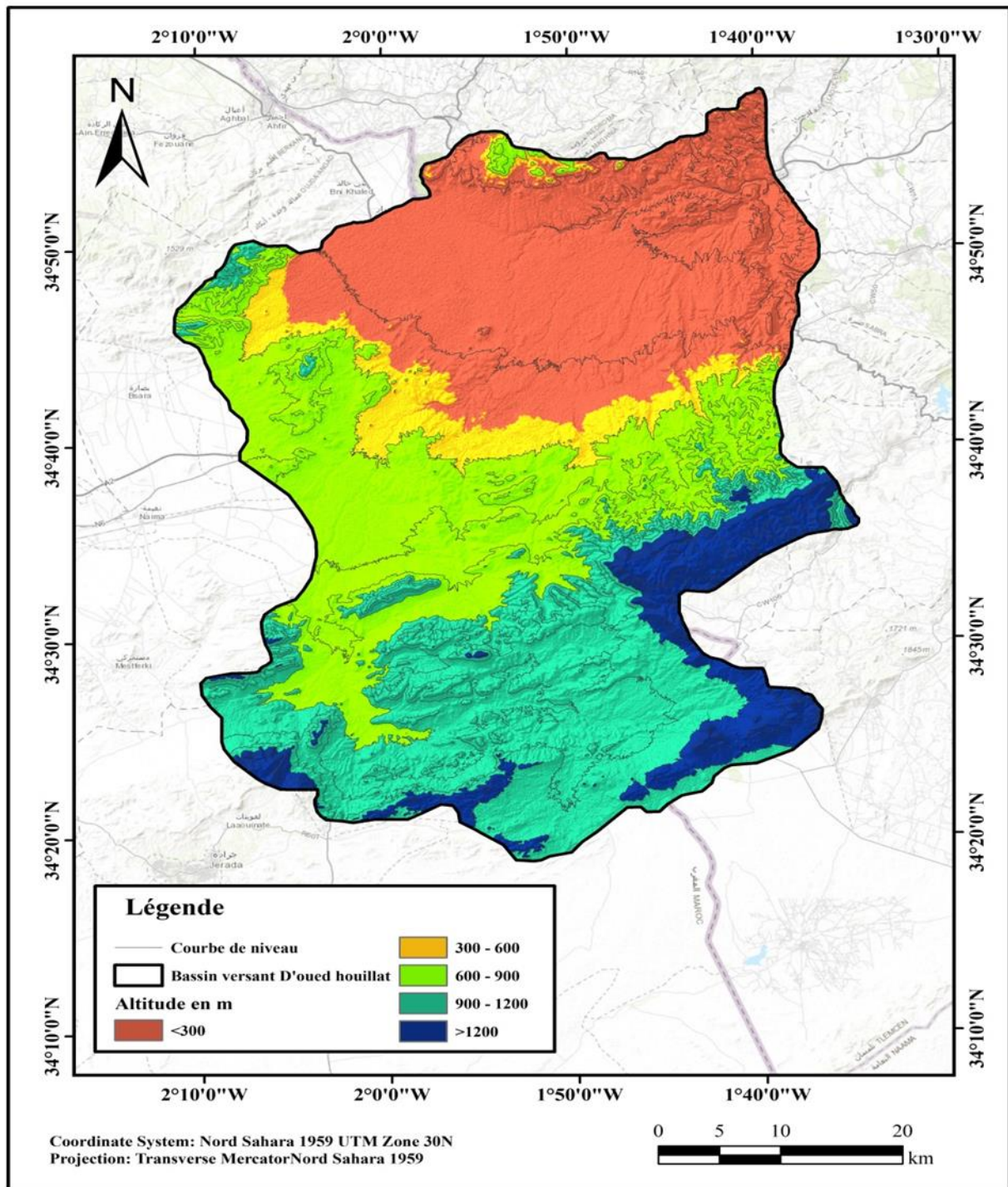


Figure 2: Carte des altitudes de sous bassin versant d'Oued Mouillah.

Le figure 02 représente une carte hypsométrique (des altitudes) du sous bassin versant d'Oued Mouillah, indique que le sous bassin est caractérisé par une topographie variée qui influence directement le potentiel de recharge. Les zones de haute altitude dépassant 900 mètres sont caractérisées par des pentes fortes qui favorise le ruissellement de l'eau et limite l'infiltration, donc le potentiel de recharge est très faible.

Par ailleurs, les zones de moyennes altitudes de 300 à 900 mètres sont caractérisées par des pentes faibles et des sols favorables à l'infiltration, donc le potentiel de recharge est augmenté.

Enfin, les zones de basse altitude qui sont inférieures à 300 mètres sont localisées dans la région de Maghnia et le barrage de Hammam Boughrara. Elles sont également considérées comme des zones favorisant le potentiel de recharge, mais cela dépend du type de sol, de la géologie, et l'intensité des précipitations dans la région.

2. La courbe hypsométrique :

Une courbe hypsométrique est une représentation de la distribution cumulative des altitudes dans un bassin versant. Elle indique la part de la superficie du bassin qui se situe au-dessus d'une altitude donnée. Autrement dit, elle permet de visualiser la répartition de la superficie du bassin selon son altitude.

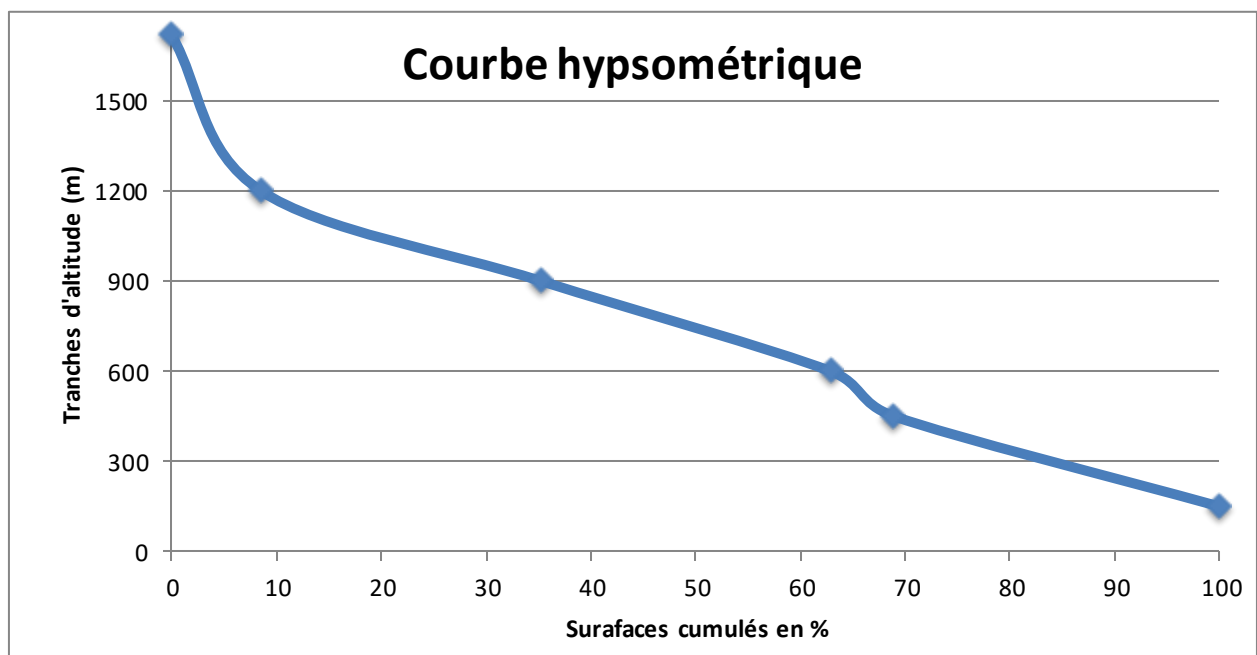


Figure 2: Courbe hypsométrique.

A partir la courbe hypsométrique on peut définir les indices d'altitudes suivants :

a. Altitude Moyenne :

Représente sous la formule suivante :

$$H_{\text{moy}} = \frac{1}{A} \sum (S_i \frac{h_i + h_{i+1}}{2})$$

Où :

- H_{moy} : Altitude moyenne du bassin versant en (m).
- A : Surface du bassin versant en (km²).
- S_i : Surface entre deux courbes de niveau en (km²).
- H_i et H_{i+1} : altitude haute et basse qui délimite la surface S_i en (m).

$$H_{\text{moy}} = 618.11 \text{ m.}$$

b. Altitude la plus fréquente :

C'est l'altitude correspondante au maximum de superficie sur la courbe hypsométrique.

$$H = < 300 \text{ m.}$$

c. Altitude médiane :

Correspond au point d'abscisse 50% sur la courbe hypsométrique.

$$H_{50\%} = 750 \text{ m.}$$

d. Altitude minimale et maximale :

Altitude minimale est de **249 m** et l'altitude maximale est de **1714 m**.

3. Etude de pente :

La pente est un paramètre majeur influençant la percolation et l'infiltration de l'eau (Eman.B et al, 2014). Selon Eman et Al (2014), une pente brute facilite le ruissellement, mais ne favorise pas l'infiltration verticale. Par contre, une zone plate avec une pente douce permet une meilleure mobilisation de l'eau et favorise son infiltration, augmentant ainsi la recharge des eaux.

La carte des pentes est obtenue à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT) après traitement avec logiciel QGIS 3.36 par l'outil «Slope». Les valeurs de pente sont classées en cinq classes.

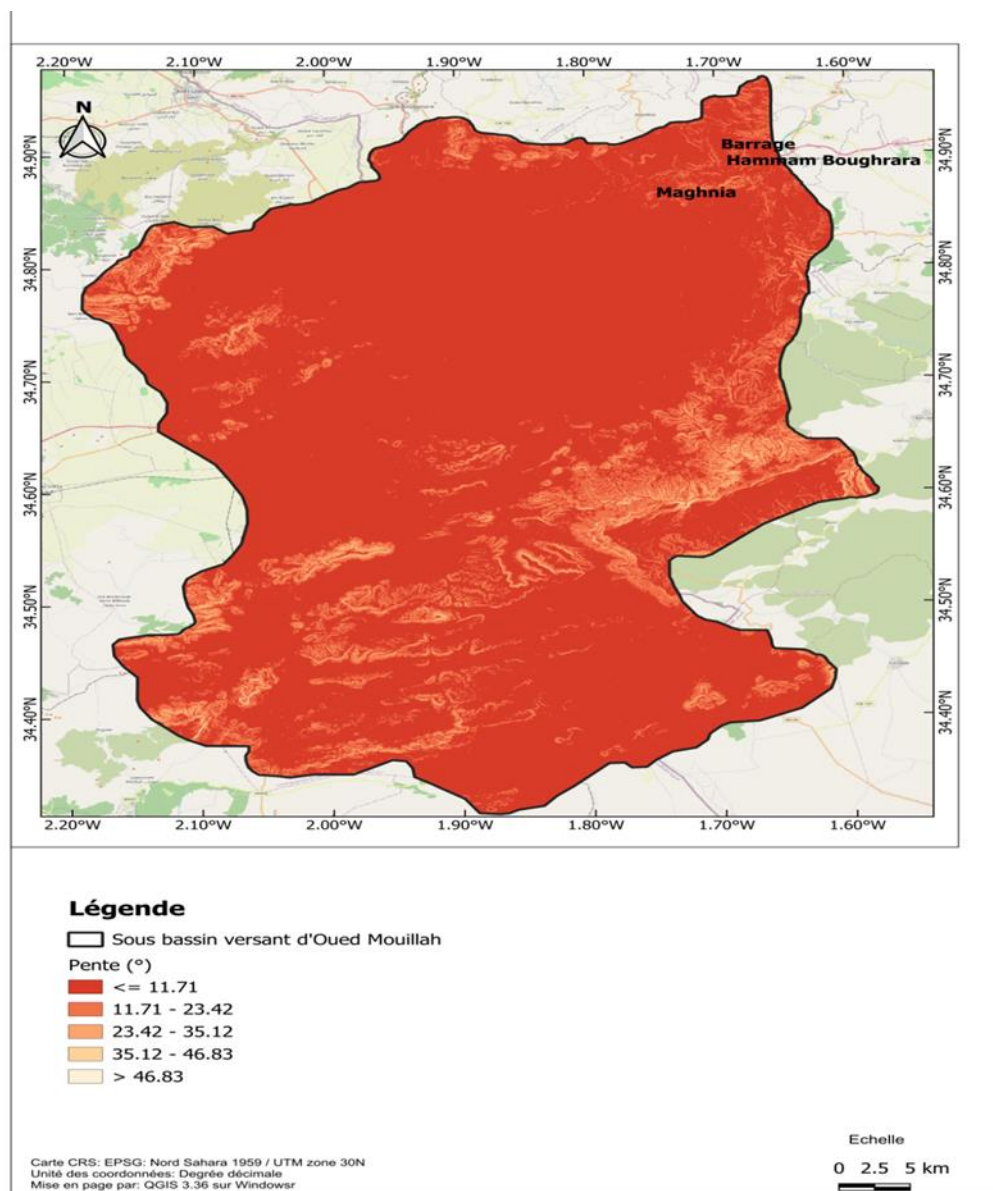


Figure 4: Carte des pentes de sous bassin versant d'Oued Mouillah.

- $\leq 11.71^\circ$: occupent la majorité de surface de sous bassin versant, indiquant des terrains relativement plats (les plaines et les vallées) où l'infiltration est favorable.

- **11.71°- 23.42°** : sont des zones de pente modérée, en général sont des zones de transition. Où le ruissellement est modéré, certaines eaux commencent à s'écouler en surface et l'infiltration est moyenne.
- **23.42°- 35.12°** : sont des zones de forte pente, où l'infiltration de l'eau est réduite et le ruissellement est augmenté.
- **35.12°-46.83°** : sont des zones de très forte pente, sont généralement dans la partie Sud et Sud-Ouest du sous bassin versant. Elles favorisent le ruissellement.
- **> 46.83°** : les zones sont escarpées, où l'infiltration est négligeable et le ruissellement est maximal.

❖ **Indices de pente :**

a. **Indice de pente globale :**

D'après (**Bouanani.A, 2004**), 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 (**Ig**) donné par la relation :

$$I_g = D/L$$

Où ;

- **Ig: Indice globale de Roche.**
- **D : Dénivelée (m).**

Sur la courbe hypsométrique déjà tracée, on prendre 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 H₅-H₉₅ (**Bouanani.A, 2004**).

- **L : Longueur de rectangle équivalent (km).**
- **Ig = (1250-270) /82.94=11.81**

b. **Dénivelée spécifique « Ds » :**

Elle est défini sous la relation suivante :

$$D_s = I_g \sqrt{A} = 11.81 \sqrt{2650} = 607.95$$

Tableau 3: Classification de relief selon Orostrom.

Relief	Valeur de Ds (m)
Très faible	$DS < 10$
Faible	$10 < DS < 25$
Assez faible	$25 < DS < 50$
Modéré	$50 < DS < 100$
Assez forte	$100 < DS < 250$
Forte	$250 < DS < 500$
Très forte	$500 > DS$

D'après classification de relief selon Orostrom, Ds est supérieur à 500 don relief est très forte .

Etude du réseau hydrographique :

Le réseau hydrographique se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement. Les oueds et leurs affluents constituent sont squelette fondamental. (Hammeni.N, 2011). Les paramètres essentiels qui régissent le régime hydrologique d'un cours d'eau sont : la densité de drainage (Dd), le rapport de confluence (Rc) et le rapport des longueurs (Rl).

1. Classification de cours d'eau selon Stralher 1957 :

Il existe différentes méthodes de classification. La plus classique est la méthode de Stralher. Dans cette méthode, on commence par affecter l'ordre 1 aux plus petits éléments (ruisseaux ou tronçons de réseau), c'est-à-dire ceux situés le plus à l'amont. Lorsque deux éléments d'ordre 1 se rejoignent, ils forment un élément d'ordre 2. Si un

élément d'ordre 1 rejoint un élément d'ordre 2, l'élément résultant reste d'ordre 2. D'une façon générale, deux éléments du même ordre doivent se rejoindre pour former un élément d'ordre supérieur.

Le numéro d'ordre ainsi défini est adimensionnel et il est donc possible de comparer des éléments de même ordre dans des bassins versant différents.

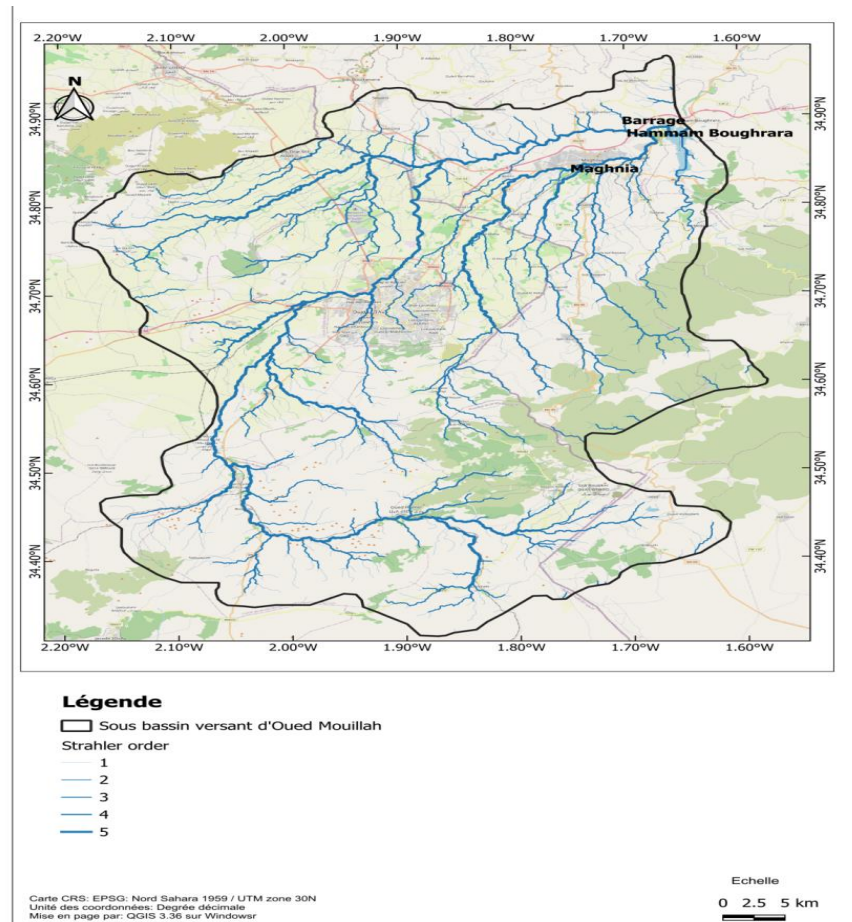


Figure 3: Carte de classification de cours d'eau selon stralher 1957.

2. Les paramètres du réseau hydrographique :

a. Rapport de confluence « Rc » :

Représenté sous la formule suivante :

$$Rc = N_n / N_{(n+1)}$$

Où :

- **Rc** : Rapport de confluence.
- **N_n** : nombre de cours d'eau n.

Tableau 4: Classification des cours d'eau selon stralher.

Ordre	Nombre	Rc
1	1121	$R_{c1}=N_1/N_2=1390/583=1.92$
2	583	$R_{c2}=N_2/N_3=583/302=1.93$
3	302	$R_{c3}=N_3/N_4=302/14=21.57$
4	14	$R_{c4}=N_4/N_5=14/1=14$
5	1	
Rc		$(R_{c1}+R_{c2}+R_{c3}+R_{c4})/4=(1.92+1.93+21.57+14)/4=9.81$

Rc est supérieur à 5 donc le sous bassin est allongé, avec une vallée étroite et pointue.

b. Rapport des longueurs « R_L » :

Défini par la formule suivante :

$$R_L = L_n / L_{(n-1)}$$

Où :

- **R_L** : Rapport des longueurs.
- **L_n** : Longueur moyenne de cours d'eau d'ordre n.

Tableau 5: Classification des longueurs des cours d'eau.

Ordre	Longueur	R _L
1	1210.07	
2	591.84	$R_{L2}=L_2/L_1=591.84/1210.07=0.48$
3	287.74	$R_{L3}=L_3/L_2=287.74/591.84=0.49$
4	119.52	$R_{L4}=L_4/L_3=119.52/287.74=0.41$
5	127.40	$R_{L5}=L_5/L_4=127.40/119.52=1.08$
RL		$(0.48+0.49+0.41+1.08)/4=0.62$

c. Densité de drainage « Dd » :

En hydrogéologie, il est bien connu que plus le réseau de drainage est dense, plus le ruissellement est important et par conséquent il y a moins d'eau disponible pour la recharge des aquifères (Shaban,2003 ;2006).

Par l'extraction du réseau hydrographique et l'utilisation de l'outil « kernel density » dans le logiciel Arc Map 10.8 nous avons obtenu la carte de densité de drainage.

