

UNIVERSITE KASDI MERBAH-OUARGLA

**Faculté des Hydrocarbures des Energies renouvelables et des Sciences de la Terre
et d'Univers**

Département de science de la terre et de l'univers



Mémoire de Master Académique

Domaine : Science de la terre et d'univers

Filière : Géologie

Spécialité : Hydrogéologie

THEME

**Analyse de la vulnérabilité et de l'évaluation des risques de
contamination des eaux souterraines dans la région de
Meskiana en utilisant des techniques de modélisation
géospatiale.**

Présenté par :

CHIHA Abdelmouine

Devant le jury

Président : FENAZI BILAL	<i>Pr.</i>	Univ. Ouargla
Promoteur : DJIDEL Mohamed	<i>Pr.</i>	Univ. Ouargla
Co-Promoteur : MEDJANI Fethi	<i>Pr.</i>	Univ. Ouargla
Examineur : MECIBAH ILYES	<i>MCA</i>	Univ. Ouargla

إهداء

أهدي هذا العمل إلى والديّ، راجياً من الله أن يحفظهما، وإلى عائلتي وأصدقائي وزملائي وجميع المقربين مني، وإلى كل من دعمني من قريب أو بعيد من أجل إتمام هذا العمل ولم يبخل علي من جهده ووقته و دعائه.

كما أتقدم بجزيل الشكر والإمتنان إلى أساتذتي الذين تشرفت بالدراسة على أيديهم، لا سيما الأستاذين المحترمين:

"محمد جيدل" و "فتحي مجاني".

أهدي لكم هذا العمل المتواضع والذي أتمنى أن يكون عند حسن ظنكم.

شكر و عرفان

الحمد لله على إحسانه والشكر له على توفيقه وامتنانه وأشهد أن لا إله إلا الله وحده لا شريك له تعظيماً لشأنه وأشهد أن نبينا محمداً عبده ورسوله صلى الله عليه وسلم الداعي إلى رضوانه صلى الله عليه وسلم تسليماً كثيراً إلى يوم الدين.

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات. الحمد لله على ما من به علي من توفيق وتيسير في إتمام هذه المذكرة.

بعد شكر الله عز وجل أتقدم بالشكر الجزيل إلى والدي الكريمين اللذين لم يدخرا أي جهد مادي أو معنوي من أجل إتمام المسار الدراسي والعلمي وأسأل الله أن يجازيهم عنا خير الجزاء وأن يرزقهما الصحة والعافية وأن يطيل في عمرهما ويحسن في عملهما.

وكما أتوجه بجزيل الشكر إلى البروفيسور "جيدل محمد" الذي لم يخدر أي جهد من أجل أن يعيننا على إتمام هذه المذكرة وأشكره كذلك على صبره معي ودعمه الثابت طيلة فترة إنجاز هذه المذكرة وأسأل الله أن يبارك له في علمه وعمله وماله وولده.

كما أتقدم بالشكر الجزيل إلى مساعد المشرف البروفيسور "مجانى فتحي" الذي لم يبخل عنا بنصائحه القيمة وكذلك دعمه المتواصل طيلة فترة إنجاز المذكرة وبهذا أسأل الله أن يبارك له في عمله وعلمه وأن يبارك له في ماله وولده.

وكما أتقد بخالص الشكر إلى جميع الأقرباء والأصدقاء والزملاء وكل من أعاننا بمعلومة أو بدعاء.

وفي الأخير أسأل الله أن ينفعنا بما علمنا و أن يزيدنا علماً والحمد لله رب العالمين.

المحتويات

Liste des figures	v
Liste des tableaux	vi
Introduction générale.....	1
Chapitre I.....	3
Description de la zone d'étude.....	3
Chapitre I : Description de la zone d'étude	3
1. Situation géographique :.....	3
2. Aperçus socio-économiques :.....	4
3. Topographie :.....	4
3.1. Altitude :.....	4
3.2. Relief :.....	5
4. Hydrologie :.....	12
5. Hydrogéologie :.....	13
5.1. Géométrie de l'aquifère :.....	14
5.2. Piézométrie :.....	14
5.2.1. Evolution de la piézométrie :.....	14
5.2.2. Carte piézométrique :	15
5.3. Conditions aux limites :.....	15
6. Géologie :.....	Error! Bookmark not defined.
6.1. Description lithologique des formations :.....	Error! Bookmark not defined.
.7 Climatologie :.....	16
7.1. Les facteurs climatiques :.....	17
7.2.1. La température :.....	17
7.2.2. Précipitation :	19
7.2.3. Relation température-précipitation :.....	22
7.2. Bilan hydrique :.....	26
7.2.1. Calcul du bilan hydrique selon la formule de CW Thornthwaite :.....	26
7.2.2. Interprétation du bilan de Thornthwaite :.....	27
Chapitre II : Matériels et méthodes.....	28
.1 Les logiciels utilisés :	28
.1.1 Arc Gis 10.3 :	28
.1.2 Google Earth Pro :.....	28
.2 Les données utilisées :	28
2.1. Le Modèle Numérique de terrain (MNT) :.....	28
2.2. Les cartes scannées :.....	29

2.3. Données climatiques :	30
3. Modélisation de la vulnérabilité : (méthode DRASTIC et méthode IS) :	30
3.1. La conversion des données vectorielles en raster (Rastérisation) :	30
3.1.1. Description de la méthode DRASTIC :	31
3.1.2. Classification et reclassification et pondération des données (paramètres DRASTIC) :	32
3.1.3. Calcul de l'indice de vulnérabilité DRASTIC des eaux souterraines :	34
3.1.4. Description de la méthode d'indice de susceptibilité « SI » :	34
4. Validation de la carte de vulnérabilité :	37
4.1. Concentration des nitrates :	37
4.2. Matrice de confusion :	37
Chapitre III : Résultats et discussion	39
1. Élaboration des couches thématiques correspondant aux paramètres de la méthode DRASTIC :	39
2.1. Profondeur de la nappe (D) :	39
2.2. Recharge :	41
2.3. Nature de la zone saturée (A) :	43
2.4. Sol (S) :	45
2.5. Topographie (T) :	47
2.6. Nature de la zone non saturée (I) :	49
2.7. Perméabilité (C) :	51
2.8. Indice DRASTIC et degré de vulnérabilité (Niveau de la vulnérabilité par la méthode DRASTIC) :	53
2. Élaboration des couches thématiques correspondant aux paramètres de la méthode IS (DRATOs) :	55
2.1. Occupation des sols (OS) :	55
2.2. Indice de susceptibilité (IS) et degré de vulnérabilité (Niveau de la vulnérabilité par la méthode IS) :	57
3. Validation de la carte de vulnérabilité :	59
3.1. La vulnérabilité DRASTIC :	59
3.2. La vulnérabilité DRATOS :	61
Conclusion générale	64

Liste des figures

Figure 1: Carte de situation géographique du bassin versant de Meskiana.....	3
Figure 2: Carte altimétrique dans le bassin versant de Meskiana.....	5
Figure 3: Carte des pentes dans le bassin versant de Meskiana.	6
Figure 4: Carte du réseau hydrographique dans le bassin versant de Meskiana	13
Figure 5: Carte hydrogéologique dans le bassin versant de Meskiana.....	14
Figure 6: Carte piézométrique de la nappe de Meskiana	16
Figure 7: Carte géologique dans le bassin versant Meskiana.....	Error! Bookmark not defined.
Figure 8: Variations mensuelles des températures dans la station de Meskiana.	18
Figure 9: Variations mensuelles des températures dans la station de Meskiana.	19
Figure 10: Carte des précipitations moyennes annuelles dans le bassin versant Meskiana	20
Figure 11: Variations mensuelles des précipitations dans la station de Meskiana.	21
Figure 12: Variations annuelles des précipitations dans la station de Meskiana.....	22
Figure 13: Diagramme pluviothermique de la station de Meskiana.....	23
Figure 14: Variations mensuelles de la vitesse des vents à la station de Meskiana.	24
Figure 15: Variations mensuelles de la vitesse des vents à la station de Meskiana.	25
Figure 16: Variations mensuelles de la vitesse des vents à la station de Meskiana.	26
Figure 17: Représentation graphique du bilan hydrique du bassin versant Meskiana.	28
Figure 18: organigramme de la modélisation de la vulnérabilité des eaux souterraines (DRASTIC).	32
Figure 19: organigramme de la modélisation de la vulnérabilité des eaux souterraines (DRATOS).	36
Figure 20: Carte des profondeurs de la nappe du Bassin versant de Meskiana.....	39
Figure 21: carte de la profondeur du niveau statique (D) dans le bassin versant de Meskiana.	41
Figure 22: Carte de recharge du bassin versant de Meskiana.....	42
Figure 23: Carte de la recharge efficace (R) dans le bassin versant Meskiana	43
Figure 24: Nature lithologique de la zone saturée (A) dans le bassin versant de Meskiana.	44
Figure 25: Carte des sols du bassin versant de Meskiana.....	45
Figure 26: Carte des sols (S) dans le bassin versant de Meskiana.	47
Figure 27: Carte des pentes du bassin versant de Meskiana.....	48
Figure 28: Carte du paramètre « T » dans le bassin versant de Meskiana.	49
Figure 29: Nature lithologique de la zone non saturée (I) dans le bassin versant de Meskiana.	51
Figure 30: Carte de perméabilité (C) dans le bassin versant de Meskiana.....	53
Figure 31: Carte de l'indice de vulnérabilité (ID) dans le bassin versant de Meskiana.	55
Figure 32: Carte d'occupation des sols.	56
Figure 33: Carte des classes assignées au paramètre « OS » dans le bassin versant de Meskiana.....	57
Figure 34: Carte de l'indice de vulnérabilité (IS) dans le bassin versant de Meskiana.....	59
Figure 35: Carte de validation de l'indice DRASTIC par la distribution des nitrates dans le bassin versant de Meskiana.....	60
Figure 36: Carte de validation de l'indice DRATOS par la distribution des nitrates dans le bassin versant de Meskiana.....	62