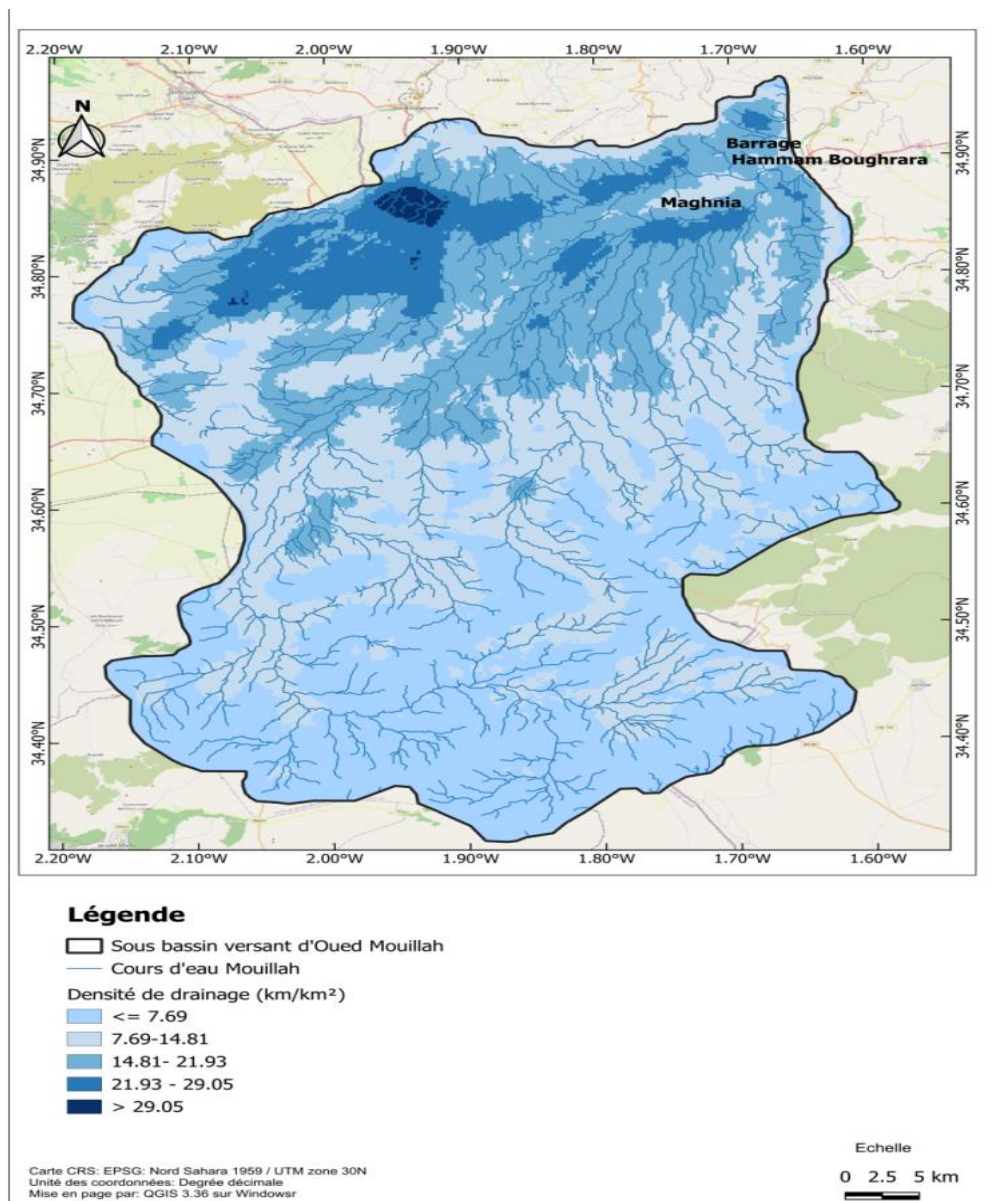


Figure 4: Carte de densité de drainage de sous bassin versant d'Oued Mouillah.

La densité de drainage se classe en 5 classes:

- **Les zones de densité $\leq 7.69 \text{ km/km}^2$** : sont des zones où le relief est faible, ce qui indique une faible densité de drainage, par conséquent les terrains sont perméables favorisant l'infiltration.
- **Densité entre (7.69 – 14.81 km/km^2)** : Une augmentation du drainage, indiquant des terrains perméables ou peu accidentés et favorisent l'infiltration avec un ruissellement très faible.
- **Densité entre (14.81 – 21.93)** : Le réseau hydrographique est plus développé , indiquant une diminution de l'infiltration avec un écoulement important dans le sous bassin.
- **Densité entre (21.93 – 29.05 km/km^2)** : les zones de densité forte indiquant un réseau hydrographique plus dense et le relief est plus faible où les terrains sont imperméables, donc sont des zones qui favorisent le ruissellement et réduisent l'infiltration.
- **Densité $> 29.05 \text{ km/km}^2$** : le réseau hydrographique très dense favorise l'écoulement rapide de l'eau de surface, réduisant l'infiltration.

Etude d'occupation du sol :

L'occupation du sol est parmi les facteurs qui influent sur le processus d'infiltration d'eau dans les aquifères et les nappes. La figure ci-dessous représente la carte d'occupation du sol dans le sous bassin versant d'Oued Mouillah digitalisée dans le logiciel QGIS.

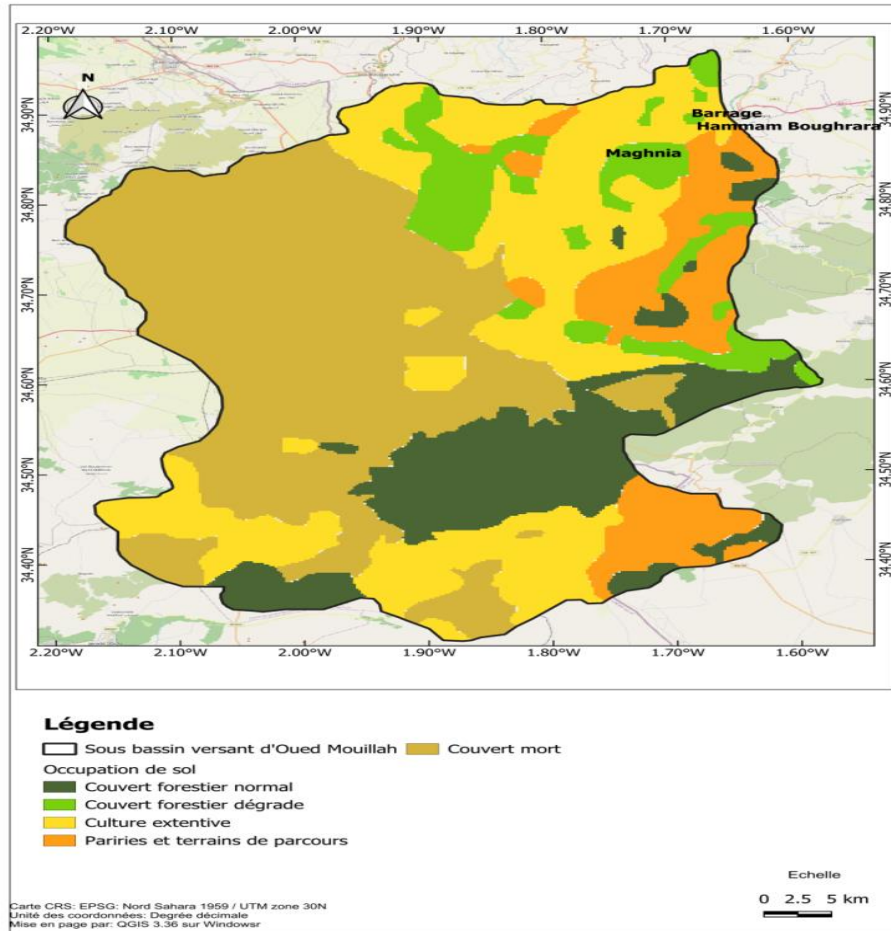


Figure 5: Carte d'occupation de sol de sous bassin versant d'Oued Mouillah.

La figure montre que la surface du sous bassin est caractérisé par cinq types d'occupation du sol:

- **Couvert forestier normal** : représenté essentiellement par les forêts et les maquis denses n'ayant subi aucune dégradation, que ce soit par l'action de l'homme (pâturage sauvage, déboisement) ou par l'effet des incendies (**Bouanani,A, 2004**). Cette zone favorise le ruissellement d'eau dans la surface du sous bassin.
- **Couvert forestier dégradé** : sont rassemblés sous ce thème les maquis et les forêts clairs, les zones en cours de reboisement, les forêts et les maquis dégradés par l'utilisation excessive du sous-sol forestier, le pâturage sauvage et irrationnel compromettant la rénovation, le déboisement intégral pour installer d'autres cultures et les effets des incendies (**Bouanani.A, 2004**). Dans ces zones l'infiltration est favorable, par conséquent le potentiel de recharge est augmenté.

- **Cultures extensives** : sont des cultures annuelles, par exemple les céréales et les cultures maraîchères.
- **Prairies et terrains de pacage** : représentés par les surfaces qui sont utilisées pour la plupart en pâturage direct des animaux, les terres occupées par l'alfa et la lavande (**Bouanani.A, 2004**). Le potentiel d'infiltration et le ruissellement d'eau sont en équilibre.
- **Couvert mort** : sont désignés par ce terme tous les terrains sur lesquels n'est présente aucune forme de végétation ou de culture utilisable, rendu nu par l'érosion ou par d'autres formes de dégradation (**Bouanani.A, 2004**), sont des zones les plus favorables par l'infiltration.

II. CLIMATOLOGIE :

La climatologie est la science qui étudie les phénomènes climatologiques à long terme. Elle observe, mesure et analyse les éléments du climat (température, pluie, vent, humidité, etc.) pour comprendre leur comportement dans le temps et dans l'espace.

L'objectif de cette étude est de déterminer le régime climatique de la zone d'étude (sous bassin versant d'Oued Mouillah) à travers les analyses des variations annuelles, mensuelles et saisonnières des paramètres climatiques. L'étude climatologique est indispensable pour examiner la recharge des nappes phréatiques.

Pour cette étude nous avons utilisé les données enregistrées à la station climatologique de Maghnia (1990-2024).

Tableau 6: Situation géographique de la station climatologique de Maghnia.

Station	Longitude	Latitude	Altitude (m)
Maghnia	1°46'58.51''O	34°48'42.31''N	421

❖ Etude des paramètres climatologiques :**1. Les précipitations :**

Les précipitations constituent la composante fondamentale de l'hydrologie et la connaissance de cet apport d'eau au sol est essentielle pour appréhender l'état des réserves en eau du sol, la recharge des nappes et le régime des cours d'eau. La mesure de la hauteur des précipitations en un point donné est la mesure hydrologique la plus simple, ce qui explique qu'il en existe un nombre considérable à la surface du globe ; c'est même quelquefois la seule donnée hydrologique dont on puisse disposer (<https://shs.cairn.info/hydrologie-continentale>).

La figure 08 représente une carte des précipitations du sous bassin versant d'Oued Mouillah, elle est cartographiée à partir de données des précipitations moyennes annuelles de plusieurs points répartis dans la surface du sous bassin. Ces données sont intégrées dans Arcmap 10.8 et par la méthode d'interpolation IDW, nous avons obtenu cette carte.

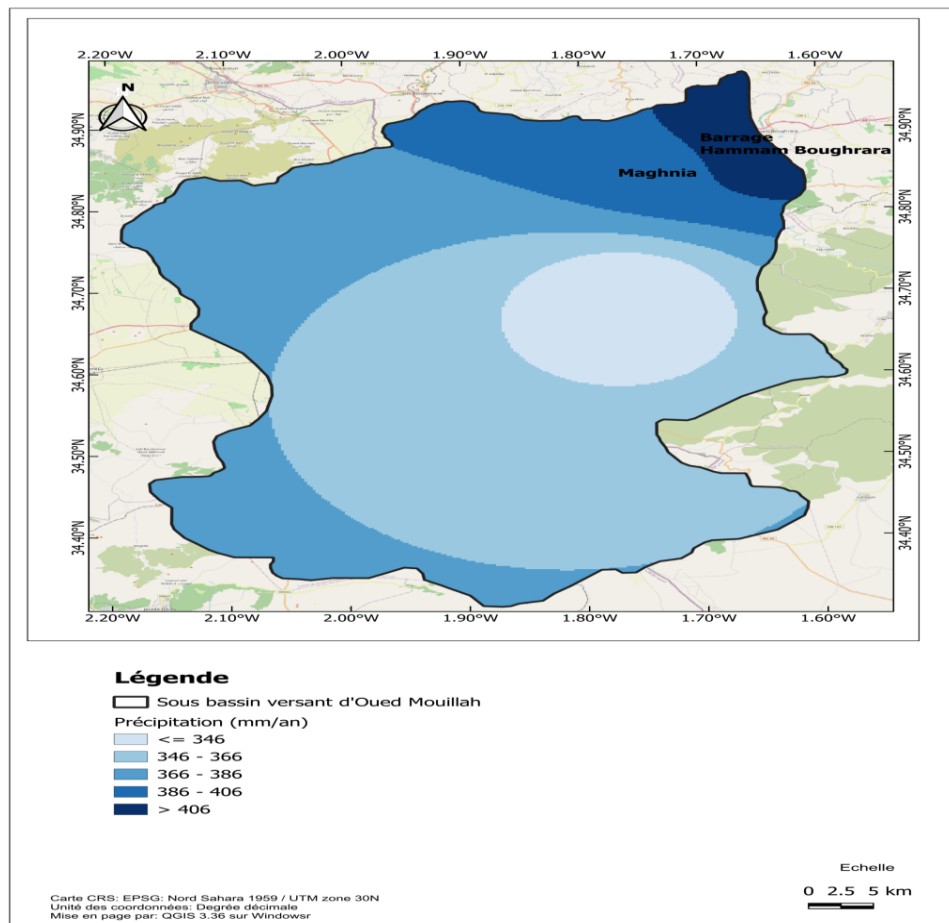


Figure 6: Carte des précipitations de sous bassin versant d'Oued Mouillah

A. Variations des précipitations moyennes annuelles :

Les précipitations moyennes annuelles enregistrées dans la station de Maghnia sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 7: Précipitations moyennes annuelles.

Période	P (mm)	Période	P (mm)
1990/1991	357.9	2008/2009	448
1991/1992	442.5	2009/2010	430
1992/1993	246.3	2010/2011	347
1993/1994	331.1	2011/2012	242
1994/1995	263.4	2012/2013	271
1995/1996	548.7	2013/2014	272
1996/1997	354.6	2014/2015	447.1
1997/1998	429.6	2015/2016	158.5
1999/2000	221.1	2016/2017	276.4
2000/2001	200.6	2017/2018	259
2001/2002	368.8	2018/2019	387
2002/2003	339.9	2019/2020	303.5
2003/2004	340.8	2020/2021	235
2004/2005	176.3	2021/2022	269
2005/2006	247	2022/2023	163
2006/2007	235	2023/2024	184
2007/2008	214	/	/
Précipitation moyenne annuelle	301.6 (mm)		

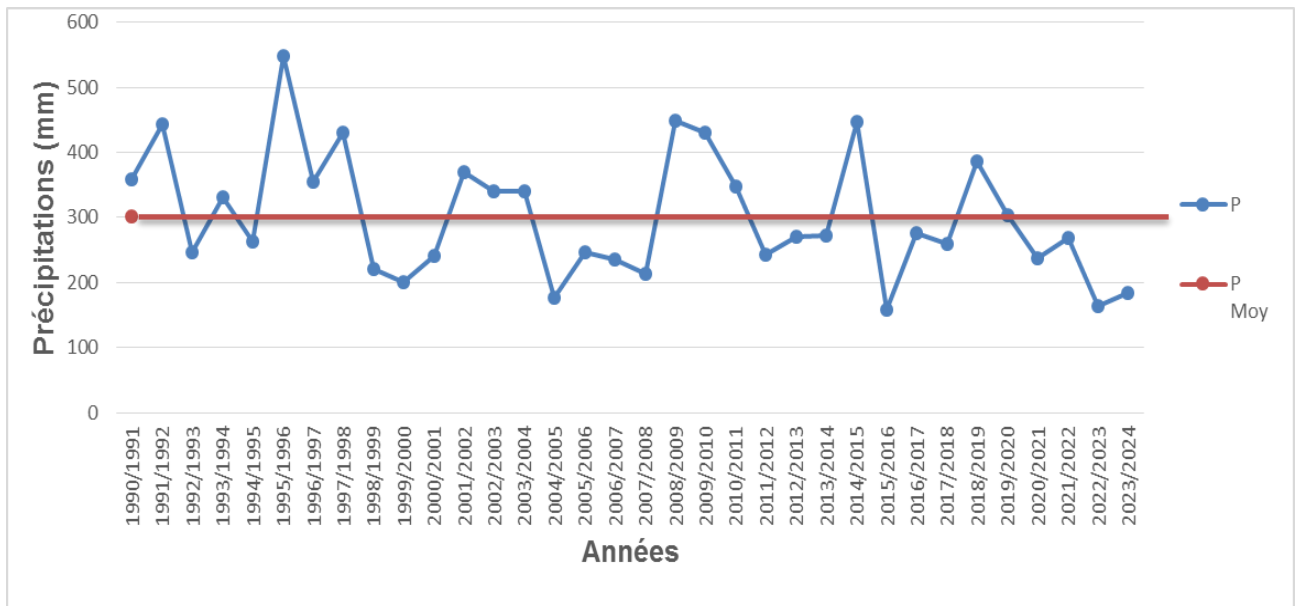


Figure 7 : Variation des précipitations moyennes annuelles a la station Maghnia (1990 - 2024).

D’après la courbe des variations des précipitations moyennes annuelles à la station climatologique de Maghnia, nous remarquons que :

- La valeur maximale est enregistrée en 1995 avec 548.7 mm
- La valeur minimale est enregistrée en 2015 avec 158.5 mm
- La valeur moyenne inter- annuelle des précipitations est de 301.56 mm

B. Les précipitations moyennes mensuelles :

Tableau 8: Précipitations moyennes mensuelles (1990 – 2024).

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	AT
P (mm)	18.5	24.5	37.5	32.3	41.3	30.7	36.7	34.7	28.8	8.9	1.8	5.8

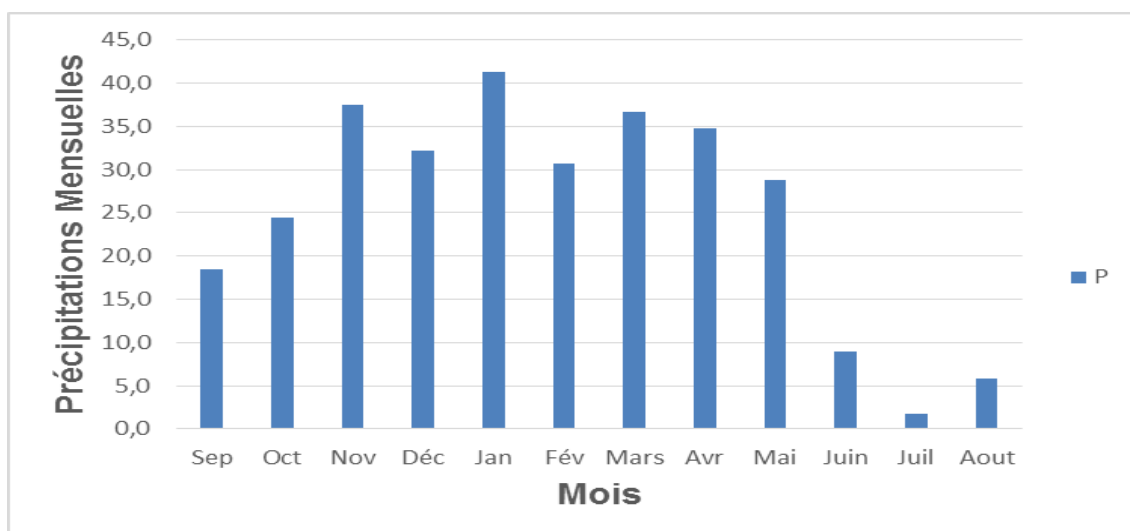


Figure 8 : Variation des précipitations moyennes mensuelles (1990 - 2024).

La figure montre que le mois de janvier est le plus humide avec une valeur de 41.3 mm, et pour l'été, le mois de juillet est le plus sec, avec une valeur de 1.8 mm.

C. Les précipitations saisonnières :

L'année est composée par quatre saisons :

Automne : Septembre, Octobre, Novembre

Hiver : Décembre, Janvier, Février

Printemps : Mars, Avril, Mai

Été : Juin, Juillet, Août

Tableau 9: Les précipitations saisonnières.

Saisons	Automne	Hiver	Printemps	Été
P (mm)	80.5	104.3	100.2	16.5

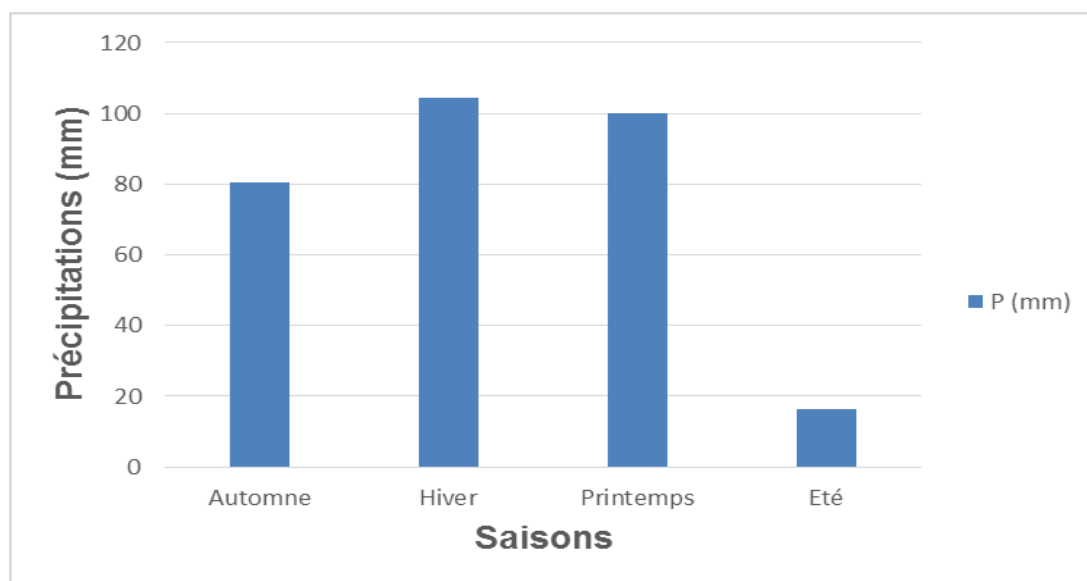


Figure 9: Variation des précipitations saisonnières.

Les variations des précipitations saisonnières montrent que la saison la plus humide est l'hiver (104.3 mm), suivie par printemps et automne, et la saison la plus sèche est l'été (16.5mm).

2. Les températures :

La température est un facteur très essentiel pour l'étude climatologique, elle contribue à l'évaporation.

A. Les températures moyennes, maximales et minimales :

Tableau 10: Valeurs des températures mensuelles moyennes, maximales et minimales.

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	AT	Moyenne
T max	29.5	25.4	20.3	17.4	16.3	17.5	20	22.4	25.9	30.4	34.5	34.8	24.5
T min	16.7	13.1	9.1	6.3	4.8	5.8	7.6	9.3	12.7	16.4	19.6	20.3	11.8
T moy	23.1	19.2	14.7	11.8	10.5	11.7	13.8	15.9	19.3	23.4	27	27.6	18.2

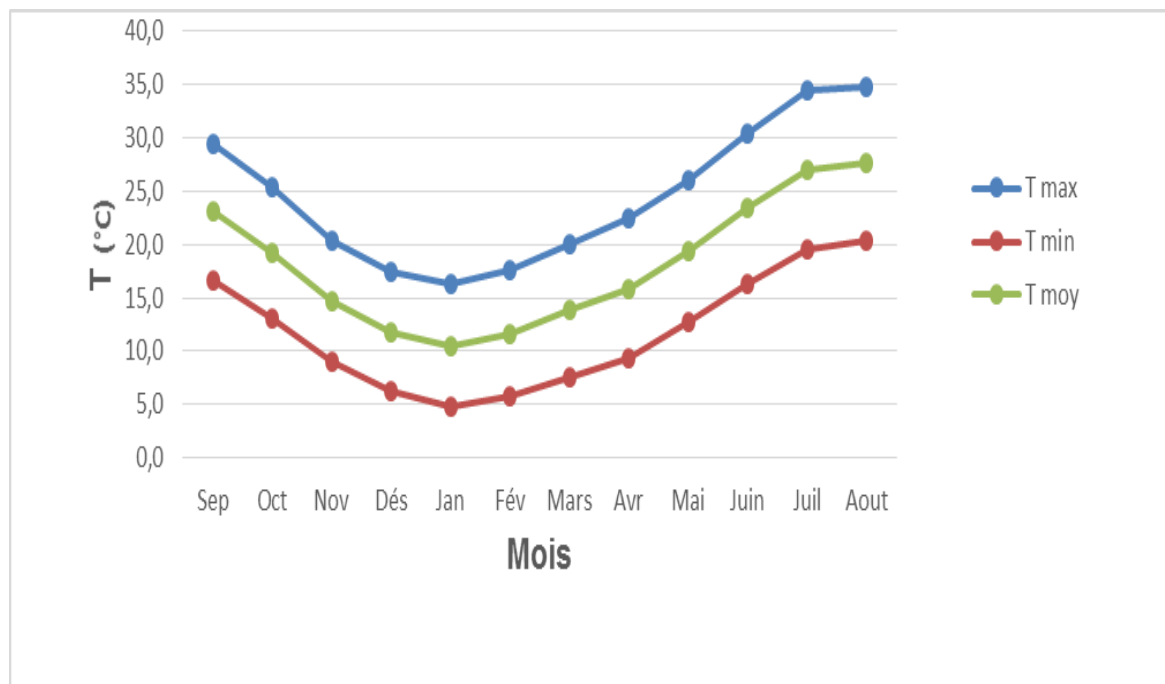


Figure 10: Températures moyennes mensuelles, maximales et minimales de station de Maghnia.

Les courbes des températures moyennes mensuelles nous montre que les mois de juillet et août enregistrent des températures moyennes les plus élevées (27°C et 27.6°C respectivement). Tandis que la température moyenne minimale est enregistrée en janvier (4.8°C) et la température moyenne maximale est enregistrée en août (34.8°C). La température moyenne mensuelle est de (18.2°C).

3. L'étude du climat :

Le but de cette étude est de déterminer le type du climat de la région, à partir des données de précipitations et des températures enregistrées à la station climatologique de Maghnia, pour réaliser l'étude nous avons utilisé :

- ❖ Des méthodes de visualisation, qui permet de déceler les périodes sèches et les périodes humides.
- ❖ Calculs des indices climatiques annuels et mensuels à partir des données climatologiques.

3.1. Méthodes de visualisation (Méthodes graphiques) :

La courbe de Bagnouls et Gaussen est un outil graphique utilisé en climatologie pour représenter les relations entre les températures moyennes mensuelles et les précipitations moyennes. Elle est représentée par deux courbes (T et P) liées par la relation suivante :

$$P=2T$$

- La période sèche ou déficitaire (**P.D**) est déterminée lorsque la courbe des températures passe dessus de la courbe des précipitations : nous avons une période sèche.
- La période humide ou excédentaire (**P.E**) est déterminée lorsque la courbe des précipitations est au-dessus de celle des températures ; période humide.

Tableau 11: Précipitations et Températures moyennes mensuelles à la station de Maghnia (1990-2024).

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	AT
P (mm)	18.5	24.5	37.5	32.3	41.3	30.7	36.7	34.7	28.8	8.9	1.8	5.8
T (°C)	23.1	19.2	14.7	11.8	10.8	11.7	13.8	15.9	19.3	23.4	27	27.6

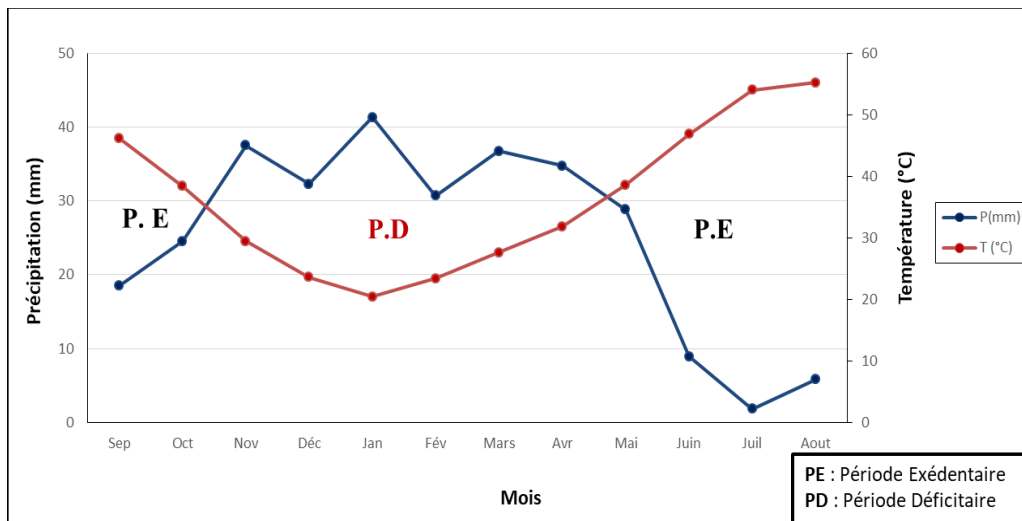


Figure 11: Digramme pluviothermique de Bagnouls et Gaussen.

A partir le digramme nous remarquons que :

- **La période déficitaire (P.D)** : s'observe du début de mois d'octobre à la fin de mois d'avril.
- **La période excédentaire (P.E)** : s'étale sur les autres mois de l'année.

3.2. Les indices climatiques :

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

C'est un indicateur utile pour caractériser le phénomène d'aridité, est défini comme le rapport entre la hauteur moyenne des précipitations et la moyenne des températures.

- **Indice d'aridité annuelle :**

Il est représenté par l'équation suivante :

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

- **P** : Précipitations moyennes annuelles (mm).
- **T** : Températures moyennes annuelles (°C).
- **I_a** : Indice d'aridité annuel.

Tableau 12: Indice d'aridité de DE Martonne.

P (mm)	T (°C)	I _a
301.6	18.2	10.7

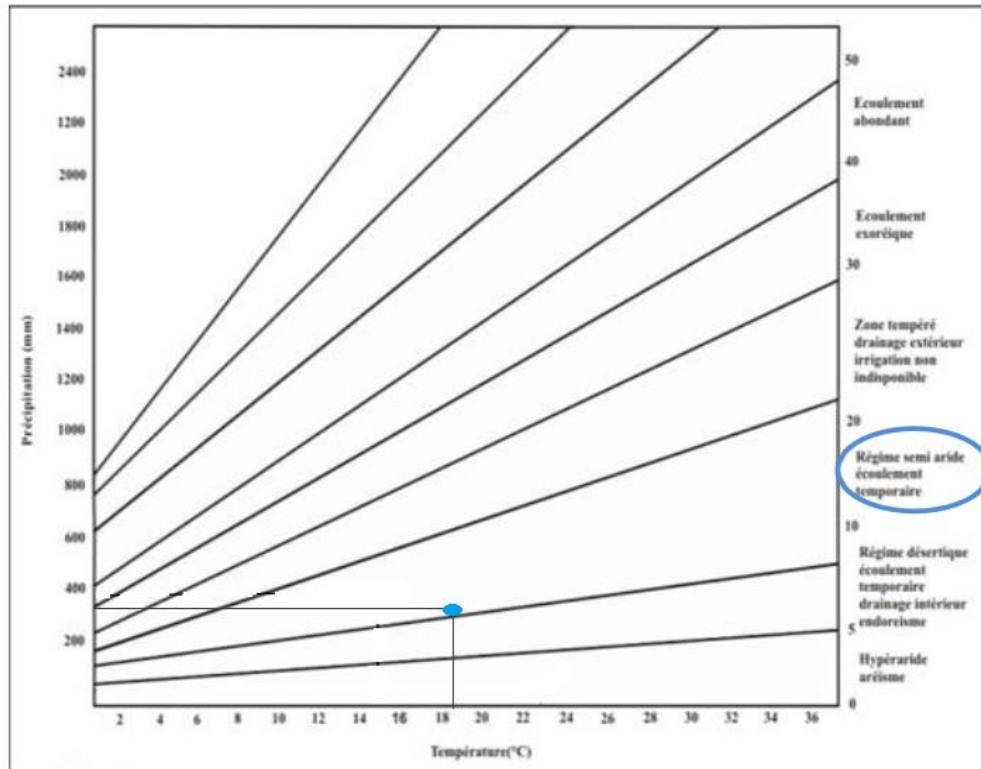


Figure 12: Abaque de l'indice d'aridité annuel.

Tableau 13: Classification de DE Martonne.

Valeur de I	Type de climat
$I > 50$	Climat équatorial et montagnard
$20 < I < 50$	Froid tempéré ou tropical
$10 < I < 20$	<i>Climat semi-aride</i>
$5 < I < 10$	Climat désertique
$I < 5$	Climat hyper-aride

Le calcul de l'indice d'aridité annuel de DE Martonne a donné la valeur de (10.7) elle est comprise entre $10 < I < 20$, la zone étudiée indique un climat **semi-aride**, à écoulement temporaire

❖ **Indice d'aridité mensuel :**

Il est représenté par la formule suivante :

$$I_m = \frac{12P}{t+10}$$

Où :

- **P** : Précipitations moyennes mensuelles (mm).
- **T** : Températures moyennes mensuelles (°C).
- **I_m** : Indice d'aridité mensuelle.

Tableau 14: Indices d'aridité mensuelles de DE Martonne.

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	AT
I	6.7	10.1	15.2	17.8	23.8	16.9	18.5	16.1	11.8	3.2	0.6	1.85
Type	D	S	S	S	T	S	S	S	S	Ha	Ha	Ha

Avec les types du climat :

T: Tempéré.

D: Désertique.

S: Semi-aride.

Ha: Hyper-arid

❖ **Climagramme d'EMBERGER:**

L'indice d'Emberger (1932) définit le degré d'humidité du climat. Il permet de déterminer l'étage bioclimatique d'une station donnée à partir la relation suivante :

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

- **P** : Précipitations moyennes annuelles (mm).
- **M** : Moyenne des maxima de la température en (°K) du mois le plus chaud (Août : $34.8^\circ + 273 = 307.8^\circ\text{K}$).
- **m** : Moyenne des minima de la température en (°K) du mois le plus froid (janvier : $4.8^\circ\text{C} + 273 = 277.8^\circ\text{K}$).

- Q_2 : Quotient pluvio-thermique d'Emberger.

Avec : $K = T (^{\circ}C) + 273$

Le report des paramètres climatiques (m, Q_2) sur le diagramme d'Emberger nous a montré que le climat de la région est **semi-aride** (voir tableau n° 15).

Tableau 15: Indice d'Emberger.

P (mm)	M ($^{\circ}k$)	m ($^{\circ}k$)	Q_2
301.6	307.8	277.8	34.3

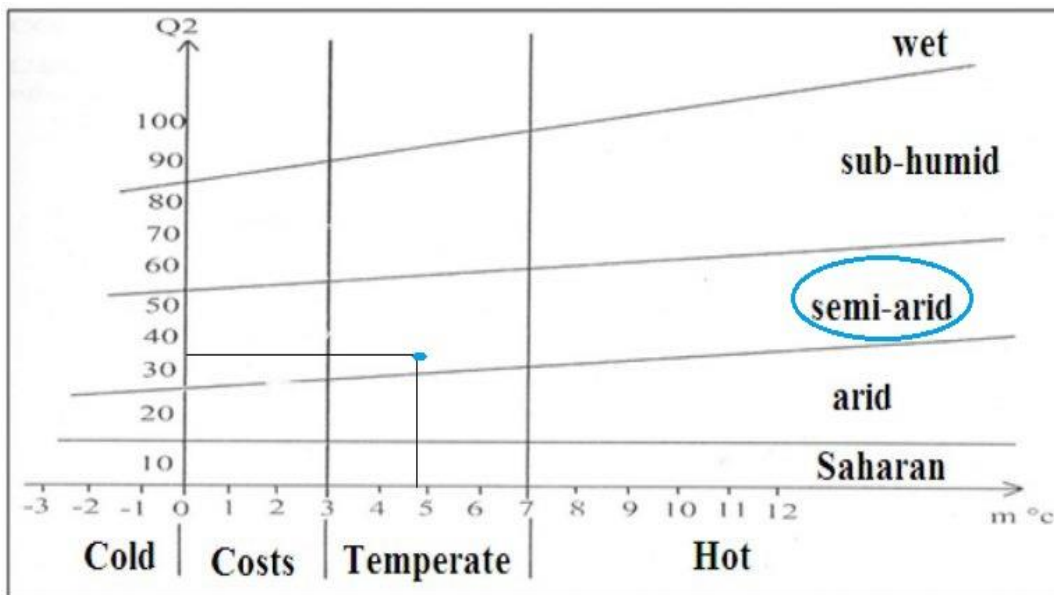


Figure 13: Climagramme d'Emberger.

❖ **Indice de Stewart :**

Il représenté par la formule suivante :

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

Avec :

- Q_2 : Quotient d'Emberger.
- P : Précipitations moyennes annuelles.

- **M** : Moyenne des températures maximales quotidiennes du mois le plus chaud Août (34.8°C).
- **m** : Moyenne des températures minimales quotidiennes du le mois le plus froid Janvier (4.8°C).

Tableau 16: Classification de l'indice Q_2 .

Valeur de Q_2	Type de climat
$10 < Q_2 < 50$	Climat semi-aride
$2 < Q_2 < 10$	Climat désertique
$Q_2 < 2$	Climat insaturé

L'application des paramètres climatiques sur l'équation de l'indice de Stewart a donné un $Q_2 = 26.1$, et d'après le tableau n° 16 le climat de la zone d'étude est **semi-aride**.

4. Bilan Hydrologique :

Le bilan hydrologique est une évaluation qui sert à quantifier l'eau disponible dans une zone d'étude (bassin versant), en considérant les entrées et les sorties d'eau. C'est un instrument crucial dans les domaines de la climatologie, de l'hydrologie, de l'agriculture et de la gestion hydraulique.

Formule générale du bilan hydrologique :

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

Où :

- **P** = Précipitations (pluie, neige).
- **ETR** = Évapotranspiration réelle (évaporation + transpiration des plantes).
- **R** = Ruissellement (eaux de surface).
- ΔS = Variation des stocks (sol, nappes phréatiques).

❖ **Evapotranspiration et déficit d'écoulement :**

- **Evapotranspiration :** C'est le retour de l'eau à l'atmosphère à partir d'un sol ou par l'intermédiaire des végétaux. Il existe deux types d'évapotranspiration qui sont les suivants :

- ✓ **L'évapotranspiration potentielle :** est la quantité d'eau qui serait évaporée ou transpirée à partir d'un bassin versant si l'eau est disponible.
- ✓ **L'évapotranspiration réelle :** la quantité d'eau évaporée ou transpirée réellement par le sol, les végétaux et les surfaces libres d'un bassin versant.

- ❖ **Déficit d'écoulement :** différence entre la lame d'eau précipitée sur un bassin versant et la lame d'eau écoulée à son exutoire pendant un temps donné (généralement l'année).

4.1. L'évapotranspiration réelle ETR :

Pour l'estimation d'ETR, il y a plusieurs méthodes :

- La méthode de TURC.
- La méthode de COUTAGINE.
- La méthode de VERDEIL.
- La méthode de WUNDT.

a. Méthode de TURC (1954) :

La méthode de TURC 1954 permet d'évaluer l'ETR par la formule suivante :

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

Avec :

- **P :** Précipitations moyennes annuelles (mm).
- **T :** Température moyenne annuelle (°C).
- **ETR :** Evapotranspiration réelle annuelle (mm/an).
- Et $L = 300 + 25T + 0.05T^3$.

Tableau 17: Calcul de l'ETR par la méthode de TURC.

Station	P(mm)	T(°C)	L	ETR (mm/an)	Ecoulement et infiltration (mm) (P- ETR)
Maghnia	301.6	18.2	1056.4	304.4	-

L'application de la formule de TURC nous a montré que les précipitations moyennes annuelles sont inférieures à l'ETR. Donc la méthode de TURC n'est pas applicable dans notre cas.

b. Méthode de COUTANGE :

Le calcul de l'évapotranspiration réelle ou déficit d'écoulement se fait par la formule suivante :

$$\text{ETR} = D = P - \lambda \cdot P^2 \text{ Avec } \lambda = 1 / (0.8 + 0.14T). \text{ Où}$$

- **D** : Déficit d'écoulement en (mm/an).
- **P** : Précipitations moyennes annuelles (mm).
- **T** : Température moyenne annuelle (°C).

λ Désigne un facteur dépendant de la température moyenne annuelle.

Remarque :

Pour la station de Maghnia, les données utilisées sont (P=301.6mm et T= 18.2°C).

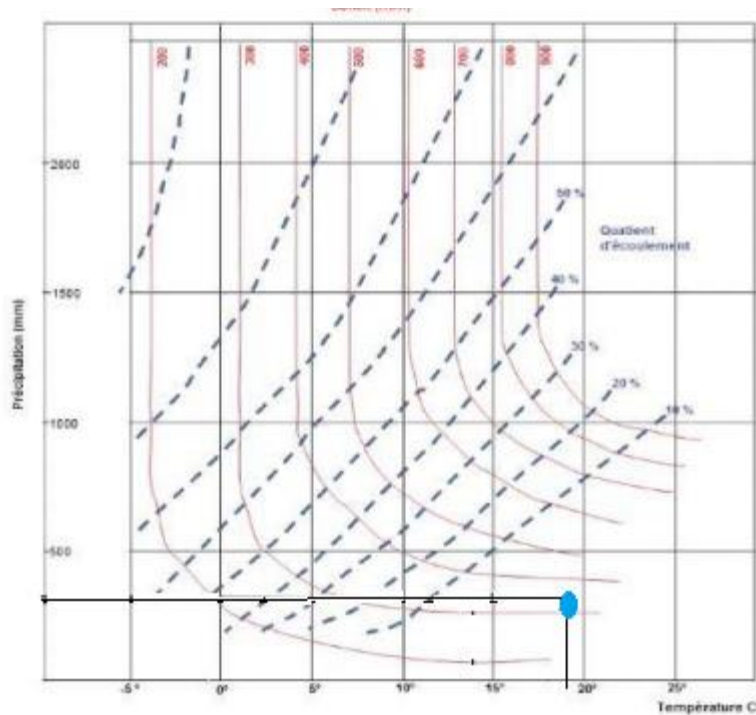
Cette formule n'est pas applicable que pour P compris entre $1/8 < P < 1/2$, $0.0378 < 0.301 < 0.151$ donc la méthode n'est pas applicable.

c. Méthode de WUNDT :

Le report des paramètres (T,P) sur l'abaque de WUNDT nous a montré que le Caution d'écoulement est inférieur à 10%.