Liste des tableaux

Tableau 1: Les paramètres DRASTIC (Aller et al. 1987)	33
Tableau 2: les valeurs des indices correspondent à chaque degré de vulnérabilité (Aller et al. 1987).	34
Tableau 3: les valeurs lues attribuées à l'occupation du sol dans (IS) et adoption à la zone de Meskiana	36
Tableau 4: Poids attribués aux paramètres SI.....	37
Tableau 5: Critères d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode SI	37
Tableau 6: Répartitions des classes de vulnérabilité pour le coefficient "D"	40
Tableau 7: Répartitions des classes de vulnérabilité pour le coefficient "R"	43
Tableau 8: Répartitions des classes de vulnérabilité pour le coefficient "S".	46
Tableau 9: Répartitions des classes de vulnérabilité pour le coefficient "T".	48
Tableau 10: Répartitions des classes de vulnérabilité pour le coefficient "I".	50
Tableau 11: Répartitions des classes de vulnérabilité DRASTIC.	54
Tableau 12: Répartitions des classes d'occupation des sols.....	57
Tableau 13: Répartitions des classes de vulnérabilité DRATOS.	58
Tableau 14: Matrice de confusion de vulnérabilité DRASTIC	60
Tableau 15: Matrice de confusion de vulnérabilité DRATOS	63

Liste des Abréviations

SIG : Système d'Information Géographique

ETP : Evapotranspiration potentielle (mm)

ETR : Evapotranspiration Réelle (mm)

MNT : Modèle Numérique de Terrain

DA : Déficit Agricole

OS : Occupation des sols

EX : Excédent d'écoulement

RFU : Réserve Facilement Utilisable

IS : Méthode de vulnérabilité DRATOS

IDW : Méthode d'interpolation

CGG : Compagnie Générale de Géophysique

Introduction générale

Introduction générale

Face à la crise mondiale de l'eau potable, les eaux souterraines sont devenues une ressource vitale pour répondre aux besoins humains, que ce soit pour la consommation directe, l'utilisation industrielle, l'utilisation agricole ou autres domaines nécessitant de l'eau. Bien que certains pays dépendent encore des eaux de surface comme les lacs et les rivières, on constate une consommation et une dépendance croissantes aux eaux souterraines pour satisfaire les besoins grandissants dans divers secteurs. Cependant, malgré les quantités colossales d'eaux souterraines propres à la consommation, si nous n'exploitons pas ces ressources de manière rationnelle et ne les préservons pas de la pollution, ces eaux deviendront impropres à l'utilisation ou s'épuiseront, engendrant ainsi une crise hydrique mondiale.

Ces dernières années, nous avons observé une prise de conscience accrue des problématiques environnementales, notamment de la pollution des eaux, accentuée par l'émergence de défis tels que le réchauffement climatique. L'eau est ainsi devenue une ressource essentielle à la vie en général et à l'humanité en particulier, d'où la nécessité impérieuse de la protéger contre toute forme de pollution. Sur ce sujet, de nombreux scientifiques ont développé diverses méthodes pour étudier la vulnérabilité des eaux souterraines face à la pollution, un enjeu crucial pour une meilleure gestion et protection de ces ressources contre les pollutions, ainsi que pour trouver des solutions durables pour les zones polluées. À travers cette étude, nous visons à analyser les points de vulnérabilité et évaluer les risques de pollution des eaux souterraines dans la région de Meskiana en utilisant des techniques de modélisation géospatiale. Cette recherche nous permettra d'estimer le degré d'exposition des nappes phréatiques à la pollution et de prendre les mesures adéquates pour préserver cette précieuse ressource.

Les systèmes d'information géographique (SIG) occupent une place prépondérante pour la gestion, l'analyse et la visualisation des données géospatiales relatives à cette étude. Leur capacité à traiter efficacement les images satellites et les données issues des modèles numériques de terrain en fait des outils indispensables. Grâce aux SIG, il devient possible de cartographier les caractéristiques environnementales du bassin versant, générer des modèles numériques, analyser l'occupation des sols, modéliser les flux hydrologiques ainsi que de mener de nombreuses autres applications pertinentes. De plus, ces systèmes permettent d'évaluer spatialement l'impact des facteurs environnementaux sur le bassin versant de Meskiana. Des analyses géospatiales avancées peuvent être réalisées afin d'identifier les zones sensibles, suivre les tendances temporelles et comprendre les relations entre les différentes variables environnementales. Ainsi, ces outils puissants approfondissent les études en permettant une meilleure compréhension des dynamiques spatiales et temporelles régissant l'écosystème de ce bassin versant.

Pour atteindre notre objectif, nous avons suivi les étapes suivantes :

- Le premier chapitre présente les principales données relatives au cadre général de notre zone d'étude, notamment sa situation géographique, un aperçu socio-économique, une étude géologique, les caractéristiques topographiques, ainsi qu'une étude hydrogéologique et climatologique.
- Le deuxième chapitre décrit les principales méthodes et techniques utilisées pour le traitement des images satellitaires et la création de cartes, ainsi que le matériel employé pour la réalisation de nos travaux.
- Le troisième chapitre est dédié à la présentation des résultats obtenus dans cette étude. Ces résultats sont analysés, interprétés et présentés sous forme de cartes à l'aide des outils des systèmes d'information géographique (SIG).
- Enfin, une conclusion générale synthétise les résultats obtenus dans le cadre de cette étude.

Chapitre I

Description de la zone d'étude

Chapitre I : Description de la zone d'étude

1. Situation géographique :

Le bassin versant de Meskiana s'étend sur une superficie de 1828 km² dans le nord-est de l'Algérie, à environ 80 km de la frontière tunisienne et 250 km au sud de la ville d'Annaba. Situé à mi-chemin entre la Méditerranée et le Sahara algérien, il fait partie du bassin hydrographique de l'Oued Mellègue. Plusieurs agglomérations y sont implantées, notamment Bellala, Dhalâa, Meskiana, Rehia et Ain Touila, abritant une population qui dépassait les 37000 habitants selon un recensement effectué en 1998, et estimée à 48000 en 2004.

Le bassin versant en question est délimité par plusieurs wilayas algériennes. Au nord, sa frontière est constituée par la wilaya de Souk Ahras. Du côté nord-ouest, il est bordé par la wilaya d'Oum Elbouaghi. Sa limite septentrionale se trouve au nord-est. Vers le sud-est, c'est la wilaya de Tebessa qui marque ses contours. Enfin, ses limites sud-ouest et ouest sont formées par la wilaya de Khenchela.

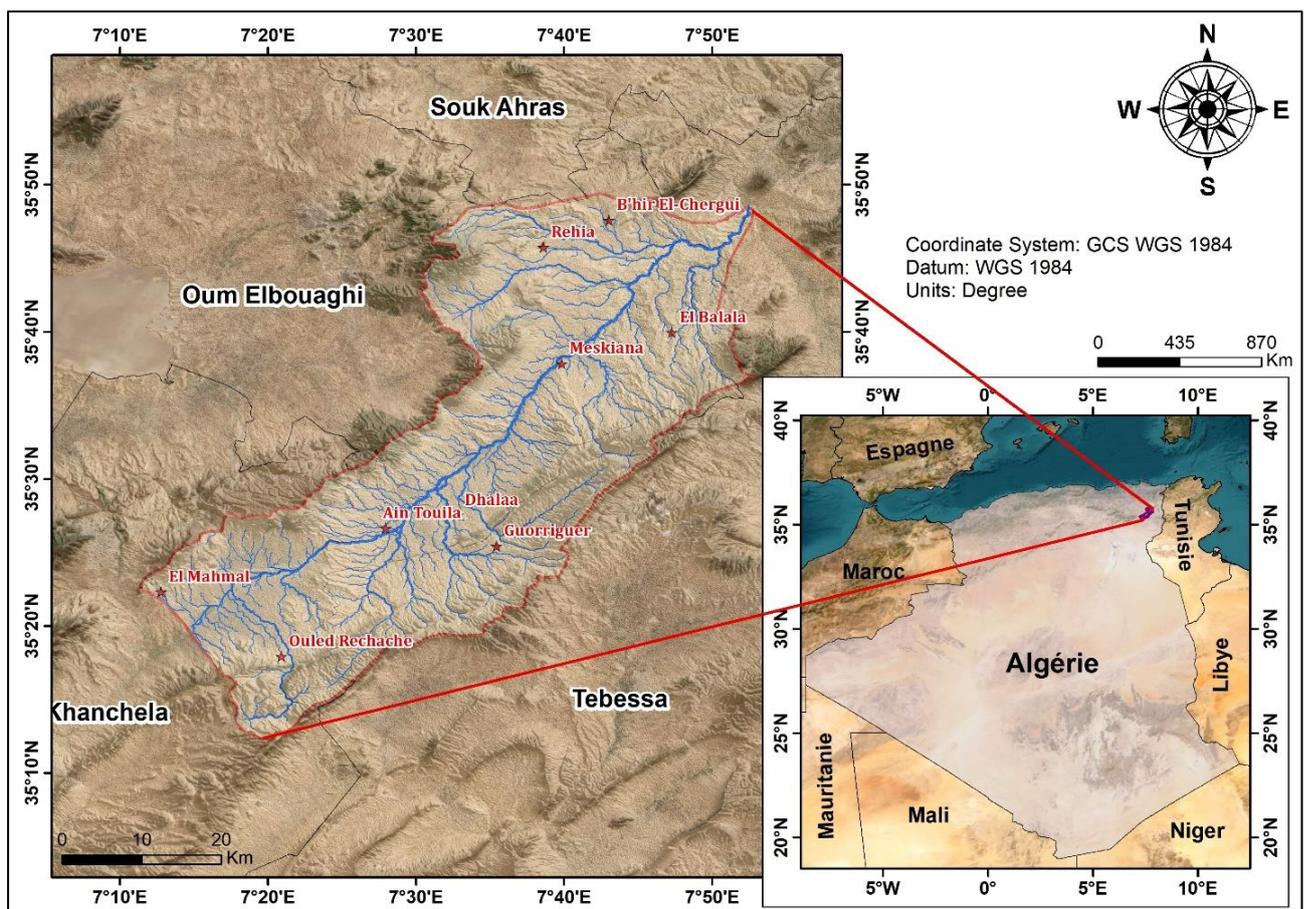


Figure 1: Carte de situation géographique du bassin versant de Meskiana

2. Aperçus socio-économiques :

La plaine de Meskiana est située dans une zone sub-saharienne caractérisée par un climat semi-aride avec des précipitations limitées, ce qui restreint le développement de la végétation. Les agglomérations de la région manquent d'infrastructures industrielles, à l'exception d'une usine de textiles actuellement inactive, alors que l'agriculture et l'élevage ont prospéré.