Tableau 18: Valeur du déficit d'écoulement d'après WUNDT.

Station	P (mm)	T (°C)	D (mm/an)
Maghnia	301.6	18.2	310

**Figure 14: Détermination du déficit d'écoulement (Abaque de WUNDT).****d. Méthode de P.VERDEIL :**

P.Verdeil (1988) a établie en 1988 en Algérie un abaque bi-logarithmique pour les régions semi-arides, en ne considérant que les précipitations moyennes annuelles.

Les résultats de cette méthode sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 19: Valeur du déficit d'écoulement d'après P.VERDEIL.

Précipitations (mm)	Déficit (mm/an)	Écoulement et infiltration (mm)
301.6	290	11.6

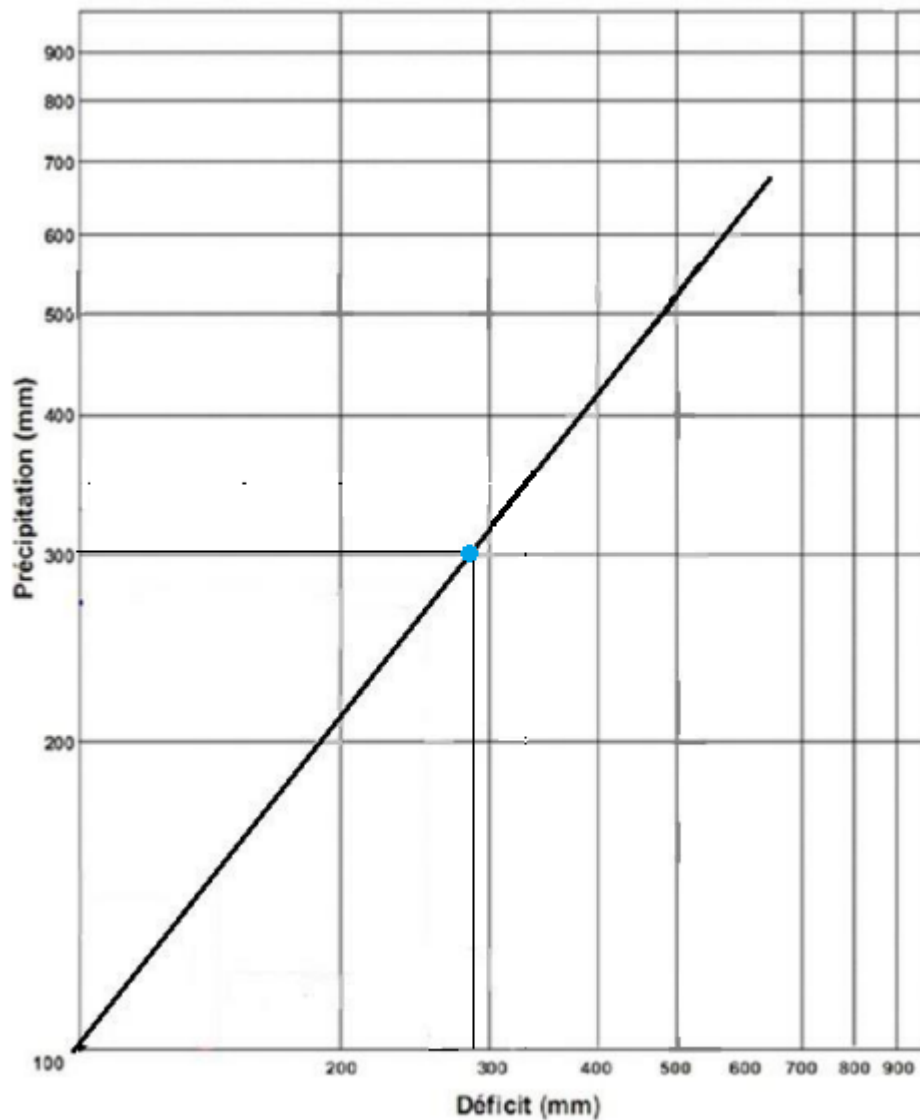


Figure 15: Abaque pour le calcul de déficit d'écoulement en Algérie (P.VERDEIL, 1988).

4.2. Evapotranspiration potentielle ETP :

- Méthode de THORNTHWAITE :

Dans cette méthode on doit calculer ETP non corrigée et ETP corrigée par les formules suivantes :

- ETP non corrigée = $16\left(\frac{T}{I} \times 10\right)^a$ avec : $a=0.016I+0.5$
- ETP corrigée = $16\left(\frac{T}{I} \times 10\right)^a \times K$

Où :

- **ETP** : Evapotranspiration potentielle (mm)
- **i**: Indice thermique mensuelle AVEC $i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1.514}$
- **I** : La somme des indices mensuelles des 12 mois de l'année
- **T** : Température moyenne mensuelle du chaque moi considéré en °C .
- **K**: Coefficient de correction, en fonction de la latitude de station climatologique de Maghnia (34°).

Tableau 20: Valeurs de l'ETP corrigée à la station de Maghnia (1990 - 2024).

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	Annuel
T (°C)	23.1	19.2	14.7	11.8	10.5	11.7	13.8	15.9	19.3	23.4	27	27.6	18.2
I	10.1	7.7	5.1	3.7	3.1	3.6	4.7	5.8	7.7	10.3	12.8	13.2	87.8
ETP non corrigée	100.43	70.67	42.55	28.02	22.45	27.57	37.73	49.39	71.37	102.29	135.08	140.84	
K	1.03	0.97	0.87	0.86	0.88	0.85	1.03	1.09	1.20	1.20	1.22	1.16	
ETP corrigée	103.44	68.54	37.01	24.09	19.75	23.43	38.86	53.83	85.64	122.74	164.79	163.37	905.49

4.3. Evapotranspiration réelle :

On peut calculer l'évapotranspiration réelle par rapport le réserves d'eau disponibles, il existe deux cas :

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

4.3.1. Réserve facilement utilisable (R.F.U) :

D'après des études antérieures portées sur la région de Maghnia, la réserve d'eau utile (RU) est égale à 90 mm.

D'après le tableau cité-ci-dessous, la totalité des précipitations est reprise par l'évapotranspiration réelle ($P=ETR=301,6$) et par conséquent le ruissellement et l'écoulement de surface sont nulles selon la méthode de THORNTHWAITE :

Tableau 21: Calcul du bilan hydrologique de la station de Maghnia (1990 - 2024).

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	Moyenne annuelle
P (mm)	18,5	24,5	37,5	32,3	41,3	30,7	36,7	34,7	28,8	8,9	1,8	5,8	301,6
EIP (mm)	103,44	68,54	37,01	24,09	19,75	23,43	38,86	53,83	85,64	122,74	164,79	163,37	905,5
RU (90mm)	0	0	0,49	8,7	30,25	37,52	35,36	16,23	0	0	0	0	128,6
EIR (mm)	18,5	24,5	37,01	24,09	19,75	23,43	38,86	53,83	45,03	8,9	1,8	5,8	301,6
D.A (mm)	84,94	44,04	0	0	0	0	0	0	40,61	113,84	162,99	157,57	604,0
Exc (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
E (mm)	0	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	0,0

Conclusion :

En conclusion, l'étude des différentes caractéristiques physiques, topographiques, réseau hydrographique et l'occupation du sol, indiquant que le sous bassin versant d'Oued Mouillah est caractérisé par une forme allongée car l'indice Kc est 1.25 et un relief forte (Ds > 500 m) avec un réseau hydrographique important et diversité des types des sols dans la surface de sous bassin. Toutes ces caractéristiques influencent la recharge d'eau dans le sous bassin versant d'Oued Mouillah.

L'étude climatologique de la zone étudiée, nous a permis de conclure que le sous bassin versant d'Oued Mouillah a un climat semi-aride. Les précipitations moyennes annuelles sont de 301.6 mm et la température moyenne mensuelle est de 18.2°C. la température moyenne maximale est enregistrée au mois d'Août (34.8°C) et la température moyenne minimale est enregistrée au mois de février (4.8°C).

Les courbes pluvio-thermiques de Bagnouls et Gausse ont permis de déterminer une période déficitaire, allant de début de mois d'octobre à la fin du mois d'avril, et une période excédentaire qui s'étale sur les autres mois de l'année.

Les méthodes graphiques et les indices, par exemple l'indice annuel de DE Martonne et le climagramme d'Emberger nous a montré que l'étage bioclimatique est semi-aride.

Les calculs du bilan hydrologique montrent les valeurs suivantes :

- Evapotranspiration potentielle est de 905.5mm.
- Evapotranspiration réelle est de 301.6mm.
- Déficit agricole est de 604,0mm.

CHAPITRE II :
LA GEOLOGIE ET HYDROGEOLOGIE

I. Introduction :

L'analyse géologique et hydrogéologique est essentielle pour la gestion durable des ressources en eau, particulièrement dans les régions où cette ressource est précieuse et parfois rare, car elle permet d'explorer les caractéristiques du sous-sol pour comprendre la répartition, la qualité et la disponibilité des eaux souterraines. Cette compréhension approfondie est cruciale pour éviter la surexploitation et préserver les écosystèmes aquatiques. De plus, elle facilite l'identification des zones vulnérables à la pollution, permettant ainsi de mettre en place des mesures de protection adaptées. En intégrant ces données, les décideurs peuvent optimiser l'utilisation de l'eau, tout en garantissant sa pérennité pour les générations futures.

L'étude géologique et hydrogéologique portée sur le sous bassin versant de « OUED MOUILLAH » a permis d'identifier ce qui suit:

II. La géologie :

• La plaine de Maghnia :

Il s'agit d'une dépression néogène et quaternaire qui sépare le massif des Traras des Monts de Tlemcen. Elle est séparée en deux par le petit massif jurassique situé au Nord de Maghnia.

1. La série lithologique :

La géologie de notre zone d'étude est très complexe. L'analyse litho-stratigraphique des terrains rencontrés est du Primaire jusqu'au alluvions récents (Plio-Quaternaire) :

1.1. Paléozoïque

• Primaire :

Visible dans le bassin de l'Oued Mouillah au niveau des Monts de Ghar Roubane à l'Ouest et les Monts de Fillaoucène à l'Est (**Bouanani.A , 2004**), Il est représenté par :

a) -Formations schisto-quartzitiques:

D'âge Silurien à Dévonien, il s'agit de formations fortement plissées recouvrant une grande surface. A Rhar-Roubane et Djebel Fillaoucène, les schistes sont alternés avec des quartzites très compacts en bancs décimétriques.

b) - Granite :

Le massif granitique est situé immédiatement au NE de la ville de Nédroma. Il est de forme elliptique et de couleur blanchâtre à rosâtre.

c) - Auréole de métamorphisme :

L'intrusion granitique développe une auréole de métamorphisme dans la formation schisto-quartzitique. On y trouve des cornéennes, des schistes à andalousites et des schistes tachetés.

- **Carbonifère viséen :** Représenté également par des schistes rubéfiés.

1.2. Le Mésozoïque :

- **Trias :**

Représenté par des argiles plus ou moins dolomitiques et gypseuses et des marnes bariolées fortement teintées. Cette formation du Trias est traversée par des pointements d'Ophites, d'âge plus récent (Jurassique ou Crétacé) et la formation s'accompagnant d'un léger métamorphisme (**Baba Hamed.K ,2001**).

- **Jurassique :**

- Jurassique inférieur :**

Représenté par les séries du Lias visibles au niveau de Ghar-Roubane, on y distingue du bas vers le haut :

a) Lias inférieur :

Il s'agit de calcaires avec des passées dolomitiques affleurant dans la zone de Sidi El Abed au Sud de Ghar Rouban (**Lucas.G, 1942**).

b) Lias moyen :

Il est représenté par des calcaires compacts épais et des dolomies massives et épaisses. On l'observe dans la bordure orientale du Fillaoucène et des Monts de Tlemcen.

c) Lias supérieur: représenté par :

Toarcien : dans cet étage la sédimentation est marquée par la succession des séquences alternantes marnes-calcaires, d'épaisseur inégale au niveau des Monts de Tlemcen. Le

Toarcien prend le nom de « calcaires à oolithes de Belaich » et est bien représenté dans le horst de Ghar-Rouban à Djebel Belaich et dans le Djorf El Hendya. Il affleure sous forme assez particulière qui est « L'ammonitico - Rosso », dans la bordure orientale des Traras et de la chaîne de Fillaoucène (notamment au Djebel Sekika) et atteint une épaisseur de 20m (**Benhamou.M, 1983**).

Jurassique moyen: représenté par

a) Aaléno-Bajocien :

(Dolomies de Deglène) d'épaisseur moyenne de 26m, représenté par des bancs décimétriques de calcaires oolithiques surmontés par des dolomies massives beiges et cristallines (**Mahi,M, 2023**).

b) Bathonien inférieur et moyen :

Cette formation montre une variation d'épaisseur et de faciès. Elle est représenté des calcaires sous forme de bancs centimétriques à décimétriques gris foncés à verdâtres, affleurant aux Monts de Ghar-Roubane (**Mahi.M, 2023**).

Jurassique supérieur :

a) Callovo-Oxfordien :

Il est constitué de sédiments fins, d'argiles, de pelites et de grès. Cette formation est présente dans tout le massif des Traras, avec une épaisseur variant entre 100 m au Nord et 250 m au Sud. Connu sous le nom « Argiles de Saïda » dans les Monts de Tlemcen et des Traras, ce sol est essentiellement marneux avec quelques passées gréseuses à la base. Il offre parfois une transition assez progressive aux grès de Boumédiène.

b) Oxfordien supérieur :

Le massif de Maghnia est composé d'une épaisse formation où alternance des barres de grès, des pelites argileuses ocre ou verdâtres.

Dans la chaîne de Fillaoucène, une formation gréseuse d'une épaisseur de 300 à 500 mètres comprend des grès, des argiles et des calcaires.

c) Kimméridgien :

La formation du massif de Maghnia est surmontée par un ensemble dolomitique, contenant des lentilles calcaires fossilifères, une barre de calcaires d'une centaine de mètres d'épaisseurs est visible à Béni- Mishel.

d) Oxfordien supérieur-Kimméridgien inférieur (Grès de Boumediène) :

C'est un ensemble à dominances gréseuses, avec passées argileuses masquées le plus souvent par des éboulis ou de la végétation. Ces grès se caractérisent par un ciment calcaire, ils sont représentés par des bancs durs, leur épaisseur est variable ou elle peut atteindre les 500m. Ils sont de couleur brune, ferrugineux en surface et blanc roux parfois grisâtre à la cassure (Mahi.M, 2023).

e) Kimméridgien supérieur :

Ils sont formés par les calcaires de Zarifet qui superposent les grès de Boumediène. Ce sont des bancs de calcaires séparés par de minces couches, la base du Kimméridgien étant partout très nette, et qui reposent directement en concordance sur les grès, formant les falaises des environs de Tlemcen (Mahi.M, 2023).

f) Kimméridgien Terminal : présenté par :

Tithonique inférieur :(Dolomies de Terni) cette formation est composée par des dolomies vacuolaires avec de nombreuses stratifications obliques et un aspect très massif, qui permet de bien les distinguer des Dolomies de Tlemcen.

Tithonique supérieur :(marno-calcaire de Hariga) c'est une alternance de calcaires et de marnes plus ou moins tendre, il s'agit des micrites bien litées à une couleur grise claire à la patine. Elles sont bien exposées au niveau de Djebel Hariga

1.3. Le Cénozoïque :

Le Cénozoïque dans notre zone d'étude est représenté par le Miocène et le pliocène.

Miocène : Débute par des conglomérats d'épaisseurs variables empruntant leur matériel aux formations anciennes primaires et secondaires, Ce sont les témoins de l'intense érosion qui affectait un substratum à relief accentué. Le Nord du Djebel Fillaoucène est occupé par des marnes sableuses jaunes pourront passer à des calcaires sableuses.

Au Sud de l'Oued Mouillah, la plaine de Maghnia règne sur toute la zone miocène, formée par des grès ; plus on s'éloigne, plus le pourcentage d'argiles augmente .Au delà de la périphérie des affleurements jurassiques, il n'y a que des cailloux récents avec une croûte calcaire à la surface du Plio- Quaternaire.

Le Pliocène: est composé par des marnes sableuses, des conglomérats, des calcaires lacustres, et des marnes gypseuses (**Harouat.M, et Benmadjahed.A, 2020**).

1.4. Le Plio-Quaternaire :

Cette formation est composée de sédiments continentaux d'âge relativement comparable et de nature variable (**Mahi.M, 2023**). On y rencontre les faciès suivants :

- Des marnes avec peu ou pas de galets, plus ou moins tufeuses, parfois très épaisses, surtout au niveau du bassin de l'Oued El Abbès (affluent d'Oued Mehaguène ; plaine de Maghnia).
- Les limons, sables et graviers récents qui s'étendent entre Oued Mehaguène et Châabet El Arneb au Nord-Est de la frontière algéro-marocaine. Les limons présentent une couleur jaune avec des couches rougeâtres et des galets en lits à leur base.
- Quelques lambeaux de basaltes inter-stratifiés, témoins d'une activité volcanique, sont également présents au Nord-Ouest de la plaine de Maghnia.

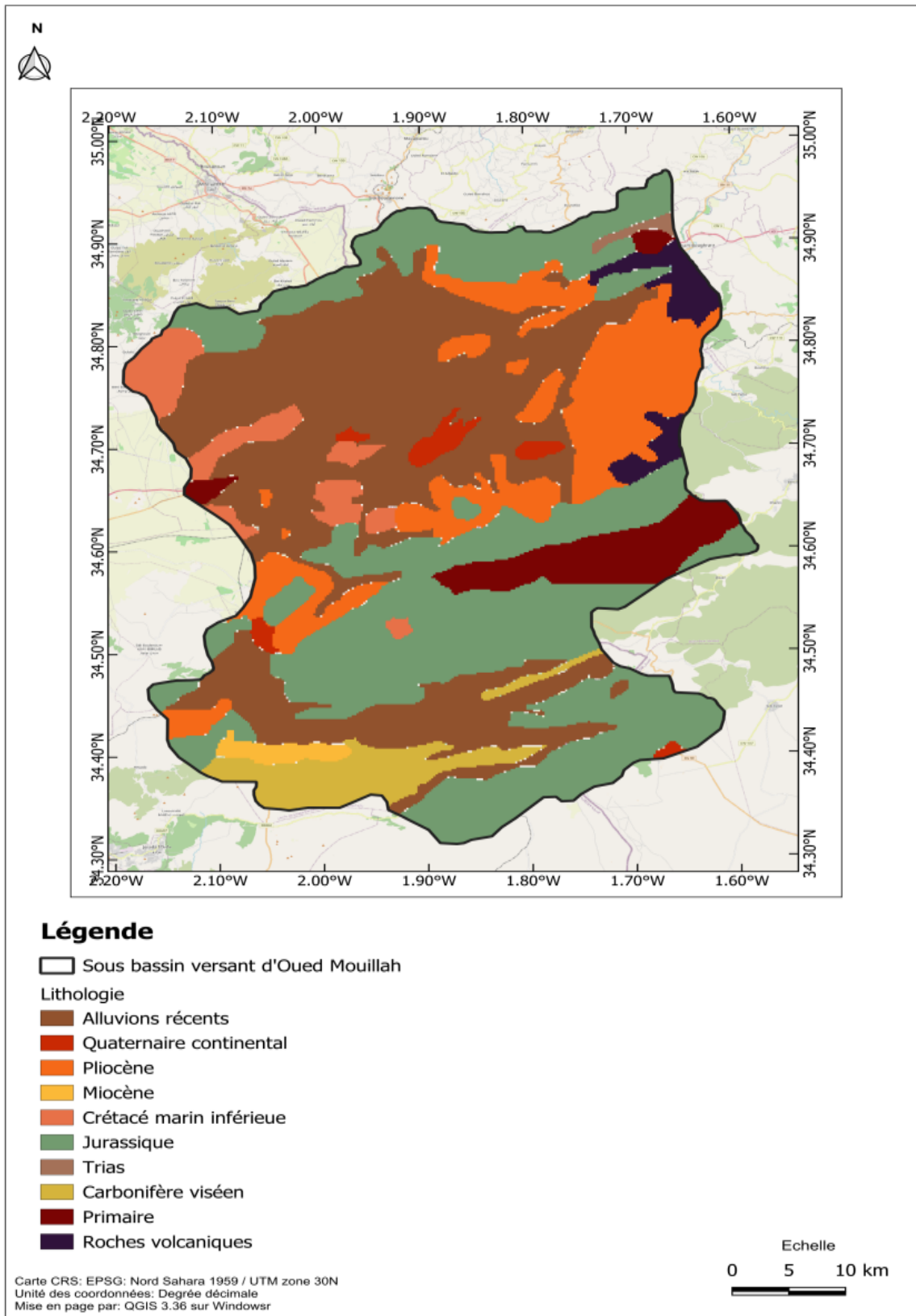


Figure 16: Carte géologique de sous bassin versant d'Oued Mouillah.