En effet, cette région est classée, du point de vue agro-écologique, parmi les hautes plaines intérieures orientales céréalières, caractérisées par des microclimats souvent rigoureux (hivers froids à très froids, étés chauds à très chauds et secs). Les précipitations sont généralement limitées, et l'eau est un élément essentiel du système agricole en place. Pendant les années pluvieuses, lorsque l'eau d'irrigation est disponible, on trouve des cultures maraîchères, des cultures fourragères et des céréales avec une rotation des cultures biennale, voire triennale. En revanche, lors des années de sécheresse, les cultures maraîchères et fourragères sont réduites, et l'accent est mis principalement sur les céréales pour maintenir les revenus des agriculteurs. Ces dernières années, le secteur agricole et de l'élevage a connu un développement significatif grâce au lancement des programmes PNDA en 2000 et FNRDA en 2001.

Ces initiatives ont conduit à l'extension des terres irriguées et à une multiplication des cycles de culture.

3. Topographie :

3.1. Altitude :

Cette carte (Fig. 03) représente le bassin versant de Meskiana et fournit des informations topographiques et hydrographiques détaillées sur la région.

L'altitude est représentée par une échelle de couleurs allant du vert foncé au rouge, où le vert foncé indique les zones les plus basses (656-700 m) et le rouge représente les zones les plus élevées (1500-1600 m).

- Les zones les plus basses, en vert foncé sur la carte, correspondent aux altitudes de 656 à 700 mètres. Elles se situent principalement le long du cours d'eau principal traversant le bassin du nord au sud.
- Les zones en vert clair, indiquant des altitudes de 700 à 800 mètres, bordent les précédentes sur les flancs de la vallée principale.
- Plus on s'éloigne du cours d'eau central, les altitudes augmentent graduellement, passant au jaune (800-900m) puis au jaune-orange (900-1000m). Ces zones de moyennes altitudes occupent une grande partie des surfaces est et ouest du bassin.

- Les teintes orangées, représentant des altitudes de 1000 à 1200 mètres, se concentrent principalement dans la partie sud-ouest du bassin versant.
- Enfin, les zones les plus élevées, en rouge-orange foncé (1300-1600m), forment une arête montagneuse au sud-ouest, culminant à 1600 mètres d'altitude environ.

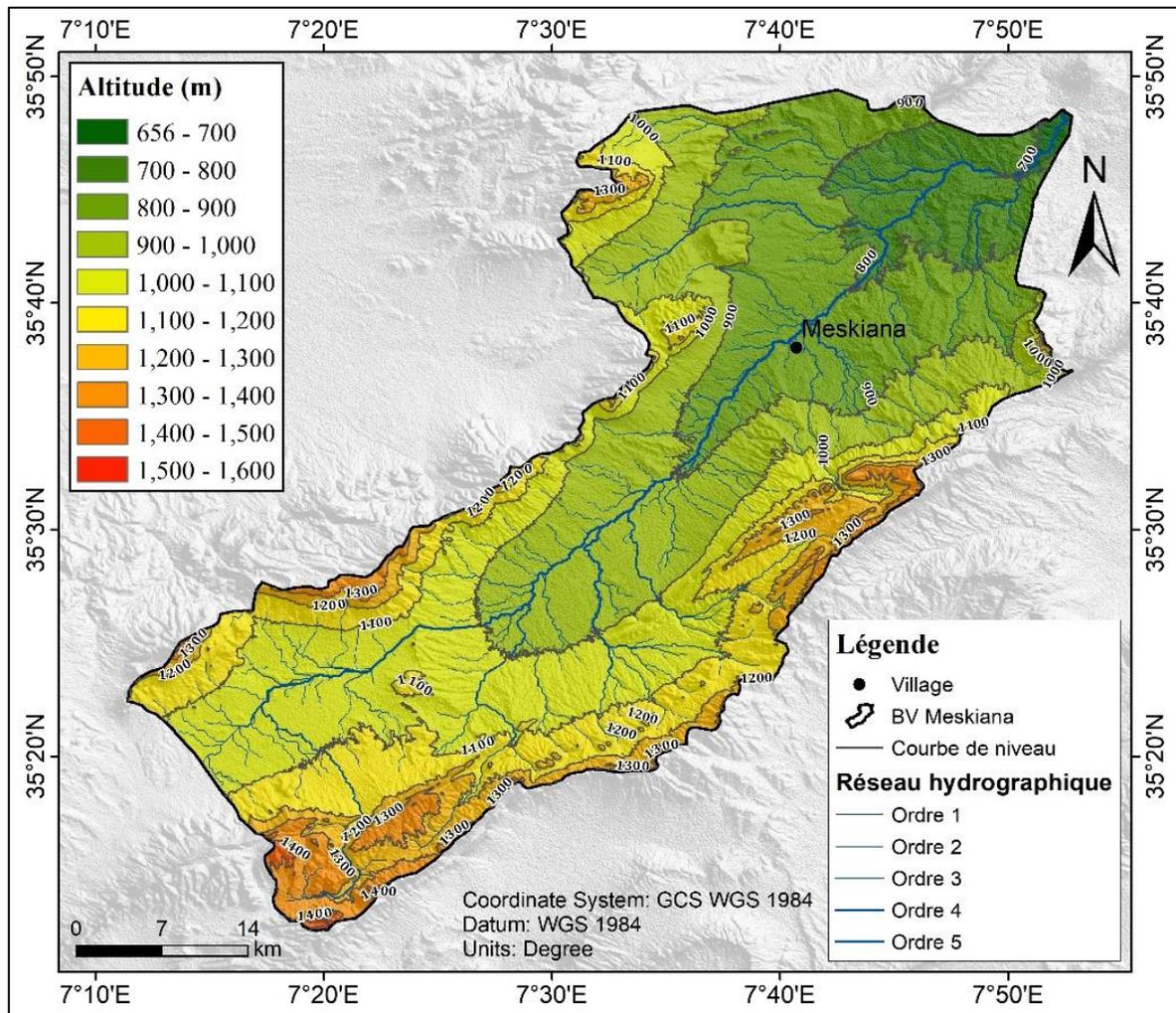


Figure 2: Carte altimétrique dans le bassin versant de Meskiana

3.2. Relief :

La carte des pentes (Fig. 03) élaborée révèle une distribution normale des différentes classes de pentes dans le bassin versant, en fonction de la topographie. Cinq classes de pentes ont été identifiées, exprimées en pourcentages :

- La classe 1 (0 à 2% de pente) représente les zones les plus planes, souvent situées près des cours d'eau ou au fond des vallées. Elle couvre 7,07% de la superficie totale, soit environ 129,18 km².
- La classe 2 (2 à 6% de pente) comprend les terres légèrement inclinées, représentant 7,35% de la surface, soit environ 134,31 km².

- La classe 3 (6 à 12% de pente) correspond aux pentes modérées, couramment rencontrées sur les flancs des collines et montagnes. Elle occupe 23,68% du territoire, soit environ 432,82 km².
- La classe 4 (12 à 18% de pente) regroupe les terres aux pentes plus raides, couvrant la plus grande portion avec 47,56% de la superficie, soit environ 869,38 km².
- Enfin, la classe 5 (plus de 18% de pente) englobe les régions les plus escarpées et montagneuses du bassin, souvent inadaptées aux activités humaines. Elle représente 14,35% de la surface totale, soit environ 262,37 km², et se situe principalement en périphérie du bassin.