III. Etude Structurale de la région:

Le Horst de Ghar-Roubane s'allonge en une bande étroite, de 5 à 8 km vers l'Est, à partir de la frontière algéro-marocaine sur 25- 30 km. Au Nord et au Sud, il confine aux structures en grabens par l'intermédiaire d'un système de failles parallèles. Le seuil de Fernane subdivise selon un axe médian, le horst en deux parties : orientale et occidentale (**Sonarem 1978, 1979 in Mahbon.M et Mimouni.D, 2014**).

D'après (**Lucas.G, 1942**), la frontière algéro-marocaine du Nord au Sud englobe une succession de horsts et grabens, comme suit :

- Pli de Tenouchfi.
- La zone abaissée de la plaine de Maghnia.
- L'anticlinal de Djebel El Hamra.
- Une zone synclinale : les Monts du Kef.
- Une zone anticlinale : horst de Ghar-Roubane et Béni Bahdel.
- Une zone synclinale : Ras Asfour.
- Une zone anticlinale : les horsts occidentaux, Tounzait et plaine de Sebdou.
- Une zone synclinale : chaînons de Koudiat El Debar.
- Une zone soulevée : la plaine de Magoura.
- Une zone affaissée par gradins étagée dans Sidi El Abed.

1. Activités tectoniques :

L'analyse tectonique portée sur la zone d'étude a décelé deux types de déformations (**Harouat.M, 2020**) :

- **Tectonique souple :**

Ghar-Roubane est composé de trois plis kilométriques :

- Le pli de Koudiat Ezzerga, de direction N55° qui se prolonge jusqu'au Nord-Ouest de Tlemcen.
- Le pli de Tenouchfi, de direction N55° qui se prolonge à l'Est de Tlemcen.
- Le pli croiseur de Béni Bahdel, de direction N15°.

Notons que, LUCAS (1952) a considéré la direction N15° comme un accident dû au refoulement de couches vers l'extérieur, au cours de la montée verticale du socle profond.

- **Tectonique cassante :**

Les failles dans la région ont des orientations bien définies. Elles ont joué à plusieurs reprises et présentent les orientations suivantes :

- Décrochements sénestres à pendage très fort, de direction N120°.
- Décrochement dextres direction N110°-N140°, à pendage très fort.
- Grandes failles bordières des horsts, de direction N85° et de pendage généralement très fort 70° et 90°.
- Failles verticales, de direction N55° (concourant avec les précédentes pour limiter les Horsts).

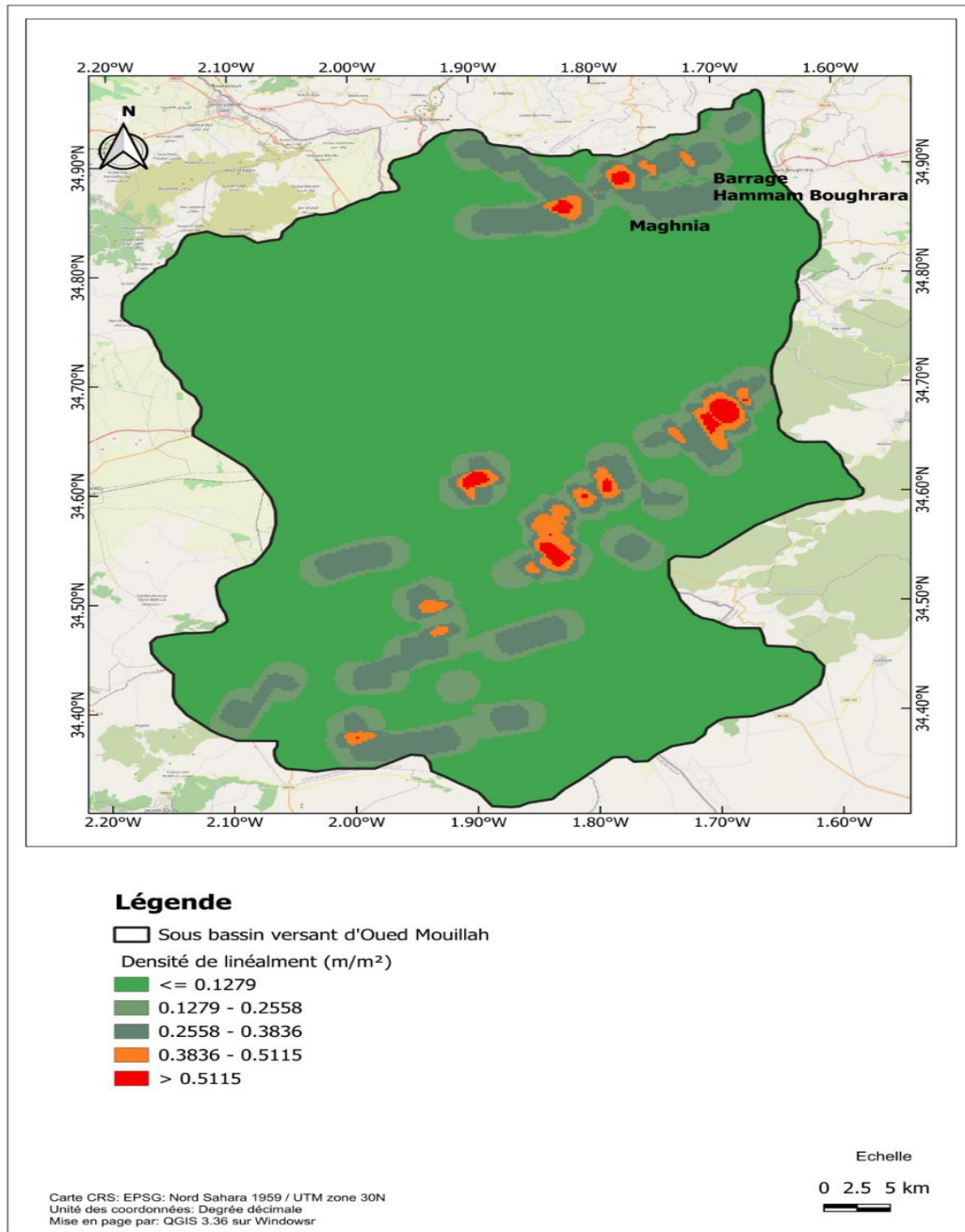


Figure 17: Carte de densité des linéaments de sous bassin versant d'Oued Mouillah.

Dans cette carte nous avons remarquons que il existé 5 classes de densité des linéaments sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau 22: Les classes de densité des linéaments.

<i>Les classes de densité des linéaments</i>	<i>Type des linéaments</i>
≤ 0.1279	Très faible
0.1273 – 0.2558	Faible
0.2558 – 0.3838	Moyenne
0.3838 – 0.5115	Forte
> 0.5115	Très forte

IV. L'hydrogéologie :

L'analyse géologique a permis d'identifier les aquifères qu'abritent la zone d'étude (voir tab n°23):

1. Description des formations perméables / imperméables :

- **Marno-calcaire de Hariga :**

La formation se compose d'une succession de marnes et de calcaires. Les marnes, qui contiennent beaucoup d'argile, sont habituellement peu perméables, tandis que la perméabilité des calcaires peut fluctuer selon leur niveau de fissuration ou de karstification.

Cette diversité lithologique conduit à une perméabilité générale de modérée à faible, restreignant la capacité de la formation à retenir et véhiculer l'eau souterraine.

- **Les dolomies et les calcaires du Kimméridgien :**

Les dolomies de Terni et les calcaires de Zarifet sont considérés comme des aquifères lorsqu'ils présentent des fissures. Une grande densité de fractures augmente la perméabilité et conditionne la création d'un réseau de circulation.

- **Les grès de Boumediène :**

Cette formation a été attribuée au Lusitanien par Auclair et Biehler et a été replacée dans l'Oxfordien et le Kimméridgien par Benest.M. Cet aquifère n'est pas isolé du réservoir kimméridgien par un niveau imperméable sus-jacent. On peut parler d'un réservoir unique Lusitanien-Kimméridgien (**Bonnet.M, 1965**).

- **Les argiles de Saida :**

Les argiles de Saida : Elles se réfèrent à des accumulations d'argile et de marne, avec des couches fines devenant gréseuses. Cette formation géologique est associée au Callovo-Oxfordien. C'est un substrat imperméable qui bloque toute infiltration vers les aquifères du Dogger et du Lias.

- **Lias et Dogger :**

Le Lias et le Dogger : Les formations du Lias et du Dogger n'apparaissent qu'à la faveur de deux horsts : GharRoubane et Djebel Tenouchfi. Ces formations sont caractérisées par d'importantes variations latérales de faciès. Des forages hydrauliques et de reconnaissance ont traversé ces formations et ont permis de mettre en évidence les caractéristiques hydrogéologiques. Le Lias inférieur et moyen correspond à des calcaires massifs de plus de 200m d'épaisseur (**Lucas.G, 1942**).

Tableau 23: Les aquifères de sous bassin versant d'Oued Mouillah.

Système	Sous-système	Etages	Lithologie	Formation hydrologique
Jurassique	Supérieur	Kimméridgien	Dolomie à intercalations de calcaires	Aquifères moyennement poreux, ils sont parfois fissurés
		Oxfordien supérieur-Kimméridgien Inférieur	Grès à intercalations d'argiles	
		Callovo-Oxfordien	Argiles de Saida	/
	Moyen	Bathonien inférieur et moyen	Calcaires micro-gréseux	
		Aalénien Bagiocien	Calcaires oolites	
	Inférieur	Supérieur (Toarcien)	Calcaires de Belaiche	
		Domérien	Calcaires compactes et dolomies massives et épaisses	Des formations carbonatées représentées par des aquifères karstiques
		Carixien	Calcaires Dolomitique	
	Trias			Argiles dolomitiques et marnes bariolées

Conclusion :

L'étude géologique et hydrogéologique du sous bassin versant de l'Oued Mouillah révèle une grande variété lithologique et structurale, qui témoigne d'une histoire géodynamique complexe s'étendant du Paléozoïque au Quaternaire. La structure de la région est constituée de formations anciennes (telles que les schistes, quartzites et granites) ainsi que de séries plus récentes (comme les calcaires, marnes, grès et alluvions), qui reflètent diverses épisodes sédimentaires. Du point de vue tectonique, la région se caractérise par des formations en horsts et grabens, accompagnées de plis et failles.

Plusieurs aquifères ont été repérés sur le plan hydrogéologique, en particulier dans les formations du Jurassique (Kimméridgien, Oxfordien, Lias) présentant un intérêt marqué par leur perméabilité changeante, dépendant de la fracturation ou de la karstification. Cependant, certaines autres formations telles que les argiles de Saïda servent de barrières étanches. L'étude de ces attributs aide à saisir le potentiel d'eau souterraine du bassin, crucial pour la gestion pérenne de cette ressource dans la région.

CHAPITRE III :
APPLICATION DU SYSTEME SIG POUR
L'ELABORATION DE LA CARTE DES
POTENTIALITES HYDRIQUES

I. Introduction :

Le système d'information géographique (SIG) est un outil informatique et logiciel conçu pour collecter et analyser des données géographiques ainsi que leurs relations avec les activités humaines (telles que la pollution anthropique) ou les phénomènes naturels (comme les changements climatiques). Le SIG joue un rôle essentiel en hydrogéologie, notamment pour l'exploration, la gestion et la protection des ressources en eau. Son utilisation permet de cartographier les phénomènes impactant les ressources hydriques, tels que les changements climatiques ou la pollution, et de développer des modèles pour planifier l'exploration et optimiser la gestion de ces ressources. Ce chapitre a pour but d'intégrer le SIG dans l'établissement de la carte des potentialités du sous-bassin versant de l'Oued Mouillah, en s'appuyant sur une analyse multicritère intégrant des variables, telles que la géologie, type de sol, couverture végétale, les précipitations.....etc qui influent directement sur la recharge des aquifères.

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

Les systèmes d'information géographique (SIG) sont devenus des outils essentiels dans le domaine de l'hydrologie et de l'hydrogéologie. Ils autorisent le traitement et l'analyse de grandes quantités de données spatiales relatives à l'eau, ce qui facilite la compréhension des processus hydrologiques et la gestion des ressources en eau, tels que:

- **Cartographie et modélisation des eaux de surface :**

Les SIG sont utilisés pour identifier les réseaux hydrographiques, tels que les rivières, les lacs et les zones humides, délimiter les bassins versants et simuler l'écoulement des eaux de surface. Ils permettent d'étudier la topographie, l'occupation des sols et d'autres éléments qui ont un impact sur le mouvement de l'eau.

- **Etude des eaux souterraines :**

Les SIG rendent plus facile la gestion et l'analyse des données sur les eaux souterraines, comme les niveaux piézométriques, la qualité de l'eau et les caractéristiques des aquifères. Ils sont utilisés pour modéliser l'écoulement des eaux souterraines, identifier les zones de recharge et évaluer la vulnérabilité des aquifères à la pollution.

- **Évaluation de la qualité de l'eau :**

Les SIG sont utiles pour inclure des données sur la qualité de l'eau provenant de diverses sources telles que les stations d'échantillonnage, et pour les analyser en relation avec d'autres données et informations spatiales (occupation des sols, sources de pollution). Cela aide à identifier les sources de contamination et à surveiller la propagation des polluants.

- **Gestion intégrée des ressources en eau :**

Les SIG permettent de gérer les ressources en eau en intégrant diverses données et modèles, ce qui facilite une approche globale. Ils sont utilisés pour aider les décideurs à évaluer les compromis entre les différents utilisateurs de l'eau et à élaborer des politiques durables.

III. Méthodes d'évaluation des potentialités hydriques :

L'évaluation des potentialités hydriques implique de déterminer la quantité et la qualité des ressources en eau disponibles dans une zone spécifique. Il y a plusieurs façons d'évaluer les potentialités hydriques, en fonction du type de ressource en eau (eau de surface, eau souterraine) et de l'objectif de l'évaluation. Voici quelques méthodes courantes :

- a) Méthodes hydrogéologiques :** Ces méthodes sont utilisées pour évaluer les ressources en eaux souterraines. Elles consistent à étudier les caractéristiques des aquifères (perméabilité, transmissivité, capacité de stockage), à analyser les données piézométriques et à modéliser l'écoulement des eaux souterraines. Des techniques de forage et d'essai de pompage peuvent être utilisées pour obtenir des informations sur les propriétés des aquifères.
- b) Méthodes hydrologiques :** Ces techniques impliquent l'analyse des données hydrologiques, comme les précipitations, le débit des cours d'eau et l'évapotranspiration, pour estimer la quantité d'eau disponible dans un bassin versant.
- c) Méthodes géophysiques :** Pour étudier la structure du sous-sol et repérer les aquifères, il est possible d'utiliser des méthodes géophysiques comme la sismique, l'électromagnétisme et la gravimétrie. Ces méthodes donnent des informations indirectes sur la présence et l'ampleur des ressources en eaux souterraines.

d) Télédétection : Les images satellitaires et aériennes sont utiles pour cartographier l'utilisation des sols, repérer les plans d'eau et observer les changements dans l'utilisation

des terres. Ces informations sont utiles pour évaluer comment les activités humaines affectent les ressources en eau, et pour repérer les zones potentielles de développement des ressources en eau.

e) SIG : Comme indiqué précédemment, les SIG sont essentiels pour intégrer et analyser les données provenant de diverses sources, afin d'évaluer les potentiels hydriques. Ils aident à visualiser les données spatiales, à modéliser les processus hydrologiques et à prendre des décisions éclairées.

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

1. Outils et données :

a) Outils:

Dans ce travail nous avons utilisés deux outils complémentaires l'un à l'autre : deux logiciels de SIG (QGIS et ArcGIS).

Les logiciels de SIG :

✓ Logiciel QGIS :

QGIS, anciennement connu sous le nom de Quantum GIS, est une application de système d'information géographique (SIG) libre et open-source (gratuit) permettant de visualiser, modifier et analyser des données géo-spatiales.

Le logiciel a été conçu en 2002 et est arrivé à maturité vers 2009-2010. Depuis, son utilisation est exponentielle et aujourd'hui on peut dire que QGIS allie la gratuité à la performance pour devenir une référence dans le monde des SIG (<https://www.qgis.org>).

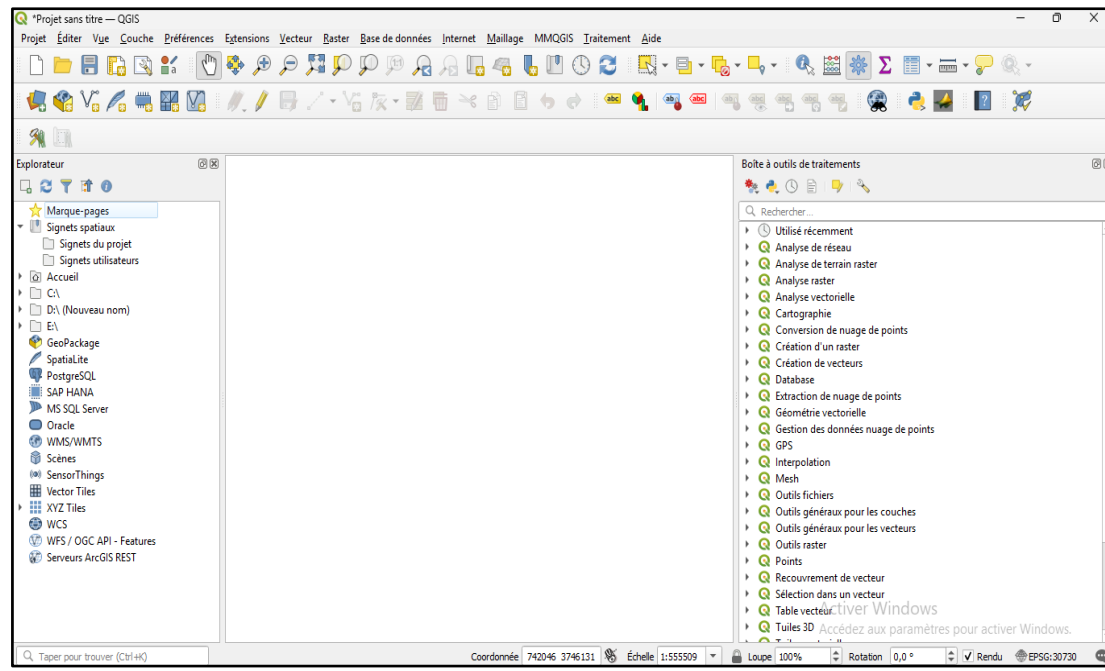


Figure 18: Interface de QGIS 3.36.

✓ **Logiciel ArcGIS :**

ArcGIS est un système complet qui permet de collecter, organiser, gérer, analyser, communiquer et diffuser des informations géographiques. En tant que principale plateforme de développement et d'utilisation des systèmes d'informations géographiques (SIG) au monde, ArcGIS est utilisé par des personnes du monde entier pour mettre les connaissances géographiques au service du gouvernement, des entreprises, de la science, de l'éducation et des médias. ArcGIS permet la publication des informations géographiques, afin qu'elles puissent être accessibles et utilisables par quiconque. Le système est disponible partout au moyen de navigateurs Web, d'appareils mobiles, tels que des smartphones et d'ordinateurs de bureau (<https://resources.arcgis.com/fr/>).

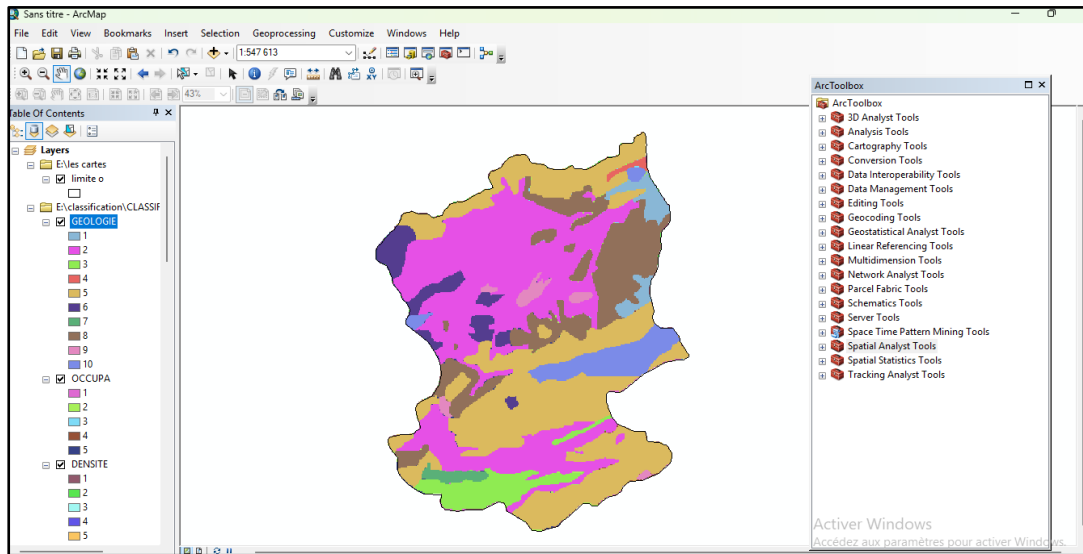


Figure 19: Interface de Arc Map 10.8.

b) Données utilisées :

- **Délimitation de bassin versant :**

La carte de référence de la zone d'étude a été initialement établie par Mr Bouanani.A (2004), puis numérisée à l'aide du logiciel QGIS en utilisant une couche raster préalablement géo-référencée.

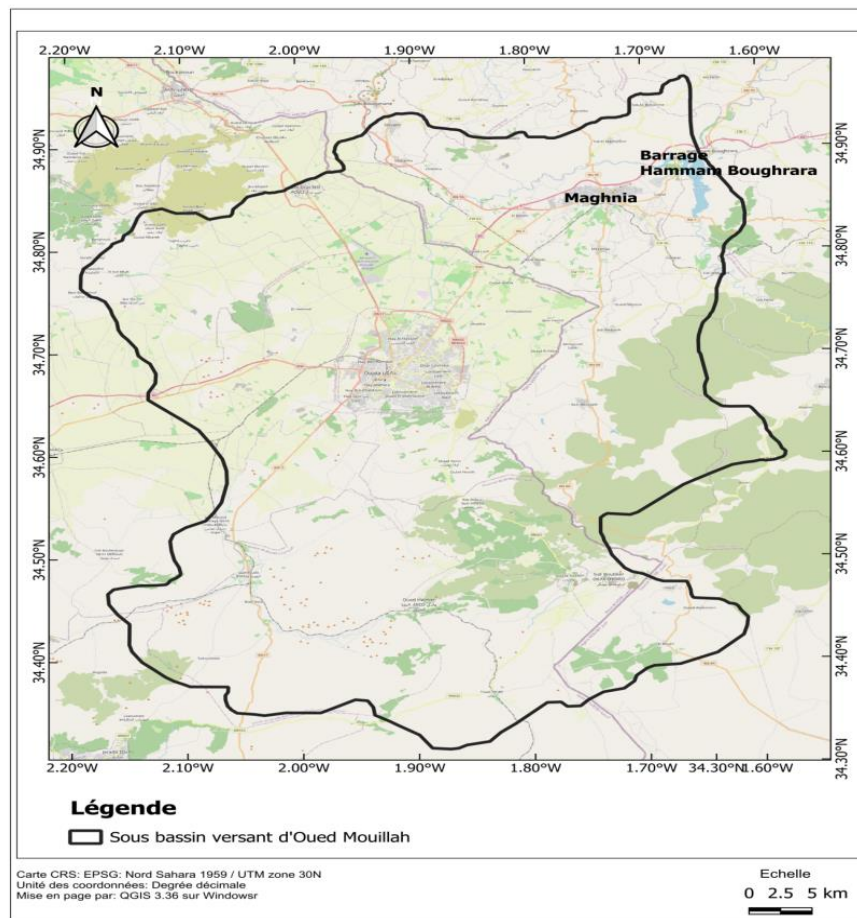


Figure 20: Délimitation de sous bassin versant d'Oued Mouillah.

- **Le modelé MNT :**

Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) constitue une représentation numérique et mathématique détaillée de la topographie terrestre, permettant de caractériser l'altitude de tout point de la surface au sein d'une zone géographique donnée dans un système de référence précis. Cet outil fondamental de l'analyse géographique permet notamment la génération de cartes thématiques essentielles, incluant la représentation des altitudes, l'analyse des pentes et l'évaluation de la densité du réseau de drainage. Cette modélisation numérique du relief joue un rôle crucial dans la compréhension et l'analyse des caractéristiques topographiques du territoire. Le modèle numérique du terrain pour la zone d'étude a révélé ce représente dans fig n° 23 (L'interprétation est dans chapitre I carte des altitudes).

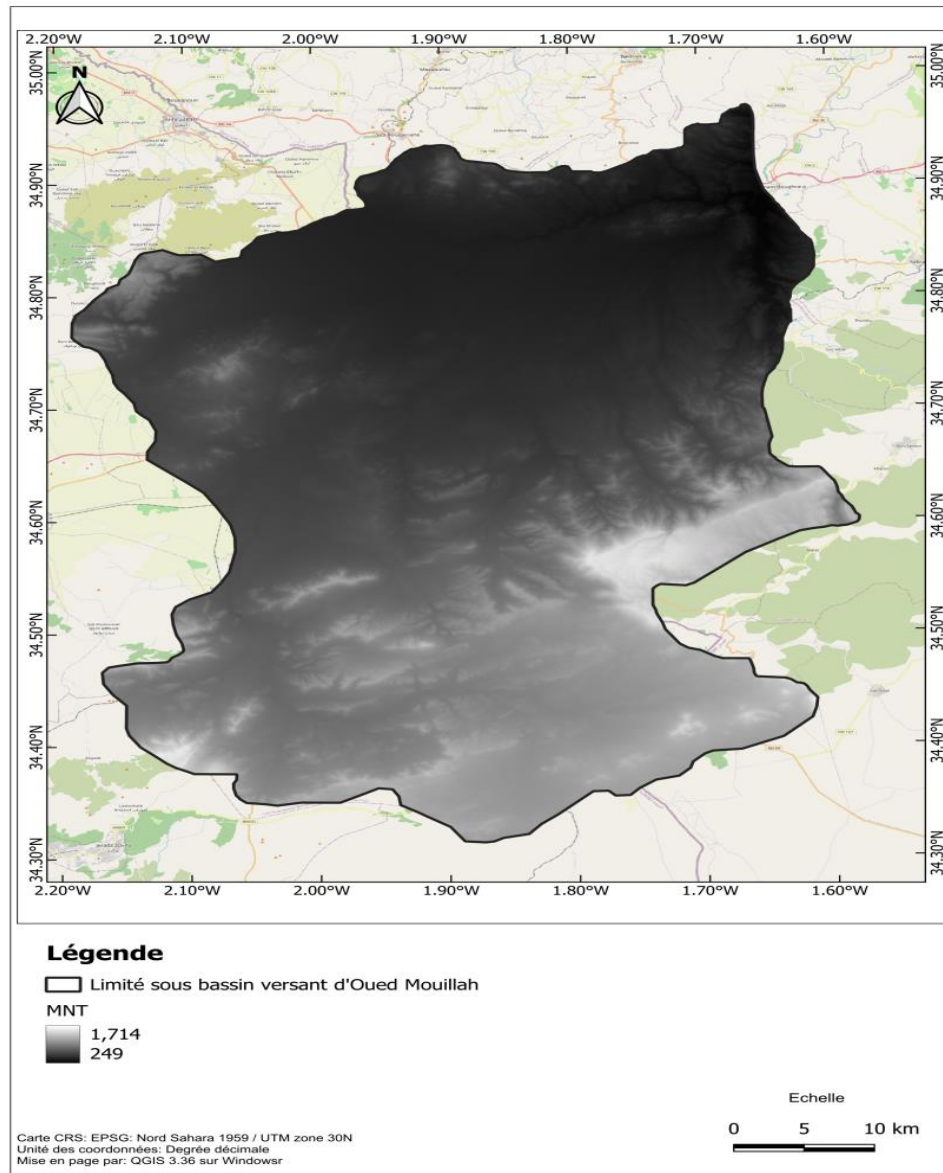


Figure 21: Le MNT de sous bassin d'Oued Mouillah (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

- **Données géologiques :**

La carte géologique de la zone d'étude a été initialement établie par **Bouanani.A (2004)**, puis numérisée à l'aide du logiciel QGIS3.36.

- **Données climatiques (pluviométriques):**

La carte de la répartition spatiale des précipitations moyennes annuelles de la zone d'étude est établie à partir des données fournies par la station météorologique de Maghnia et le site climate Engine (<https://www.climateengine.org>) (Fig n°08 dans le chapitre I).

- **Données d'occupation du sol :**

La carte d'occupation du sol de la zone d'étude a été initialement établie par Bouanani.A (2004), puis numérisée à l'aide du logiciel QGIS3.36.

2. Méthode de travail :

La méthodologie pour établir une carte des potentialités hydriques débute par la collecte et la préparation des données, qui comprend l'identification des paramètres clés (géologiques, topographiques, climatiques, hydrologiques, pédologiques et indices de végétation) ainsi que l'acquisition des données via les images satellitaires, les cartes existantes et les données géophysiques. Le traitement des données dans le SIG se poursuit par la préparation des couches thématiques, incluant la numérisation des cartes, le géo-référencement des données raster, la création du MNT et la génération des cartes dérivées, suivi de la standardisation des données avec la conversion des formats, la reclassification des valeurs et l'harmonisation des projections. L'analyse multicritères s'effectue ensuite à travers la pondération des critères via la méthode AHP et l'intégration des critères par superposition des couches et calcul de l'indice de potentialité hydrique. Enfin, la production de la carte finale implique la classification des potentialités, l'attribution des codes couleur, l'élaboration de la légende et la mise en page complète avec les éléments cartographiques essentiels, la documentation technique et les données. Cette approche méthodologique systématique, s'appuyant sur les SIG et l'analyse multicritères, permet d'obtenir une carte des potentialités hydriques fiable et exploitable, offrant ainsi un outil objectif et reproductible pour l'identification des zones à fort potentiel hydrique.

Enfin, la carte des potentialités hydriques du sous bassin versant d'Oued Mouillah est élaborée selon les démarches suivantes (fig n°24).



Figure 22 : Méthode d'élaboration de la carte des potentialités hydriques dans le sous bassin versant d'Oued Mouillah.

2.1. Cartographie des paramètres :

A. La géologique :

La carte géologique est un outil essentiel en géologie, car elle permet de visualiser la répartition des divers types de roches, structures géologiques et phénomènes géodynamiques à la surface de la Terre. Elle permet d'observer les formations géologiques, leurs âges et leurs propriétés, fournissant ainsi des informations précieuses pour la compréhension des processus géologiques et la gestion des ressources.

- **Collecte des données :**

1. La limité du bassin versant d'Oued Mouillah.
2. La carte géologique (Raster).

- **Charger les données dans QGIS :**

- Couche → Ajoute couche raster → choisir la fiche (carte géologique Bouanani.A, 2004) → Ajouter.

- Dans la carte, on trouve 10 temps géologiques qui sont présents dans la zone d'étude, donc on a créé 10 polygones, chaque polygone représente un temps géologique.
- Pour la projection, on a travaillé avec les coordonnées Nord Sahara 1959/ UTM Zone 30.
- **Digitalisation de grands ensembles lithologiques :**
 - Couche → Créer nouvelle shape file → Ajouter le nom de polygone
 - Cliquer sur option (MMQGIS) → Combine → Merge couche
 - La carte géologique (les polygones) s'affichent sous forme de couche vectorielle.
- **Rastérisation en couche raster :**
 - Raster → Conversion → Rastériser
 - Sélectionner la couche vectorielle
 - Définir une résolution (ex : 100) et choisir unité de raster résultat (Unités géo-référencées).
 - La carte géologique s'affiche sous forme raster.
- **Symbolisation et classification :**
 - Cliquer sur couche raster → Propriétés → symbologie.
 - Type de rendu (Pseudo-couleur à band unique) → Classer → Appliquer → Ok
- **Mise en page et exportation :**
 - Mise en page de la carte : Ajouter une légende, une échelle et un titre.
 - Exportation : Exporter en PDF, PNG, TIFF selon les besoins.

Remarque :

Les polygones sont créés selon les temps géologiques, de plus ancien au plus récent (Voir le tab n° 24).

Tableau 24: Les polygones de carte géologique.

Le temps géologique	Id (numéro de polygone)
Alluvions récents (plus récent)	10
Quaternaire continental	9
Pliocène continental	8
Miocène	7
Crétace marin inférieur	6
Jurassique	5
Trias	4
Carbonifère viséen	3
Primaire	2
Roches volcaniques (plus ancien)	1

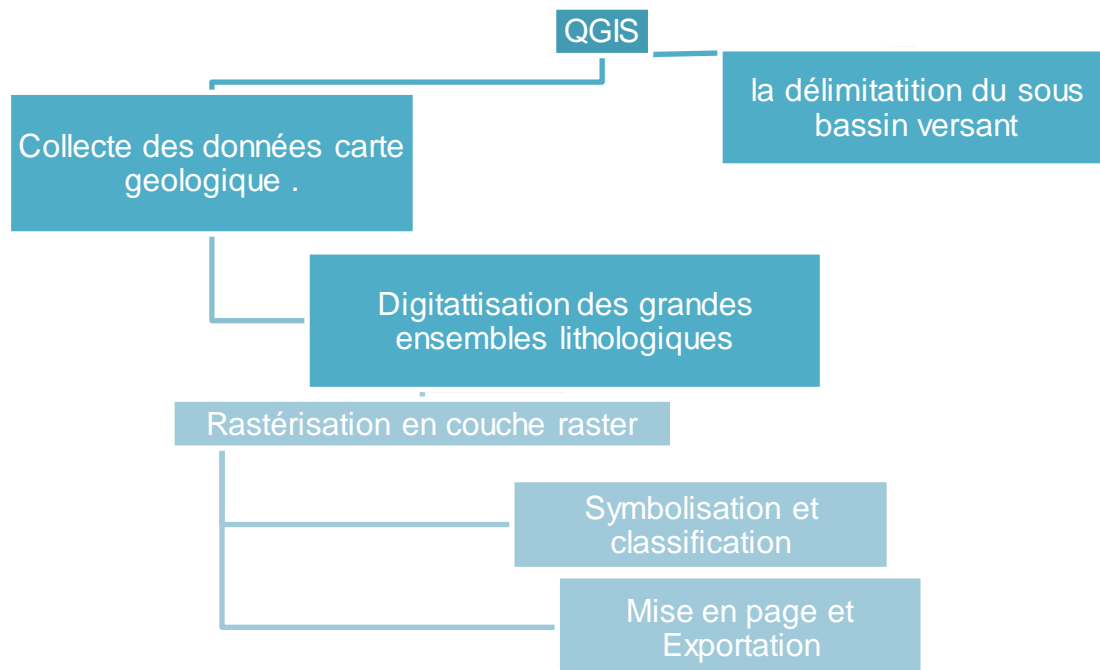


Figure 23: Organigramme pour l'élaboration de la carte géologique (lithologie).

B. Occupation du sol :

La carte d'occupation du sol est un document qui expose la manière dont le sol est occupé ou couvert dans une zone spécifique. Elle présente la répartition des différentes formes d'occupation du sol.

- **Collecte des données :**

1. La limité du bassin versant d'Oued Mouillah.
2. La carte raster d'occupation de sol de Mr Bouanani.A,2004.

- **Charger les données dans QGIS :**

- Couche → Ajouter couche raster → choisir la carte d'occupation du sol (Bouanani, 2004) → Ajouter.
- Dans la couche raster on trouve 5 types d'occupation du sol, donc on a créé 5 polygones.
- Pour la projection, on a travaillé avec les coordonnées Nord Sahara 1959/ UTM Zone 30.

- **Digitalisation des polygones :**

- Couche → Créer nouvelle shapefile → Ajouter le nom de polygone (fig).
- Cliquez sur option (MMQGIS) → Combine → Merge couche.
- La carte géologique (les polygones) s'affiche sous forme de couche vectorielle.

- **Rastérisation en couche raster :**

- Raster → Conversion → Rastériser.
- Sélectionner la couche vectorielle.
- Définir une résolution (ex : 100) et choisir unité de raster résultat (Unités géo-référencées).
- La carte géologique s'affiche sous forme raster.

- **Symbolisation et classification :**

- Cliquer sur la couche raster → Propriétés → symbologie.
- Type de rendu (Pseudo-couleur à band unique) → Classer → Appliquer → Ok.

- **Mise en page et Exportation :**

- Mise en page de la carte : Ajouter une légende, une échelle, un titre.
- Exportation de carte : Exporter en PDF, PNG, TIFF selon les besoins.

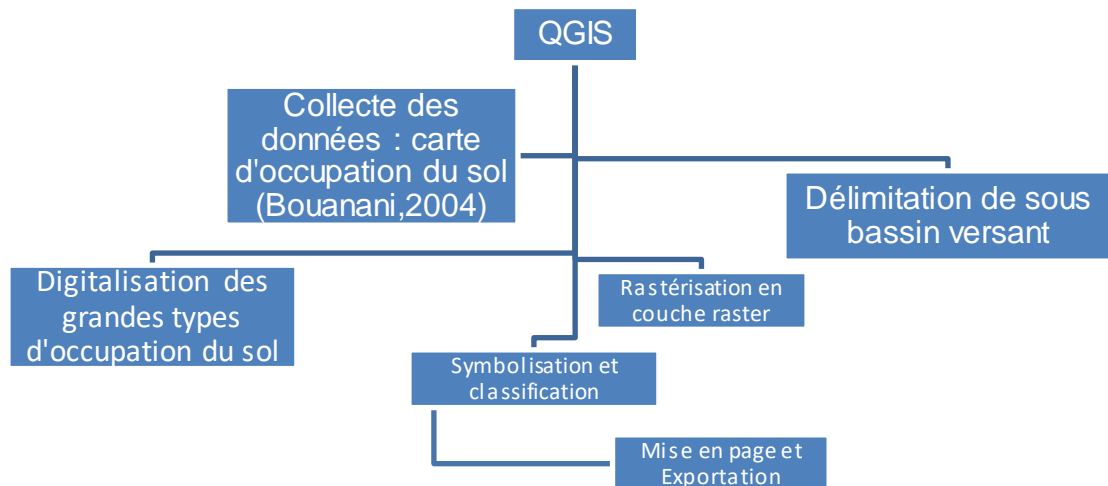


Figure 24: Organigramme pour l'élaboration de carte d'occupation de sol.

C. Altitude :

La carte d'altitude, également appelée carte topographique ou carte de relief, est une représentation graphique de l'élévation du terrain sur une surface donnée. Elle représente les variations d'altitude à l'aide de contours, de teintes ou d'ombres.

- **Collecte des données :**
 1. Modèle numérique de terrain (MNT)
 2. La limité du sous bassin versant d'Oued Mouillah.
- **Charger les données dans QGIS:**
 - Couche → Ajouter couche vecteur.
 - Sélectionner la limité du sous bassin versant d'Oued Mouillah.
 - Couche → Ajouter couche vecteur.
 - Sélectionner le MNT.
 - Pour la projection, on a travaillé avec les coordonnées Nord Sahara 1959/ UTM Zone 30.
- **Découper le MNT selon le sous bassin versant :**

- Raster → Extraction → Découper un raster selon une couche de masque.
- Couche source est le MNT et couche de masquage est limitée du sous bassin versant.
- **Symbolisation et classification :**
 - Cliquer sur la couche raster → Propriétés → symbologie.
 - Type de rendu (Pseudo-couleur à band unique) → Classer → Appliquer → Ok.
- **Mise en page et Exportation :**
 - Mise en page de la carte : Ajouter une légende, une échelle, un titre.
 - Exportation de carte : Exporter en PDF, PNG, TIFF selon les besoins.

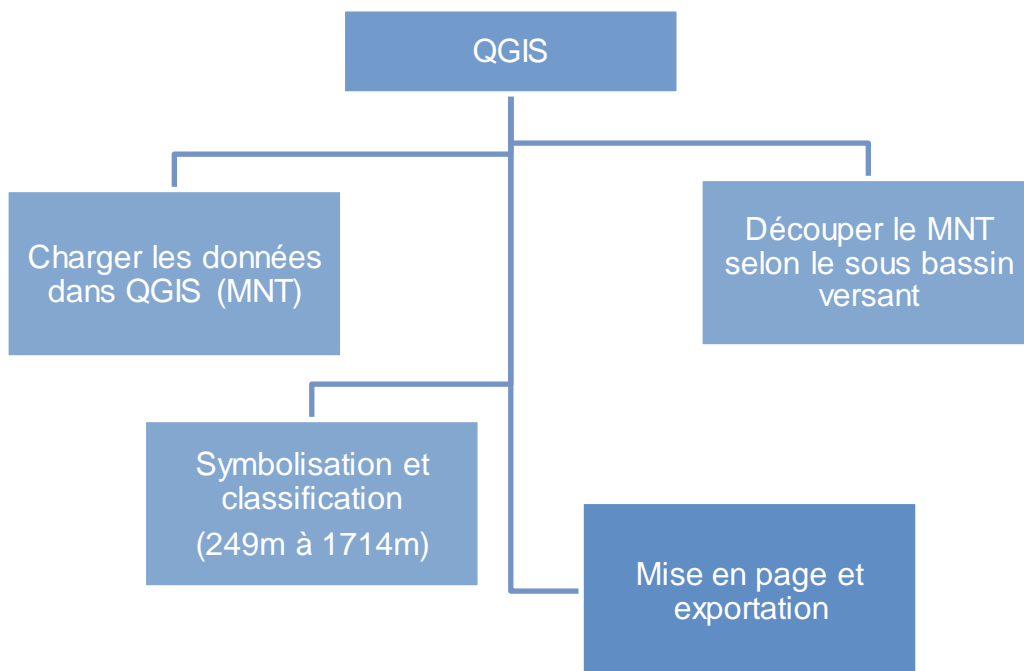


Figure 25: Organigramme pour l'élaboration de la carte des altitudes.

D. Pente :

La carte des pentes est une représentation géographique illustrant l'inclinaison du relief, c'est-à-dire les modifications de la déclivité d'une surface terrestre. Elle est souvent employée dans des disciplines telles que la géographie, la géologie et l'urbanisme, ainsi que dans des secteurs comme l'agriculture, l'hydrologie et la gestion des risques naturels (comme les glissements de terrain, l'érosion, etc).

- **Collecte des données :**

- Le MNT (SRTM à 30 m de résolution).
- La limite du sous bassin versant d'Oued Mouillah.