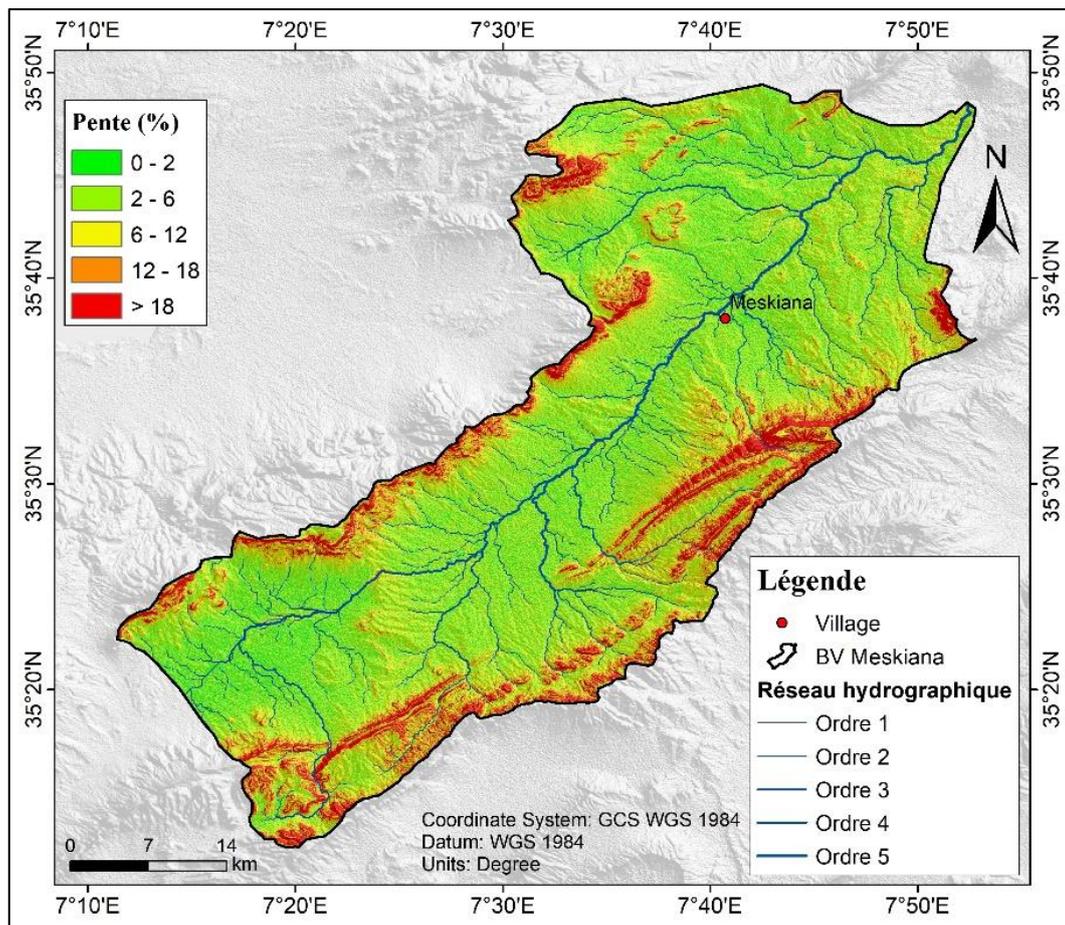


Figure 3: Carte des pentes dans le bassin versant de Meskiana.

4. Géologie :

La géologie du bassin de Meskiana a été examinée en se basant sur les travaux antérieurs de plusieurs géologues éminents, notamment M.G. BETIER et al. (1951) pour la carte géologique de l'Algérie à l'échelle 1/500 000, J.M. VILA (1977) pour les cartes de Dalâa, F'Kirina, et Ain Beida à l'échelle 1/50 000, D. KUSCER et al. (1985) pour la carte de Meskiana à la même échelle, et S. DOZET (1985) pour la carte d'El Aouinet également à l'échelle 1/50 000. La zone Nord-Est, incluse dans la carte de Youks-Les Bains, a été cartographiée par W.M. KOWALSKI (2002).

Ces études ont révélé que le bassin de Meskiana est constitué de formations sédimentaires autochtones Nord-Aurésiennes (J.M. VILA, 1980), situées dans la partie orientale des hautes plaines constantinoises. Ces formations comprennent (Fig. 06) :

- Des terrains anciens représentés par le Trias à faciès lagunaire, se manifestant sous forme de diapirs.
- Des strates importantes datant du Crétacé (Aptien et Maestrichtien) composées de marnes et de calcaires.
- Des grès et des calcaires gréseux marins constituant la base du Miocène.
- Divers dépôts continentaux correspondant au Mio-Plio-Quaternaire.

4.1. Description lithologique des formations :

Deux grands ensembles représentent la lithostratigraphie du bassin de Meskiana :

- Le premier est constitué essentiellement par les formations crétacées et tertiaires qui affleurent dans les bordures ;
- Le second est formé, en général, par un recouvrement Mio-Plio-Quaternaire qui se dépose dans la plaine.

Ces deux ensembles constituent une série stratigraphique complète que nous allons décrire ci-après :

1.1.1. TRIAS :

Selon J.M. VILA (1977), le Trias est caractérisé par des masses chaotiques dépourvues de stratification, où divers éléments sont identifiables tels que des cargneules jaunâtres, des dolomies noires, des calcaires, des gypses marneux et fibreux. Ces formations sont recouvertes par des argilites vertes, ce qui distingue le Trias du constantinois. Ces roches triasiques forment des diapirs qui présentent un contact anormal avec les couches plus récentes dans différentes zones:

-Au nord, près d'El Aouinet, à Mesloul, Argoub Ez Zitoun et Argoub El Houra, le Trias est en contact anormal avec les récifs albo-aptiens.

- Au nord-est (Djebel Belkefif), le Trias est en contact anormal non seulement avec les récifs mentionnés, mais aussi avec le Cénomaniens et le Turonien.

1.1.2. CRETACE:

Aptien: Dans la partie septentrionale, on observe des formations de taille relativement réduite en contact anormal avec des affleurements triasiques, notamment à Mesloul, Djebel Belkefif, Argoub Ez Zitoun et Kodiat El Hadjel. Ces formations se composent principalement de couches carbonatées recouvertes par le Miocène.

Les formations aptiennes se caractérisent par deux faciès distincts selon DOZET (1985). Le premier faciès présente des marnes jaunâtres et verdâtres, des calcaires gris contenant des orbitolines, et des grès quartziteux jaunes. On distingue une zone sous-récifale située en dessous des calcaires récifaux et une zone post-récifale située au-dessus. Les couches aptiennes sous-récifales ne sont pas entièrement exposées. Quant aux couches post-récifales à Mzouzia, elles atteignent une épaisseur de 55 mètres.

Le faciès des calcaires récifaux est composé de calcaires gris à grains fins, de calcaires hôteliers, de calcaires contenant des orbitolines, de calcaires coralliens, de calcaires bréchiques, de calcaires oolithiques et de dolomies. L'épaisseur des calcaires récifaux varie de 10 à 180 mètres. Les fossiles les plus courants dans l'Aptien comprennent des huîtres, divers lamellibranches, des gastéropodes, des ammonites et des coraux.

Albien et Cénomaniens inférieurs: Au Djebel Belkefif et à Mesloula, on observe ces formations caractérisées par des épaisseurs très limitées, ne dépassant pas 100 mètres. Elles se composent de calcaires noirs en plaquettes renfermant de nombreuses bélemnites, ainsi que des intercalations de marnes argileuses gris foncé à noires, selon DOZET (1985).

Cénomaniens moyens et supérieurs: À la limite nord-est de la plaine, dans la région de Bellala, l'étage cénomaniens se manifeste sous forme d'une série remarquablement épaisse, atteignant une épaisseur, variant entre 600 mètres et 1000 mètres. Cette série est composée de marnes argileuses gris verdâtres et jaunâtres contenant des plaquettes de calcite fibreuse, ainsi que des intercalations de marnes grises et gris clair, ainsi que des marno-calcaires. Les plaquettes de calcite présentent des empreintes d'oursins et d'inocérames à leur surface.

La présence de foraminifères est caractéristique du Cénomaniens inférieur. La partie supérieure des couches cénomaniennes contient des lumachelles, des huîtres, des lamellibranches, des gastéropodes, des oursins et des ammonites.

Turonien: Au Nord-Est, à Douar El Machtab, on observe la présence du Turonien, se divisant en :

- Le Turonien basal : une série épaisse composée de marnes grises, de marnes calcaires en plaquettes, de marno-calcaires et de calcaires marneux brunâtres, atteignant une épaisseur pouvant aller jusqu'à 270 mètres. Dans les marnes calcaires et les calcaires marneux, on trouve de nombreuses empreintes d'inocérames, tandis que les marnes argileuses contiennent de grosses globigérines.

- Le Turonien moyen et supérieur : caractérisé par des marnes beiges à grises alternant avec des calcaires zoogènes nodulaires.

Emschérien (Coniacien – Santonien) : Sur les bordures Est et Ouest, l'Emschérien se présente comme une couche épaisse de marnes argileuses verdâtres contenant de la calcite fibreuse, avec des intercalations de marnes grises et de calcaires marneux. Nous observons que du point de vue lithologique, les couches du Coniacien, du Santonien et de la partie basale du Campanien forment un ensemble homogène sans discontinuités apparentes.

- Le Coniacien est caractérisé par des alternances de marnes beiges ou grises et de calcaires gris biodétritiques et grumeleux, avec une épaisseur de 90 mètres.

- Le Santonien est composé de marnes grises et de calcaires marneux contenant des inocérames, avec une épaisseur d'environ 100 mètres.

Campanien : Il affleure sur les deux bordures, à l'ouest à Djebel Bou Thokma et à l'est à Djebel Gourigueur.

- Pour le Campanien inférieur: à sa base, une unité lithologique de couches marneuses, principalement composée de marnes argileuses, s'étend sur une épaisseur de 100 mètres. Au sommet du Campanien inférieur se trouve une unité lithologique caractéristique et distinctive, composée de calcaires crayeux gris et de biomicrites, bien stratifiée avec de nombreuses intercalations de marnes. Ces calcaires et marnes renferment des empreintes d'inocérames. L'épaisseur des couches du sommet du Campanien inférieur varie de 45 à 100 mètres.

- Pour le Campanien supérieur : dans la partie inférieure, sur une épaisseur de 25 mètres, des couches de marnes calcaires alternent avec des marnes. Ces dernières sont surmontées par une série d'environ 130 mètres d'épaisseur, composée de marnes argileuses gris verdâtres.

Maestrichtien : Les calcaires maestrichtiens sont présents dans les monts du Djebel Gourigueur, Djebel Bou Tokhma et Djebel Garne Lahmar. Ces calcaires, de teinte gris clair, sont crayeux, stratifiés et présentent fréquemment des nodules et des intercalations de silex.

- Pour le Maestrichtien inférieur : il se caractérise par une prédominance de marnes, notamment des marnes gris-beiges suivies de marnes beiges et de biomicrites argileuses, formant des bancs décimétriques. L'épaisseur totale de cette série n'excède pas 40 mètres.
- Concernant le Maestrichtien supérieur : il est composé d'une formation calcaire de 40 mètres de biomicrosparites grises, surmontée par 40 mètres de biomicrites. À noter que l'épaisseur totale du Maestrichtien à Djebel Gourigueur avoisine les 460 mètres.

1.1.3. PALEOGENE :

Paléocène: Il est uniquement observé à la limite orientale, entre Djebel Gourigueur et Djebel Serdies. Cette formation se compose d'une série de 50 mètres d'épaisseur, constituée de marnes gris foncé, parfois argileuses.

Eocène: Il a été identifié sur les flancs Est et Ouest du vaste anticlinal de Meskiana, notamment à Djebel Gourigueur et au synclinal de Ain Dalâa. Ce niveau se caractérise par:

- Des formations montiennes, qui constituent la base de l'Eocène, composées de marnes gris verdâtres.
- Des formations thanétio-yprésiennes qui se superposent aux formations précédentes. Elles sont constituées d'alternances de marnes gris-beiges et de biomicrites finement gréseuses et noduleuses, se présentant en bancs décimétriques. Ces couches sont surmontées par des alternances de micrites blanchâtres à nodules phosphatés et de biomicrites interclastiques en bancs métriques ou décimétriques, avec des grains phosphatés et la présence de gastéropodes et de lumachelles. L'épaisseur totale des couches thanétio-yprésiennes est d'environ 200 mètres.

1.1.4. NEOGENE:

Miocène : Les formations miocènes, de taille réduite, se répartissent principalement dans la partie nord de la plaine, notamment à Mesloulâ, Argoub El Manchar, Argoub Ez Zitoun, Kodiat El Agab, Kodiat Rehia et Kodiat Naga.

-Le Miocène inférieur est caractérisé par des conglomérats contenant des galets de calcaires maestrichtiens liés par un ciment sableux, dans lequel on trouve de nombreuses coquilles d'huîtres.

- Le Miocène supérieur, représenté par le Tortonien, affleure principalement à Kodiat Mami. Il se distingue par une série de couches épaisses constituées de grès quartzeux mal cimentés à grains grossiers. Ces couches sont en discordance avec les formations santoniennes, campaniennes et maestrichtiennes.

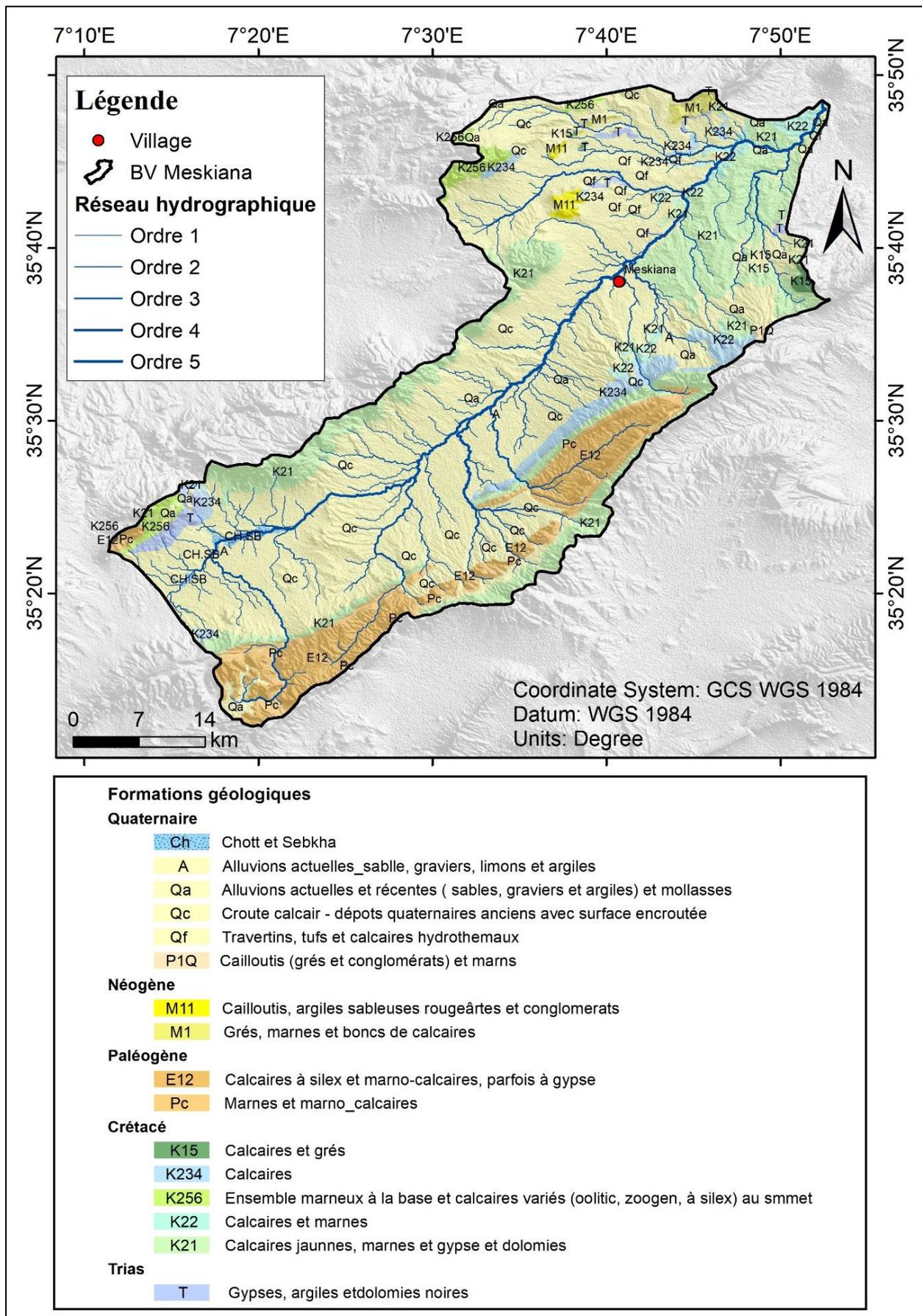


Figure 4: Carte géologique dans le bassin versant Meskiana.

1.1.5. QUATERNAIRE:

Villafranchien : La caractéristique la plus courante est celle des croûtes calcaires massives et blanches. Ces formations, situées en hauteur par rapport aux surfaces environnantes, sont facilement identifiables et sont probablement le résultat de processus karstiques ou de dissolution. Ces faciès sont généralement associés au Villafranchien...

Glacis polygéniques nappant les reliefs : Ces étendues planes en pente douce, appelées glacis, couvrent de vastes zones de la plaine. Elles superposent le cycle glaciaire précédent, identifiable aisément grâce à ses croûtes calcaires massives.

Alluvions actuelles et récentes : Les dépôts alluviaux se trouvent uniquement dans la vallée de Meskiana, leur extension étant limitée à cette région. Ces dépôts se composent de limons fins, de sables fins, de graviers et d'alluvions argileuses, qui se déposent des deux côtés de l'Oued Meskiana.

5. Hydrologie :

Sur cette carte (Fig. 04) représentant le modèle numérique d'altitude de la région de Meskiana, nous pouvons identifier 4 oueds principaux :

- Le premier oued est l'Oued Meskiana, qui traverse la zone cartographiée du nord au sud. Il s'écoule au centre de la région, passant à proximité du village de Meskiana. Cette vallée encaissée constitue l'axe hydrographique principal de la zone.
- Le second oued notable est l'Oued Guergoub el Melah, un affluent qui rejoint l'Oued Meskiana en venant de l'ouest. Il prend sa source dans les zones de relief plus élevé à l'ouest et s'écoule vers l'est en suivant une vallée bien marquée avant de confluer avec l'Oued Meskiana.
- Le troisième oued est l'oued Smard El Oud, située du côté nord-est de la zone d'étude et se jette dans la vallée principale, Meskiana.
- Le quatrième oued est oued Djaou Djellel, située entre oued Maskina et oued Gargoub El Melah.

On peut également observer un réseau dense de cours d'eau de plus petite taille, représentés par les lignes bleues d'ordre inférieur (3, 2 et 1). Ces oueds secondaires drainent les eaux des différents versants et ravins adjacents avant de se jeter dans les deux oueds principaux.

Ces vallées et leurs affluents structurent ainsi le paysage et le réseau hydrographique de cette région montagneuse autour de Meskiana. Leur tracé épouse les dénivellations du relief, avec des oueds s'encaissant dans les zones les plus élevées avant de rejoindre les axes de drainage majeurs.