- **Charger les données dans QGIS :**

- Raster → Ajouter une couche → Ajouter couche raster.
- Sélectionner couche d'altitude → Ajouter → Ok.

- **Calcul des pentes en degrés :**

- Raster → Analyse → Pente (ou "Slope")
- Sélectionner la couche raster d'altitude → Exécuter → Fermer.
- La couche des pentes s'affiche sous forme raster.

- **Symbolisation et classification :**

- Cliquer sur la couche raster → Propriétés → symbologie.
- Type de rendu (Pseudo-couleur à band unique) → Classer (5 Classes) → Appliquer → Ok.

- **Mise en page et exportation**

- Mise en page : Ajouter une légende, une échelle, un titre.
- Exportation : Exporter en PDF, PNG, TIFF selon les besoins.

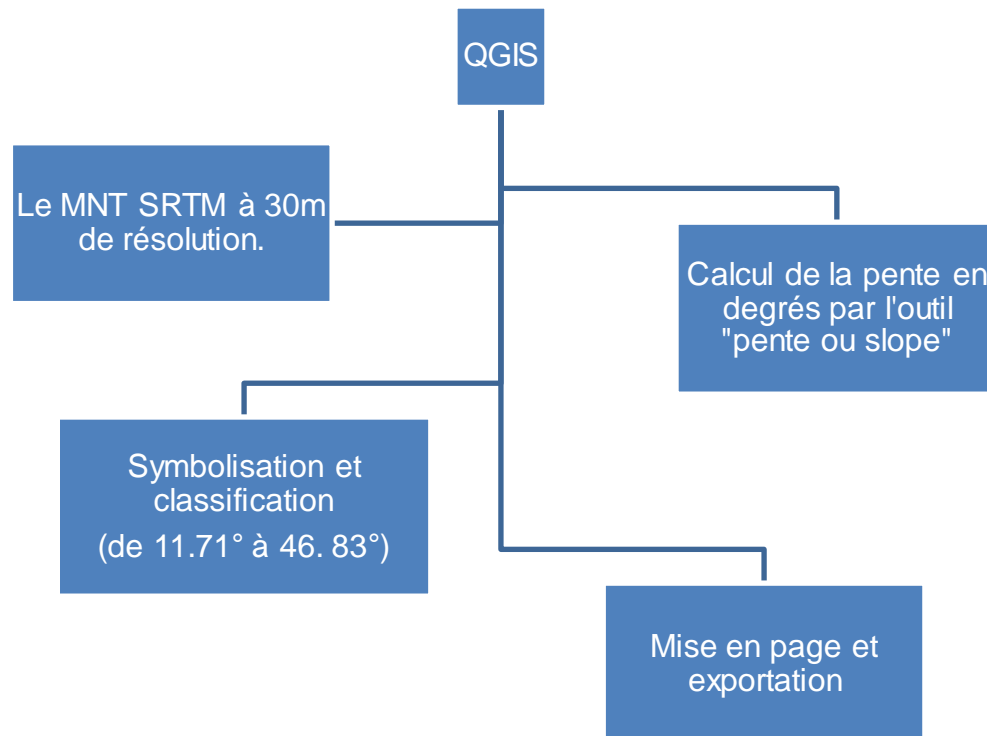


Figure 26: Organigramme pour l'élaboration de la carte des pentes.

E. Densité des linéaments :

La carte de densité des linéaments est une représentation cartographique qui met en évidence la concentration de ces éléments structuraux dans une zone donnée. Les linéaments sont des éléments structuraux linéaires ou curvilignes à la surface de la Terre qui peuvent indiquer des zones de failles, de fractures ou d'autres discontinuités géologiques.

- **Collecte des données :**

1. Modèle numérique de terrain (MNT).
2. La limite de bassin versant.

- **Charger les données dans QGIS :**

- Ajouter → ajouter une couche → Ajouter une couche Raster.
- Sélectionner le MNT du sous bassin versant d'Oued Mouillah.

- **Application l'outil « Ombrage ou Hillshade » :**

- Aller Raster Analyse Ombrage

- Créer plusieurs couches d'ombrage de différentes orientations (ex : 45°, 90°, 135°...°)
- **Appliquer un filtre directionnel :**
 - Aller → Raster → Filtre → Filtre directionnel.
 - Choisir un angle (0°, 45°, 90°, etc.).
 - Appliquer plusieurs fois avec différents angles pour identifier les structures orientées différemment.
- **Digitalisation manuelle des linéaments :**
 - Couche → Créer une couche → Nouvelle couche shapefile".
 - Choisir géométrie polyligne
 - Utiliser l'outil « Ajouter une ligne » pour tracer les linéaments visibles sur l'image.
 - Enregistrer régulièrement.
- **Application de l'analyse « Kernel Density » :**
 - Boîte à outils → Analyse spatiale → Densité par noyau (Kernel Density Estimation).
 - Sélectionner couche vecteur des linéaments → Exécuter.
- **Symbolisation et classification :**
 - Cliquer sur la couche raster → Propriétés → symbologie.
 - Type de rendu (Pseudo-couleur à band unique) → Classer (5 Classes) → Appliquer → Ok.
- **Mise en page et exportation**
 - Mise en page : Ajouter une légende, une échelle, un titre.
 - Exportation : Exporter en PDF, PNG, TIFF selon les besoins.

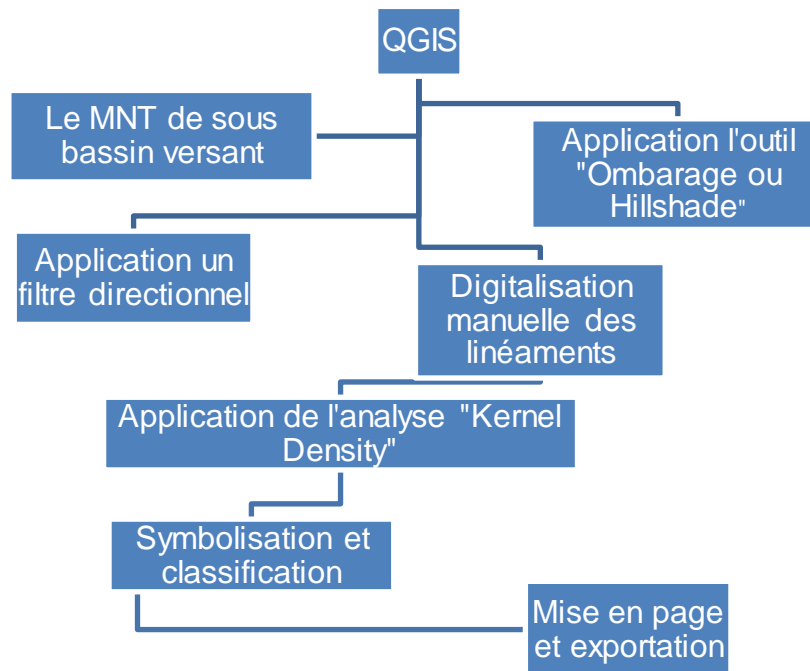


Figure 27: Organigramme pour l'élaboration de la carte des linéaments.

F. La carte de densité de drainage (Arcmap) :

La carte de densité de drainage est une illustration cartographique qui montre la densité ou l'intensité du système hydrographique (fleuves, ruisseaux, canaux) sur un espace déterminé.

- **Collecte de données :**

1. Modèle Numérique de Terrain (MNT).
2. La carte de réseaux hydrographique.

- Si la carte de réseaux hydrographiques (réseaux de drainage) n'est pas disponible, il faut créer une nouvelle carte de réseaux hydrographique selon les étapes suivantes :

- **Extraction de réseaux hydrographiques :**

- Utilisez Spatial Analyst → Hydrology.
- Fill : Remplir les dépressions du MNT.
- Flow Direction : Calculer les directions d'écoulement.
- Flow Accumulation : Calculer l'accumulation des flux.

- **Lancer l'outil Kernel Density :**

- ArcToolbox → Spatial Analyst Tools → Density → Kernel Density.
- Lancer les calculs.
- **Symbolisation et classification :**
 - Cliquer sur la couche raster → Propriétés → symbologie.
 - Type de rendu (Pseudo-couleur à band unique) → Classer (5 Classes) → Appliquer → Ok.
- **Mise en page et exportation**
 - Mise en page : Ajouter une légende, une échelle , un titre.
 - Exportation : Exporter en PDF, PNG, TIFF selon les besoins.

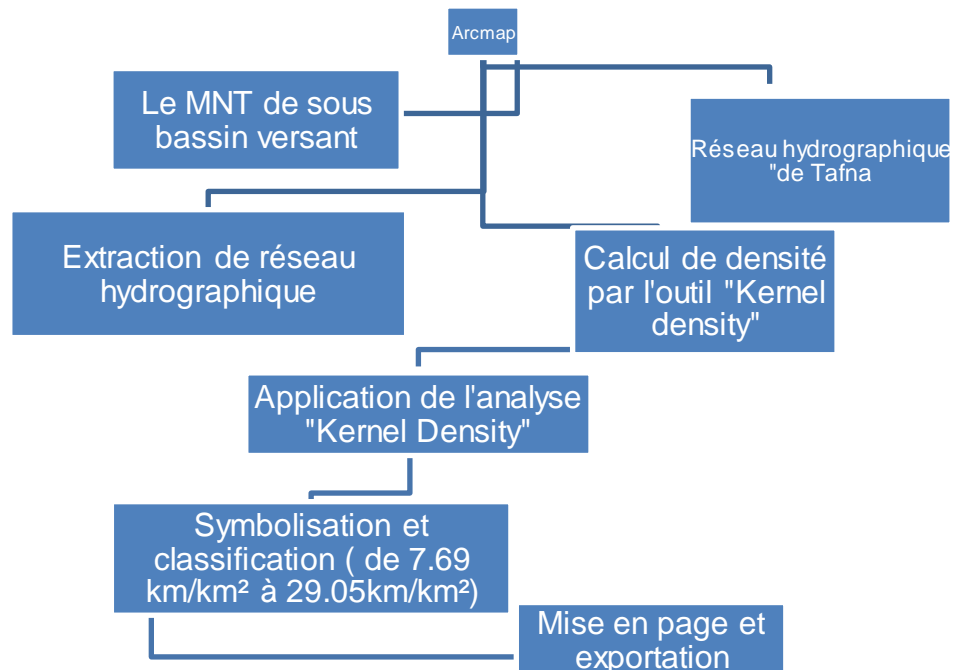


Figure 28: Organigramme pour l'élaboration de la carte de densité de drainage.

G. La carte de précipitations :

La carte des précipitations est une illustration graphique qui indique la mesure et la distribution des précipitations (telles que la pluie, la neige, etc.) sur un espace géographique précis et pour une durée spécifiée.

Pour la réalisation de carte des précipitations moyenne annuelle nous avons utilisé les données pluviométriques enregistrées dans la station climatologique de Maghnia sur une période (1990-2020) et les données manquantes nous les avons téléchargées par le site « ClimateEngine » pour la période (2020-2024). Ces données sont enregistrées dans l'Excel sous format CVS pour importation dans Arcmap.

- **Collecte des données :**

1. La limité du sous bassin versant d'Oued Mouillah.
2. Fiche Excel des données pluviométriques.

- **Ajouter les données dans Arcmap :**

- Fill → Add Data → Add Date XYZ.
- Sélectionner fiche Excel (CVS) et choisir (z= précipitations).
- Les données sont affichés sous forme :couche vecteur

- **Interpolation des données :**

- Aller dans ArcToolbox → Spatial AnalysteTools → Interpolation >IDW
- Sélectionner la couche vectrice des données pluviométriques.
- La carte s'affiche sous forme raster.

- **Symbolisation et classification :**

- Cliquer sur la couche raster → Propriétés → symbologie.
- Type de rendu (Pseudo-couleur à band unique) → Classer (5 Classes) → Appliquer → Ok.

- **Mise en page et exportation**

- Mise en page : Ajouter une légende, une échelle, un titre.
- Exportation : Exporter en PDF, PNG, TIFF selon les besoins.

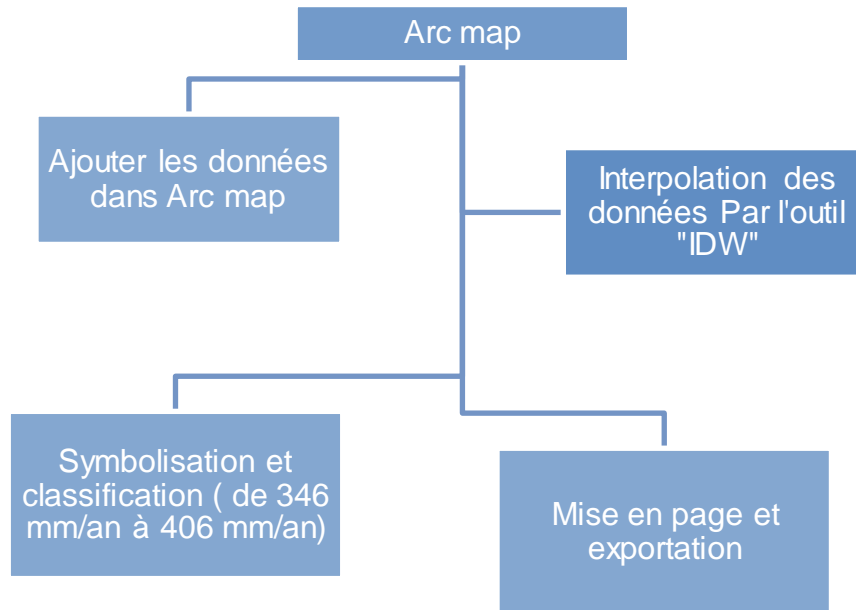


Figure 29: Organigramme pour l'élaboration de la carte des précipitations.

2.1.1. Analyse multicritères :

La méthodologie d'analyse multicritères pour l'élaboration de la carte des potentialités hydriques commence par l'identification des paramètres essentiels, qui

comprend les critères géologiques (lithologie, structures géologiques, fractures), hydrologiques (densité de drainage, réseau hydrographique), topographiques (pente, élévation, orientation), pédologiques (type de sol, texture), climatiques (précipitations) et

de couverture (occupation du sol, végétation). La méthode AHP (Processus d'Analyse Hiérarchique) est ensuite appliquée à travers plusieurs étapes : la comparaison par paires utilisant des scores de comparaison (1-9) et évaluer l'importance relative des critères, suivie du calcul des poids par la normalisation de la matrice et la détermination des vecteurs propres. L'intégration dans le SIG implique le traitement des données avec la standardisation (conversion en format raster, reclassification, harmonisation des résolutions spatiales) et la superposition pondérée (application des poids, combinaison des couches, calcul de l'indice de potentialité hydrique). Enfin, la production de la carte finale comprend la classification et

présentation avec le zonage des potentialités (définition des classes, attribution des codes couleur, élaboration de la légende) et la finalisation par l'intégration des éléments cartographiques. Cette est basée sur les facteurs suivants :

A. La géologie :

Dans l'élaboration des cartes de potentialités hydriques, les paramètres géologiques jouent un rôle fondamental, notamment à travers la lithologie et les structures géologiques. La lithologie est cruciale, car les différents types de roches présentent des caractéristiques variables de porosité et de perméabilité, avec les roches sédimentaires comme le grès offrant une meilleure capacité de stockage et de transmission de l'eau que les roches ignées ou métamorphiques. Les structures géologiques, telles que les linéaments (failles et fractures), les plis et les joints, agissent comme des conduits pour l'écoulement des eaux souterraines et contrôlent leur mouvement et leur stockage, particulièrement dans les terrains rocheux à faible porosité primaire. L'intégration de ces paramètres dans l'analyse multicritère, et s'appuie sur les Systèmes d'Information Géographique (SIG) et la télédétection pour la collecte et l'analyse des données, complétés par des algorithmes d'apprentissage automatique.

B. Occupation de sol :

L'influence de l'occupation du sol sur les potentialités hydriques se manifeste de manière complexe à travers différents types d'occupation qui affectent distinctement la recharge et le potentiel hydrique. L'urbanisation a un impact négatif significatif en augmentant les surfaces imperméables, réduisant ainsi l'infiltration naturelle et augmentant le ruissellement de surface, tandis que la conversion des terres en zones agricoles modifie considérablement les taux de recharge, particulièrement dans les régions arides et semi-arides où le remplacement de la végétation profonde par des cultures à racines peu profondes peut augmenter la recharge. Les forêts, quant à elles,

présentent généralement des taux de recharge plus faibles en raison de l'évapotranspiration élevée, alors que les zones humides contribuent positivement à la recharge des eaux souterraines par une percolation lente. L'analyse de ces impacts s'appuie sur des outils sophistiqués tels que les Systèmes d'Information Géographique (SIG), la télédétection, et des

modèles hydrologiques, utilisant diverses sources de données incluant l'imagerie satellitaire, la photographie aérienne et des données open-source comme Landsat et Sentinel.

L'occupation du sol interagit également avec d'autres paramètres comme la géologie et la pente du terrain, influençant la perméabilité, le stockage des eaux souterraines et le ruissellement de surface, ces interactions étant évaluées à travers l'analyse multicritère (Sékoba.O, Ganngui.A et Lucette.A, 2017).

C. Topographie (pente et altitude) :

L'influence de la pente et de l'altitude sur les potentialités hydriques se manifeste à travers plusieurs mécanismes interconnectés. La pente joue un rôle fondamental en influençant directement le mouvement et l'infiltration de l'eau dans le sol, où les pentes raides favorisent un ruissellement rapide et réduisent l'infiltration, limitant ainsi la recharge des eaux souterraines, tandis que les pentes douces permettent une meilleure rétention d'eau et favorisent l'infiltration. Dans l'analyse multicritère, les zones de faible pente (0-5%) reçoivent généralement la pondération la plus élevée pour le potentiel hydrique, leur intégration étant réalisée via des systèmes d'information géographique (SIG) et la télédétection.

L'altitude, quant à elle, affecte la recharge principalement à travers son impact sur le climat et la végétation, avec des zones de haute altitude caractérisées par des températures plus fraîches, des précipitations plus importantes et une évaporation potentielle réduite, tandis que la fonte des neiges en altitude constitue une source importante de recharge des aquifères. La méthodologie d'intégration dans l'analyse multicritère s'appuie sur des outils sophistiqués, notamment les Modèles Numériques de Terrain (MNT), la télédétection, les SIG, et des modèles hydrologiques. Ces paramètres interagissent également avec la géologie, influençant la perméabilité et les zones de recharge, ainsi qu'avec l'occupation du sol, conditionnant les types d'utilisation des terres et la végétation.

D. Densité de drainage :

La densité de drainage, paramètre hydrologique clé défini comme le rapport entre la longueur totale des cours d'eau et des rivières dans un bassin de drainage et la superficie totale du bassin (exprimé en km/km²), est une métrique essentielle pour comprendre la capacité du

paysage à transporter l'eau et les sédiments. Son influence sur le potentiel hydrique se manifeste notamment à travers son impact sur la recharge des eaux souterraines, où une faible densité de drainage est associée à des taux d'infiltration plus élevés, tandis que les zones à forte densité présentent un ruissellement de surface plus important, avec une relation établie entre la densité de drainage et les caractéristiques du sous-sol, notamment la transmissivité et la perméabilité. L'intégration de ce paramètre dans l'analyse multicritère s'effectue grâce aux Systèmes d'Information Géographique (SIG) et à la télédétection, ainsi qu'aux modèles numériques de terrain (DTM), permettant son incorporation comme couche thématique et sa pondération, en combinaison avec d'autres facteurs comme la géologie, la pente et l'occupation du sol (Abdou.I et Konaté.M, 2020).

E. Densité des linéaments :

La densité des fractures exprimée en longueur totale ou en nombre de fractures par unité de surface donne des indications sur le degré de fracturation des roches, permettant ainsi d'identifier les zones hautement fracturées qui sont les endroits perméables à travers lesquels l'eau s'infiltré et parcourt plusieurs dizaines de kilomètres. La cartographie de densité de fractures est par conséquent très utile dans l'identification des zones potentielles de recharge en milieu de socle fracturé (Krishnamurthy.J, 1996 ; 2000 ; Sener.E, 2005).

F. Précipitations :

Les précipitations constituent un facteur critique dans la cartographie des potentialités hydriques, influençant directement la recharge des eaux souterraines, particulièrement dans les régions arides et semi-arides où les événements de précipitations extrêmes peuvent contribuer fortement sur la recharge pendant les années humides. Leur intégration dans l'analyse multicritère s'effectue à travers une pondération relative par rapport à d'autres facteurs comme la pente, la géologie et l'occupation des sols, tandis que les Systèmes d'Information Géographique (SIG) permettent d'intégrer ces données avec d'autres couches thématiques à travers une analyse de superposition pondérée.

2.2. La reclassification des paramètres :

La reclassification des cartes (également connue sous le nom de reclassification raster) est l'opération qui vise à changer les valeurs des pixels d'une couche raster en fonction de critères préétablis. On utilise fréquemment cette phase dans l'analyse spatiale,

particulièrement dans des secteurs tels que la planification territoriale, la gestion de l'environnement ou encore l'analyse multicritère.

Dans cette étude, nous avons reclassé les paramètres en fonction de leur influence sur l'infiltration des eaux dans le sous bassin versant d'Oued Mouillah, par un tableau qui constitue les paramètres et leur poids et leur influence. Chaque facteur est reclassé en cinq classes, sauf le facteur d'occupation de sol et la géologie sont classés selon le type d'occupation de sol et les grands ensembles lithologiques.