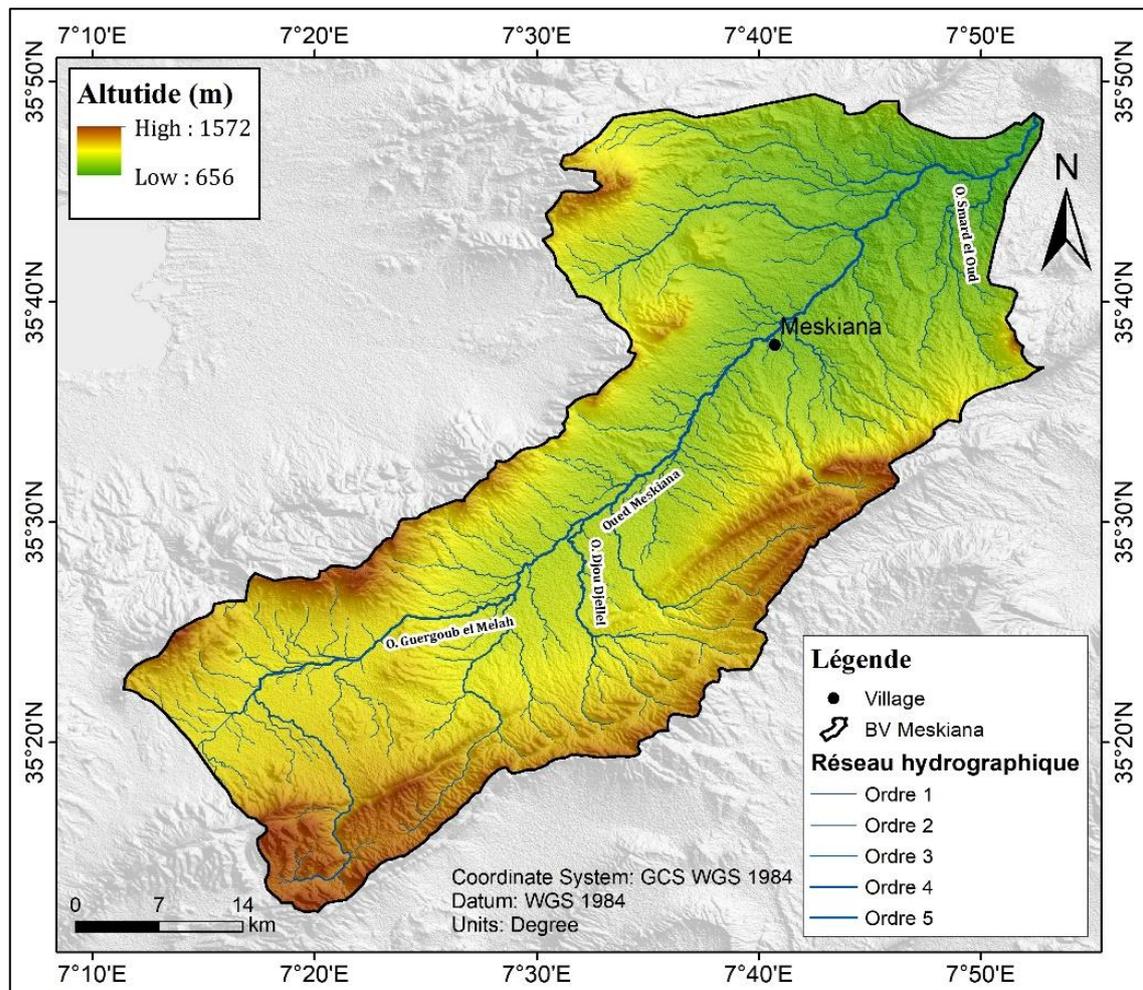


Figure 5: Carte du réseau hydrographique dans le bassin versant de Meskiana

6. Hydrogéologie :

Les formations aquifères revêtent une importance cruciale dans notre étude actuelle en raison de leur composition lithologique et de leur étendue spatiale, car elles influent sur le fonctionnement hydrogéologique. (Fig. 05).

Cette carte représente la perméabilité des sols dans la région de Meskiana, une zone montagneuse du nord-Est de l'Algérie. Une échelle de couleurs indique les différents niveaux de perméabilité :

Bleu foncé pour les zones de chott et sebka, vert clair pour une bonne perméabilité, vert foncé pour une perméabilité moyenne et bleu clair pour une faible perméabilité.

On peut observer une large zone bleu clair traversant la région du nord au sud, correspondant à une zone de faible perméabilité.

Cette bande imperméable est bordée de part et d'autre par des zones de perméabilité moyenne à bonne, représentées en vert foncé et vert clair. Ces zones plus perméables sont probablement composées de sols plus poreux comme des alluvions

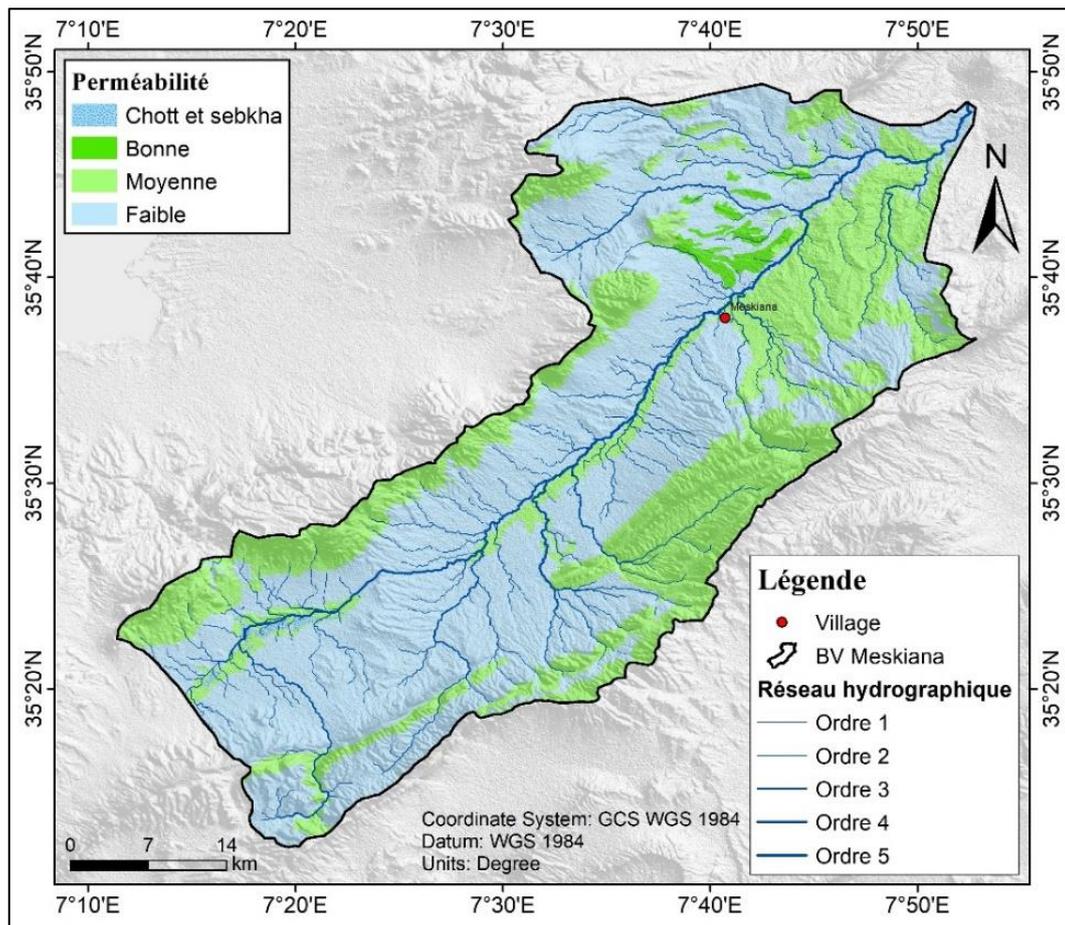


Figure 6: Carte hydrogéologique dans le bassin versant de Meskiana

6.1. Géométrie de l'aquifère :

L'analyse des données de la prospection électrique (CGG, 1974) ainsi que des résultats des sondages mécaniques a permis de cartographier la répartition du remplissage dans la nappe alluviale de Meskiana:

La zone de Dalâa s'avère être une dépression alluvionnaire où l'épaisseur des alluvions peut atteindre jusqu'à 155 mètres. Entre Dalâa et Meskiana, dans la zone de Zebâr, l'épaisseur des dépôts alluviaux ne dépasse pas les 100 mètres.

Il est à noter que ces alluvions reposent sur un substratum marneux qui affleure au nord de la plaine.

6.2. Piézométrie :

6.2.1. Evolution de la piézométrie :

Le suivi de l'évolution piézométrique de la nappe dans le temps et dans l'espace permet de reconnaître d'une part, la direction générale de l'écoulement et d'autre part d'identifier quelques paramètres hydrodynamiques (gradient hydraulique et vitesse d'écoulement). Ces derniers nous

renseignent sur le temps de séjour des eaux d'infiltration dans la couche aquifère et par conséquent nous informe sur le degré des échanges géochimiques entre l'eau et la roche.

Comme les eaux souterraines représentent le moyen de transport des substances minérales et organiques, la détermination de leur itinéraire renseigne sur leur minéralisation et l'origine de leur pollution.

6.2.2. Carte piézométrique :

La carte (Fig. 06) représente la surface piézométrique, c'est-à-dire les niveaux des nappes d'eau souterraines, dans une région où se trouve le village de Meskiana.

La légende indique les différentes plages d'altitude, exprimées en mètres, à laquelle se situent les nappes phréatiques, représentées par des couleurs distinctes :

- On observe que les niveaux les plus élevés des nappes souterraines se situent principalement dans la partie nord et ouest de la région, avec des altitudes allant jusqu'à 1300 mètres.
- Les niveaux les plus bas se trouvent dans la partie sud-est, autour de 700 mètres d'altitude.

6.3. Conditions aux limites :

Dans le dessein d'approfondir notre compréhension du fonctionnement hydraulique de la nappe, une carte des conditions limites de la nappe aquifère de Meskiana a été élaborée. Cette carte a été construite en se basant sur les caractéristiques lithologiques des formations géologiques, les propriétés géophysiques de celles-ci, ainsi que les relevés piézométriques.