Nous avons utilisé le Arc GIS pour cette étape, par l'outil de Reclasser par table, les couches des paramètres sont classées et chaque couche est définie par une note de 1 à 5 selon son influence sur l'infiltration des eaux dans les nappes. Par exemple, les précipitations fortes sont définies par une note 5 et l'inverse pour les précipitations faibles (note de 1).

Tableau 25: Les critères et pondération du module final.

Facteurs	Les classes	Poids	Justifications	Note	Influence
La géologie	Alluvions récents	20	La perméabilité des aquifères est un facteur principal qui influent sur la recharge.	4	16
	Quaternaire Continentale			4	16
	Pliocène continental			3	12
	Miocène			2	8
	Crétacé marin inférieur			3	12
	Jurassique			5	20
	Trias			1	4
	Carbonifère viséen			1	4
	Primaire			1	4
	Roches volcanique			1	4
Densité de drainage	570-7692	5	Joue un rôle secondaire sur l'influence de potentiel de recharge	1	1
	7692-14813			2	2
	14813-21935			3	3
	21935-29057			4	4
	29057-36178			5	5
Précipitations	326-346	20	C'est la principale ressource pour le stockage de l'eau.	1	4
	346 – 366			2	8
	366 – 386			3	12
	386 – 406			4	16
	406 – 426			5	20
Pente	0 – 13.99	20	Facteur essentiel qui influence l'infiltration et l'écoulement de l'eau.	5	20
	13.99 – 27.98			4	16
	27.98 – 41.96			3	12
	41.96 – 55.95			2	8
	55.95 – 69.94			1	4
Occupation de sol	Couvert forestier normale	10	Influence modéré sur l'infiltration et l'évapotranspiration.	1	2
	Couvert forestier dégrade			4	8
	Prairies et terrains de parcours			3	6
	Culture extensive			2	4
	Couvert mort			5	10
Altitude	249 – 542	20	Facteur important influence les zones de recharge et les niveaux d'eau dans les aquifères	5	20
	542 – 835			4	16
	835 – 1128			3	12
	1128 – 1421			2	8
	1421 – 1714			1	4
Densité de linéament	0 -0.128	5	Influence faible sur le chemin de l'eau infiltrée	1	1
	0.128- 0.256			2	2
	0.256 – 0.384			3	3
	0.384 – 0.512			4	4
	0.512 – 0.639			5	5

2.3. Superposition et pondération des critères :

Après que les différentes couches de données sont collectées, analysées et classées dans QGIS ou ArcGIS, l'étape suivante est la superposition et la pondération. Chaque critère est caractérisé par un poids spécifique en fonction de son influence sur la recharge des nappes. Par exemple, dans une zone géologique caractérisée par une lithologie perméable, le poids de couche géologique est plus fort à l'occupation de sol. Cette pondération permet de créer une carte finale qui identifie les zones favorables à la recharge des nappes, en tenant compte des facteurs d'infiltration, ruissellement et les activités humaines qui influencent l'infiltration des eaux dans les nappes.

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

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 (%).

Les calculs d'influence est dans ANNEXE 01.

Cette méthode permet de calculer l'influence de chaque paramètre, à partir de l'utilisation du logiciel ArcGIS par l'outil (Weighted Overlay), ces calculs se font d'une manière automatique selon la relation suivante :

- Chaque P est la valeur de poids attribué à la classe d'un pixel dans le facteur correspondant (de 1 à 5 en général).

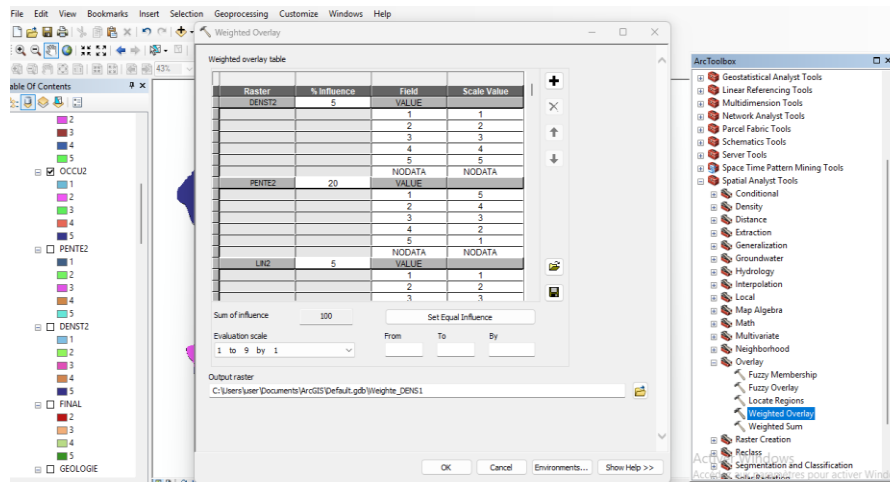


Figure 30: Tableau de calcul des valeurs de pondération dans ArcGIS.

2.4. Résultat et discussions :

La figure ci-dessous représente la carte finale des potentialités de recharge du sous bassin versant de l'Oued Mouillah. Les zones de recharges sont selon leurs importances. Elles varient d'élevée a faible.

L'analyse de cette carte nous montre que la majorité du sous bassin versant est caractérisée par un potentiel modéré, situé principalement sur la plaine de Maghnia, au Nord du sous bassin. Ce qui indique une moyenne de recharge et de rétention des eaux souterraines. Ces zones sont abritées des formations de forte perméabilité, telles que les formations alluvionnaires récentes, les formations carbonatées du Jurassique. Ces zones sont caractérisées par des pentes moyennes.

Les zones de faible recharge sont situées principalement dans la partie Sud et Centrale de la zone d'étude. Cette zone est marquée par l'existence de formations géologiques (schistes, argiles et des conglomérats) et caractérisée par de fortes pentes, ce qui affaiblie l'infiltration et par la suite la recharge.

Les zones de recharge élevée sont localisées dans la partie Nord-Est de la zone d'étude, une zone marquée par la présence de formations fortement perméables du Jurassique où la pente est faible, ce qui favorise l'infiltration et augmente la recharge des aquifères.

Conclusion :

La carte des potentialités de recharge hydrique, élaborée à travers l'analyse multicritère, révèle une hétérogénéité spatiale significative au sein du sous-bassin versant. La région Nord se distingue particulièrement par un degré d'influence supérieur aux autres zones, suggérant des conditions plus favorables à la recharge des aquifères. Cette variabilité spatiale du potentiel de recharge est étroitement liée à la combinaison de facteurs environnementaux spécifiques, notamment les caractéristiques géologiques, topographiques, pédologiques et climatiques qui caractérisent le sous bassin d'Oued Mouillah.

Pour valider la fiabilité des résultats obtenus par cette analyse multicritère, il est recommandé de mettre en place un programme de suivi piézométrique périodique. Ces campagnes de mesures permettront de vérifier la distribution spatiale des zones de recharge et d'évaluer quantitativement la dynamique de recharge des aquifères dans les différentes zones identifiées.

Cette carte constitue un outil d'aide à la décision pour l'élaboration d'un programme de planification et de gestion intégrée des ressources en eau dans la zone d'étude. Elle permettra notamment d'optimiser l'implantation des ouvrages de captage et de définir des zones prioritaires pour la protection et la conservation des ressources hydriques.

CONCLUSION GENERALE

Cette étude se concentre sur l'élaboration de la carte d'identification des zones à fort potentiel de recharge des eaux souterraines dans le sous bassin versant d'Oued Mouillah, une région transfrontalière entre l'Algérie et le Maroc qui s'étend sur 2 650 km² avec un périmètre de 230 km. La méthodologie combine l'utilisation des Systèmes d'Information Géographique (SIG) et l'intégration des paramètres multiples, notamment la géologie (comprenant des formations allant du Paléozoïque au Quaternaire, avec des dolomies et calcaires jurassiques, particulièrement importants pour la recharge), la topographie (avec des altitudes variant de 250 m à 1714 m), le réseau hydrographique (caractérisé par l'Oued Mouillah qui prend sa source dans la région d'El Abed à 1250 m d'altitude), l'occupation des sols (incluant des forêts, des zones agricoles extensives, des pâturages et des terres nues), les précipitations (moyennes annuelles de 301,6 mm avec des maximums de 548,7 mm en 1995 et des minimums de 158,5 mm en 2015), et la densité des linéaments.

Le sous bassin étudié est caractérisé par un climat semi-aride avec une température moyenne annuelle de 18,2°C (variant de 4,8°C en janvier à 34,8°C en août), a été divisé en trois zones distinctes de recharge : une zone à forte recharge dans la partie Nord, caractérisée par des formations géologiques perméables et des pentes douces, une zone à recharge moyenne dans les zones centrales, et une zone à faible recharge dans la partie Sud, dominée par des formations imperméables et des pentes abruptes.

L'étude propose des recommandations cruciales pour la gestion durable des ressources en eau, notamment l'utilisation de la carte comme outil d'aide à la décision, la protection des zones de forte recharge, le développement d'un plan de gestion intégrée, le renforcement des capacités locales en SIG, et la poursuite des recherches pour validation, bien que le manque de données sur les débits des puits limite actuellement une validation complète de la carte.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

- **Aabdou Ali. I, Konaté. M (2020).** Identification et cartographie des zones potentielles de recharge des eaux dans la région de Dasso (Sud-Ouest,Niger) par analyse multicritère. Article in European.Scientific.Journal, 227 p.
- **Baba Hamed. K (2001).** Contribution à l'étude hydrologique de trois sous-bassins de la Tafna (bassin de Sebdou, de Mouillah et d'Isser). Mémoire de magistère, Univ. Oran, 195 p.
- **Benhamou. M (1983).** Stratigraphie et milieux de dépôt du Jurassique inférieur et moyen des Beni Ourasous et des Beni Khallad (massif des Traras oranais Ouest). Thèse Doct. 3^{ème} cycle. Univ, Oran
- **Bhuiyan. C, Ramesh. P, Singh Flügel. W.A, (2009).**Modelling of ground water recharge potential in the hard-rock Aravalli terrain, India: a GIS approach. Environ Earth Science (2009) 59: 929–938 p.
- **Bonnet. M (1965).** Etude hydrogéologique de plaine de Maghnia. Rapports S.E.S n°59/ GE. Oran, 45 p.
- **Bouanani. A (2004).**Hydrologie, Transport Solide et Modélisation. Etude de quelques sous-bassins de la Tafna (Nw - Algérie). Thèse. Doct d'Etat, Univ. Tlemcen, 236 p., 81 fig., 77 tab.
- **Coutagne. A, (1948).** Essai d'une méthode de détermination du module des cours d'eau à l'aide des précipitations et de l'évaporation.
- **Emna. B, Salwa. S, Alae-eddine. B, Hafedh. K, Yassin. Z, Salem. B (2014).** Mapping recharge potential zones and natural recharge calculation: study case in Sfax region. Arabian Journal of Geoscience. DOI 10.1007/s12517-014-51512-x.
- **Ghenim. A, Seddini. A, Terfous. A (2008).**Variation temporelle de la dégradation spécifique du bassin versant de l'Oued Mouillah (Nord-Ouest Algérien). Hydrological Sciences Journal, 2008, 53 (2), pp.448-456.
- **Hamenni. N, (2011).** Etude des ressources en eau du bassin versant de la Soummam par l'utilisation du SIG. Mémoire de magistère, ENSA, 152p.
- **Harouat. M, Benmadjahed. A, (2020).**Contribution à l'étude hydrogéochimique des eaux souterraines de la zone frontalière Sud-Ouest de Maghnia (Nord-Ouest Algérien).Mém. Master ,Univ. Tlemcen, 95 p, 35 fig, 26 tab.
- **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 in International Journal of Remote Sensing July 1996 .Vol. 17, N°. 10, 1867-1884p.
- **Krishnamurthy. J, Arul Mani, Jayaraman. V, et Manivel. M, (2000).** Groundwater resources development in hard rock terrain - An approach using remote sensing and GIS techniques. Article in International Journal of Applied Earth Observation and Geo-information. 204-215p.
- **Lucas. G (1942).** Description géologique et pétrographique des Monts de Ghar Roubane et Sidi El- Abed, Bull. Ser. Car. Géol. Algérie 12 série N° 16.

- **Mahboubi. M et Mimouni. D, (2014).** Etude lithologique de l'indice de minéralisation : Djebel Deglen (partie Sud des Monts de Ghar Roubane, Tlemcen, Algérie). Master, Univ. Tlemcen.Algérie, 66p.
- **Mahi. M, (2023).**Hydrosystème et ressources en eau. Etude de la fonction de transfert d'Oued Mouillah. Master Univ. Oran 2, 21 fig, 2 tab.
- **Saaty.T, (1980).** The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation. McGraw-Hill, New York, NY, États-Unis, 19 p.
- **Sékouba. O, Gnagui. A, Lucette. A, (2017).** Identification des zones potentielles de recharge des aquifères fracturés du bassin versant du N'zo (Ouest de La Côte d'Ivoire) : Contribution du SIG et de la Télédétection. Article. European Scientific Journal, 192 - 217 p.
- **Sener. E, Davraz. A, Ozcelik. M, (2005).** An integration of Gis and remote sensing in groundwater investigations: a case study in burdur, Turkey. Article.Hydrogeology Journal Vol.13. 826p.
- **Shaban. A, (2003).** Studying the hydrogeology of Occidental Lebanon: utilization of remote sensing. Etude de l'hydrogéologie du Liban occidental: Utilisation de télédétection. Thèse Doct. Univ, Bordeaux 1, 202p.
- **Shaban. A, Khawlie. M, Abdallah. C, (2006).**Use of remote sensing and GIS to determine recharge potential zone: the case of Occidental Lebanon. Hydrogeology Journal, Vol.14: 433-433p.
- **Thorntwaite. C. W, (1948).** An approach toward a rational classification of climate Geographical Review, 38, p. 55-94.
- **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, 2e éd., Leipzig, 230 p.

Web références :

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

<https://resources.arcgis.com/fr/>

<https://shs.cairn.info/hydrologie-continentale>

<https://www.climateengine.org>

<https://www.qgis.org>

Logiciels :

Arcmap 10.8

ARC GIS

QGIS 3.36

ANNEXES

ANNEXE 01: Méthode de calcul d'influence des facteurs.

A. Géologie (Poids = 20%).

Classes	Note	Calcul d'influence	Influence (%)
Alluvions récents	4	$(4/5) \times 20$	16
Quaternaire Continentale	4	$(4/5) \times 20$	16
Pliocène continental	3	$(3/5) \times 20$	12
Miocène	2	$(2/5) \times 20$	8
Crétacé marin inférieur	3	$(3/5) \times 20$	12
Jurassique	5	$(5/5) \times 20$	20
Trias	1	$(1/5) \times 20$	4
Carbonifère viséen	1	$(1/5) \times 20$	4
Primaire	1	$(1/5) \times 20$	4
Roches volcanique	1	$(1/5) \times 20$	4

B. Facteur Occupation de sol (Poids = 10%)

Classes	Note	Calcul d'influence	Influence (%)
Couvert forestier normale	1	$(1/5) \times 10$	2
Couvert forestier dégrade	4	$(4/5) \times 10$	8
Prairies et terrains de parcours	3	$(3/5) \times 10$	6
Culture extensive	2	$(2/5) \times 10$	4
Couvert mort	5	$(5/5) \times 10$	10

C. Facteur Pente (Poids = 20%)

Classes	Note	Calcul d'influence	Influence (%)
0 – 13.99	5	$(5/5) \times 20$	20
13.99 – 27.98	4	$(4/5) \times 20$	16
27.98 – 41.96	3	$(3/5) \times 20$	12
41.96 – 55.95	2	$(2/5) \times 20$	8
55.95 – 69.94	1	$(1/5) \times 20$	4

D. Facteur Altitude (Poids = 20%)

Classes	Note	Calcul d'influence	Influence (%)
249 – 542	5	$(5/5) \times 20$	20
542 – 835	4	$(4/5) \times 20$	16
835 -1128	3	$(3/5) \times 20$	12
1128 – 1421	2	$(2/5) \times 20$	8
1421 – 1714	1	$(1/5) \times 20$	4

E. Facteur Densité des linéaments (Poids = 5%)

Classes	Note	Calcul d'influence	Influence (%)
0 - 0.1278	1	$(1/5) \times 20$	1
0.128 – 0.256	2	$(2/5) \times 20$	2
0.256 – 0.384	3	$(3/5) \times 20$	3
0.384 – 0.512	4	$(4/5) \times 20$	4
0.512 – 0.639	5	$(5/5) \times 20$	5

F. Facteur Densité de drainage (Poids = 5%)

Classes	Note	Calcul d'influence	Influence (%)
570 – 7692	1	$(1/5) \times 5$	1
7692 – 14813	2	$(2/5) \times 5$	2
14813 – 21935	3	$(3/5) \times 5$	3
21935 – 29057	4	$(4/5) \times 5$	4
29057 – 36178	5	$(5/5) \times 5$	5

G. Facteur Précipitations (Poids = 20%)

Classes	Note	Calcul d'influence	Influence (%)
326 – 346	1	$(1/5) \times 20$	4
346 – 366	2	$(2/5) \times 20$	8
366 – 386	3	$(3/5) \times 20$	12
386 – 406	4	$(4/5) \times 20$	16
406 – 426	5	$(5/5) \times 20$	20

ملخص

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو إعداد خريطة تحدد المناطق ذات الإمكانيات العالية لإعادة شحن المياه الجوفية في حوض مويلح الذي يمتد بين دولة الجزائر و المغرب، عن طريق استعمال نظام المعلومات الجغرافية SIG و كذلك مختلف معلومات الخاصة بحوض مثل (الجيولوجيا، المنحدرات، الشبكة الهيدرولوجية، الغطاء الأرضي، هطول الأمطار و كثافة الخطوط) ، كل من هذه معلومات تمثل في شكل خرائط، يتم تحليلها وتصنيفها وفقا لتأثيرها على عملية إعادة الشحن، و هذا قمنا به من خلال طريقة التسلسل الهرمي التحليلي (AHP) المطور من طرف Saaty.

من أجل إعداد خريطة مناطق إعادة الشحن قمنا بأدراج جميع البيانات التي تحصلنا عليها في نظام المعلومات الجغرافية ثم قمنا بدمجها للحصول على الخريطة.

الخريطة المتحصل عليها تنقسم إلى ثلاث مناطق لإعادة الشحن كل منطقة تتميز بشدة إعادة شحن خاصة بها، حيث شدة إعادة الشحن العالية تتواجد في جزء صغير من حوض في منطقة الشمالية، أما شدة المتوسطة فهي تتمركز بكثرة داخل الحوض و في الأخير شدة القليلة تقع خصوصا في جزء الجنوبي للحوض.

تعتبر هذه الخريطة أداة رئيسية في إدارة الموارد المائية، حيث من خلالها نستطيع وضع خطة حول كيفية استغلال موارد المائية في الحوض مويلح. الكلمات المفتاحية: حوض مويلح ، نظام المعلومات الجغرافية (SIG)، إمكانيات إعادة التغذية، (عملية التسلسل الهرمي التحليلي AHP).

Résumé

L'objectif principal de cette étude est de préparer une carte qui identifie les zones à fort potentiel de recharge des eaux souterraines dans le sous bassin versant de Mouillah, qui s'étend entre l'Algérie et le Maroc, en utilisant le SIG et diverses informations spécifiques au bassin (géologie, pentes, occupation du sol, précipitations, densité de drainage....), chacune étant représentée sous forme de carte, analysée et classée en fonction de son impact sur le processus de recharge, à travers la méthode Analytical Hierarchy Process (AHP) développée par Saaty.

Afin de préparer la carte des potentiels de recharge, nous avons introduit toutes les données obtenues dans le SIG et les avons ensuite fusionnées pour obtenir la carte.

La carte obtenue est divisée en trois zones de recharge, chaque zone est caractérisée par sa propre intensité de recharge, où l'intensité élevée est située dans une petite partie du sous bassin dans la région nord, l'intensité moyenne est concentrée à l'intérieur du bassin, et l'intensité faible est située principalement dans la partie sud du bassin.

Cette carte est un outil clé dans la gestion des ressources en eau, par laquelle nous pouvons développer un plan sur la façon d'exploiter les ressources en eau dans le sous bassin de Mouillah.

Mots clés : Sous bassin versant de Mouillah, SIG, Potentiel de recharge, AHP.

Abstract

The main objective of this study is to prepare a map that identifies areas with high potential for groundwater recharge in the Mouillah basin, which extends between Algeria and Morocco, by using the SIG geographic information system and various basin-specific information (geology, slopes, hydrographic network, land cover, precipitation and line density), each of which is represented in the form of maps, analyzed and classified according to their impact on the recharge process, which we did through the Analytical Hierarchy Process (AHP) method developed by Saaty (Saaty).

In order to prepare a map of transshipment areas, we entered all the data we obtained into a GIS and then merged them to obtain the map.

The obtained map is divided into three recharge zones, each zone is characterized by its own recharge intensity, where high recharge intensity is located in a small part of the basin in the northern region, medium intensity is highly concentrated within the basin, and low intensity is located mainly in the southern part of the basin.

This map is a key tool in water resources management, through which we can develop a plan on how to utilize the water resources in the Mouillah basin.

Keywords: Mouillah catchment area, SIG, Recharge potential, AHP.