La bordure orientale du Djebel Gourigueur, principalement constituée de calcaires fracturés datant du Maestrichtien, agit comme une limite perméable, alimentant latéralement la nappe alluviale. À l'opposé, la bordure occidentale du Djebel Bou Tokhma et du Djebel Guern Ahmar, composée de calcaires perméables du Maestrichtien, constitue une limite avec un flux entrant. En raison de leur nature lithologique, les marnes du Cénomaniens, affleurant au nord-est de la plaine, servent de limite étanche.

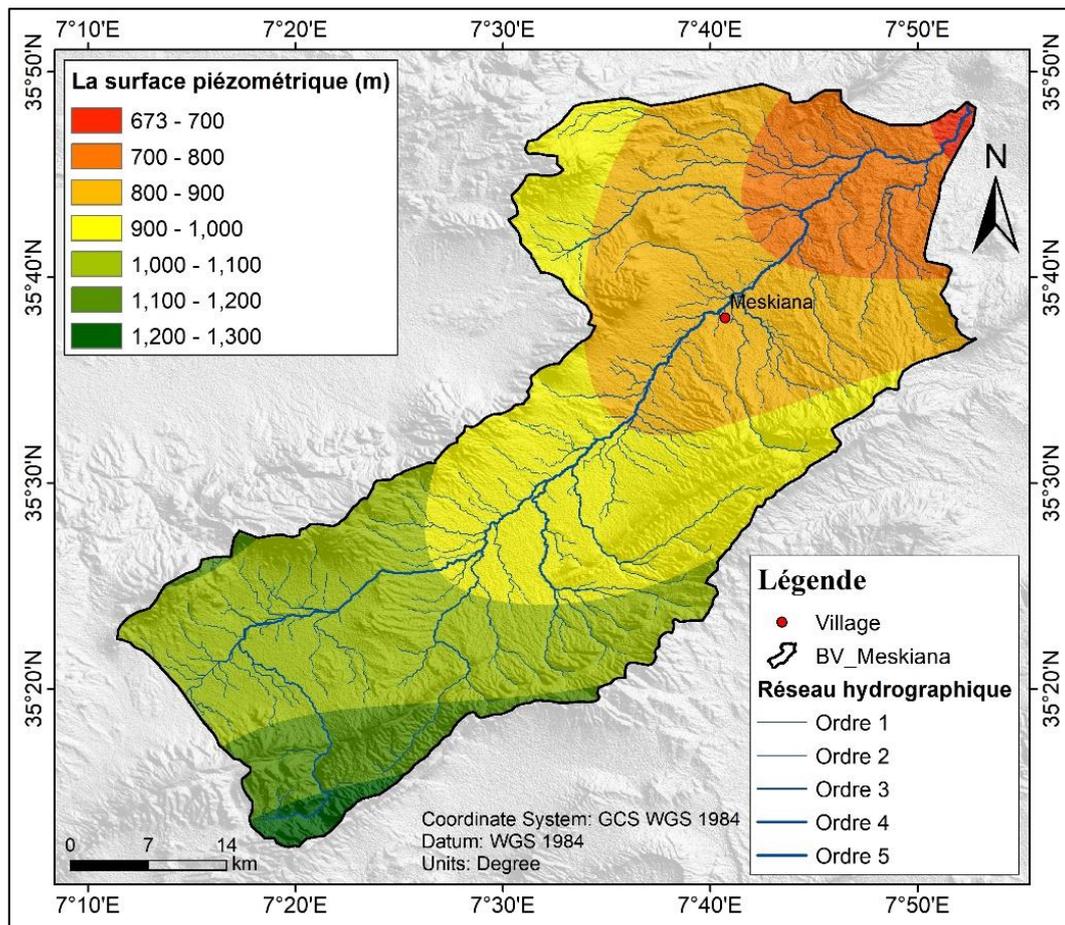


Figure 7: Carte piézométrique de la nappe de Meskiana

Les marnes et les argiles de l'Emschérien forment le substratum imperméable, empêchant ainsi les infiltrations profondes. Ces eaux s'écoulent gravitairement vers l'aval. Au nord, le substratum imperméable affleure en surface, rendant ainsi presque toute cette limite imperméable, avec une zone centrale caractérisée par un flux imposé sortant.

L'Oued Meskiana agit comme un exutoire de la nappe alluviale en période de basses eaux et peut également l'alimenter en période de hautes eaux, représentant donc une limite avec un potentiel imposé. Les précipitations efficaces sont pratiquement inexistantes, comme démontré dans l'analyse du bilan hydrologique.

7. Climatologie :

Le bassin de Meskiana est une région située au nord-est de l'Algérie, à mi-chemin entre la côte méditerranéenne et le début du désert du Sahara. Cette position géographique particulière lui confère un climat aride et semi-aride, caractérisé par de faibles précipitations et des températures élevées. Dans cette région, les fluctuations des nappes phréatiques souterraines (nappes aquifères) et du niveau piézométrique (niveau de l'eau dans les puits et forages) sont étroitement liées aux précipitations et aux prélèvements d'eau effectués par l'Homme. En d'autres termes, le niveau des nappes souterraines varie en fonction des quantités d'eau de pluie qui s'infiltrent dans le sol et

rechargent ces réserves, ainsi que des quantités d'eau pompées pour divers usages (domestique, agricole, industriel, etc.).

7.1. Facteurs climatiques :

7.2.1. Température :

La température joue un rôle primordial dans la formation et la caractérisation du climat d'une région donnée. Cela est dû au fait que la température est étroitement liée à l'énergie solaire reçue, qui est la principale source d'énergie régissant les processus climatiques.

Les fluctuations de la température influencent directement le processus de vaporisation de l'eau, que ce soit à la surface des étendues d'eau (mers, lacs, rivières) ou dans les sols et les nappes phréatiques souterraines. Plus la température est élevée, plus l'évaporation de l'eau est importante.

Par conséquent, la température a un impact significatif sur le niveau d'évapotranspiration, qui correspond à la combinaison de l'évaporation de l'eau depuis les surfaces et la transpiration des plantes. Un niveau d'évapotranspiration élevé, favorisé par des températures plus chaudes, peut conduire à une augmentation de la salinité des eaux de surface et souterraines, en raison de la concentration des sels dissous restants.

Variations des températures moyennes mensuelle :

Ce graphique (Fig. 08) à barres illustre les températures moyennes, minimales et maximales pour différents mois de l'année.

On peut observer que les mois les plus chauds sont juin, juillet et août, avec des températures maximales dépassant les 35°C et les mois les plus frais sont décembre, janvier et février, avec des températures minimales autour de 3°C.

Les écarts entre les températures minimales et maximales sont importants, particulièrement en été, indiquant de grandes amplitudes thermiques quotidiennes. En hiver, ces écarts sont plus resserrés, avec des températures plus stables.

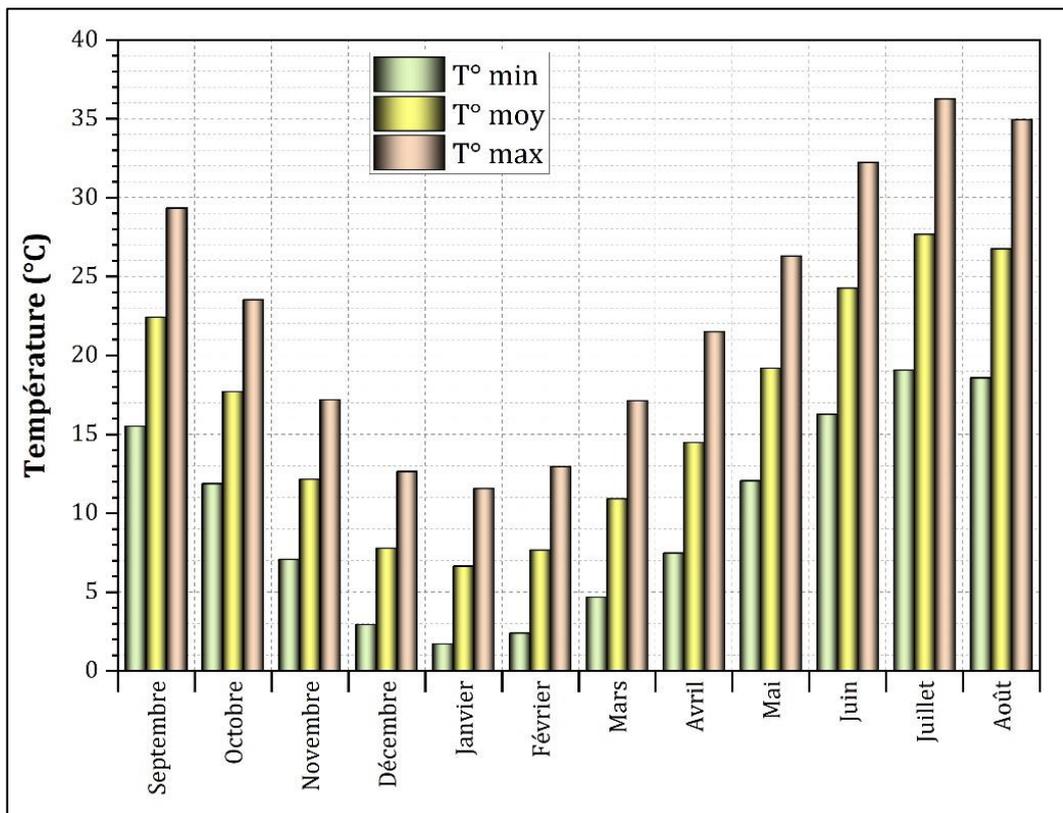


Figure 8: Variations mensuelles des températures dans la station de Meskiana.

Variations de la température moyenne annuelles :

Ce graphique (Fig. 09) représente l'évolution des températures minimales, moyennes et maximales sur une longue période de temps. L'axe horizontal indique les dates, allant de 1983 à 2033, tandis que l'axe vertical affiche les températures en degrés Celsius, de 0°C à 25°C environ.

Les données sont présentées sous forme de trois courbes distinctes :

- La courbe bleue représente les températures minimales (T° min). Elle oscille généralement entre 8°C et 12°C sur l'ensemble de la période.
- La courbe noire correspond aux températures moyennes (T° moy). Elle fluctue entre environ 14°C et 18°C.
- La courbe rouge illustre les températures maximales (T° max). Elle oscille généralement entre 21°C et 25°C sur l'ensemble de la période.

On observe des variations cycliques marquées pour chacune des courbes, avec des pics et des creux successifs. Ces cycles semblent avoir une périodicité annuelle, suggérant les changements saisonniers typiques des températures.

Dans l'ensemble, le graphique permet de visualiser clairement les fluctuations saisonnières des températures et leurs amplitudes sur une période de 50 ans, mettant en évidence les tendances à long terme ainsi que la variabilité d'une année à l'autre.

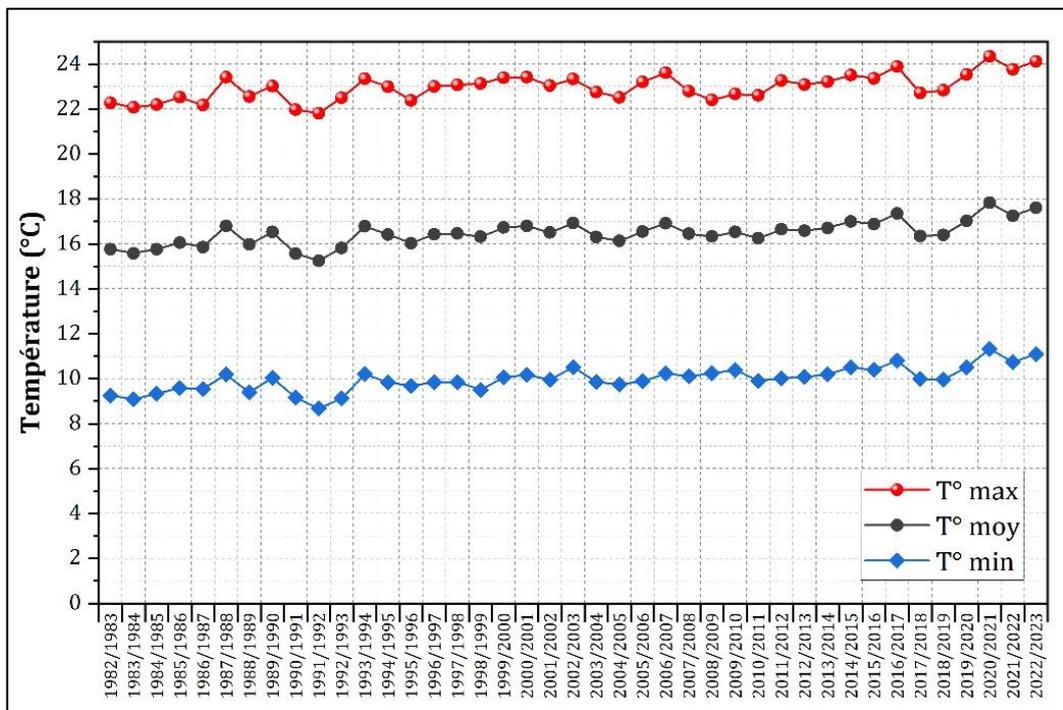


Figure 9: Variations mensuelles des températures dans la station de Meskiana.

7.2.2. Précipitation :

L'étude pluviométrique, qui consiste à analyser la distribution spatiale et temporelle des précipitations (pluie, neige, grêle, etc.), revêt un intérêt considérable dans le domaine de l'hydroclimatologie. Cette science étudie les interactions entre le cycle hydrologique et le climat. En effet, les précipitations constituent l'une des principales sources d'alimentation des ressources en eau douce. En analysant les quantités de précipitations, leur répartition géographique et leur variabilité dans le temps (saisonniers, annuelle, etc.), il est possible de caractériser le régime hydrologique d'une région donnée.

Cela permet d'identifier les périodes de hautes eaux (crues) et de basses eaux, ainsi que de prévoir les risques d'inondations ou de sécheresses.

Cette carte (Fig. 10) montre la répartition des précipitations annuelles moyennes dans la région de Meskiana, au nord-est de l'Algérie. À partir de la légende des couleurs, on peut observer que les taux de précipitations dans la région varient entre 413 et 580 mm par an.

Il est clair que les taux de précipitations les plus élevés sont concentrés dans la partie nord-ouest de la région, atteignant 560-580 mm par an (couleur bleu foncé). En revanche, les taux les plus bas se situent dans le sud-est avec 413-420 mm (couleur rouge).

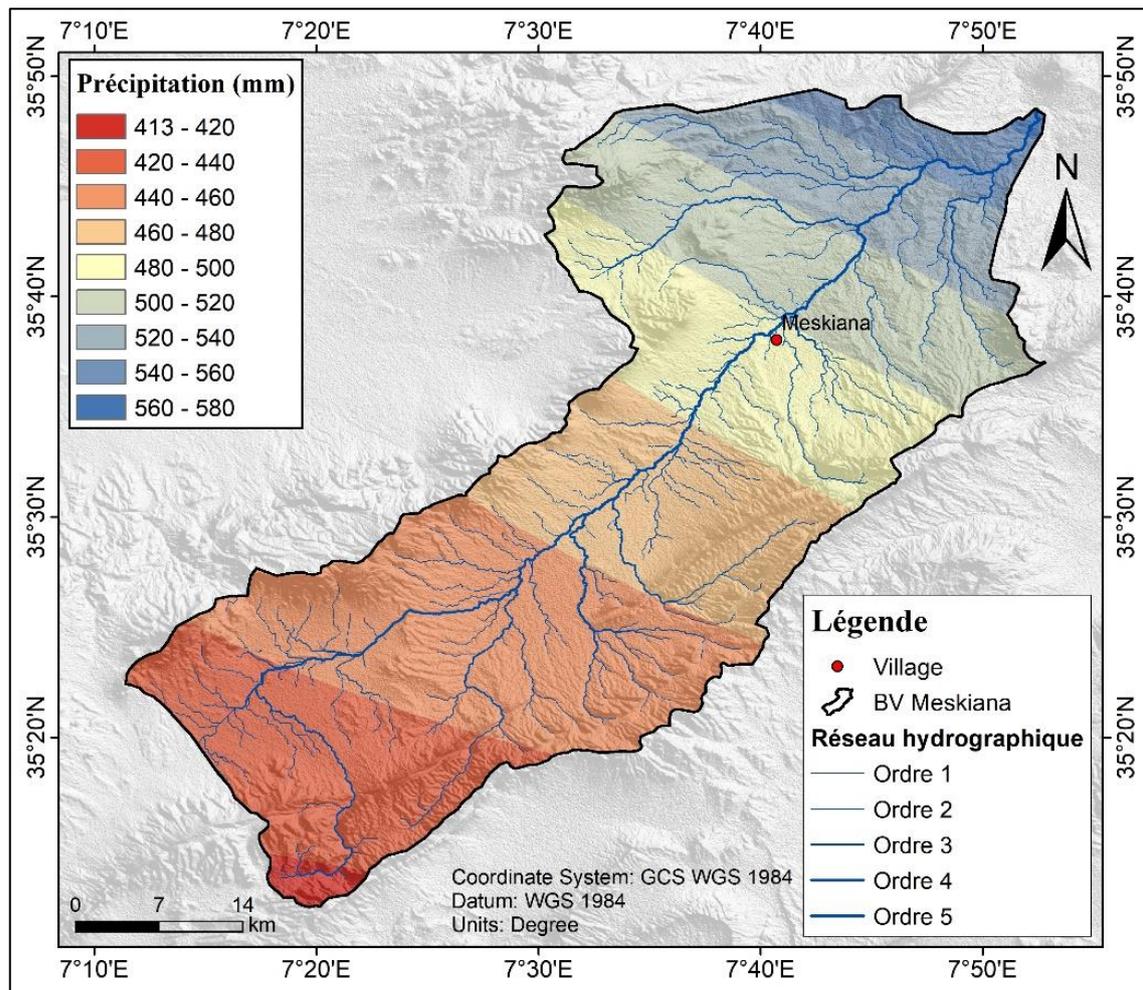


Figure 10: Carte des précipitations moyennes annuelles dans le bassin versant Meskiana

Variations moyennes mensuelles des précipitations :

Ce graphique (Fig. 11) en forme d'histogramme représente les précipitations mensuelles moyennes dans le bassin versant Meskiana.

On peut observer que les précipitations sont assez irrégulières tout au long de l'année, avec des variations importantes d'un mois à l'autre. Les mois les plus pluvieux semblent être septembre, mars et mai, avec des niveaux de précipitations dépassant les 40 mm.

Le mois de mai présente le pic le plus élevé, avec des précipitations supérieures à 45 mm en moyenne. Cela laisse supposer que cette période correspond à la saison des pluies dans cette région.

Ensuite, on constate une diminution progressive des précipitations durant les mois d'hiver, avec des niveaux inférieurs à 35 mm.

Et la période la plus sèche de l'année semble être (juin, juillet et août), où les précipitations mensuelles sont très faibles, ne dépassant pas les 16 mm pour les mois d'été.

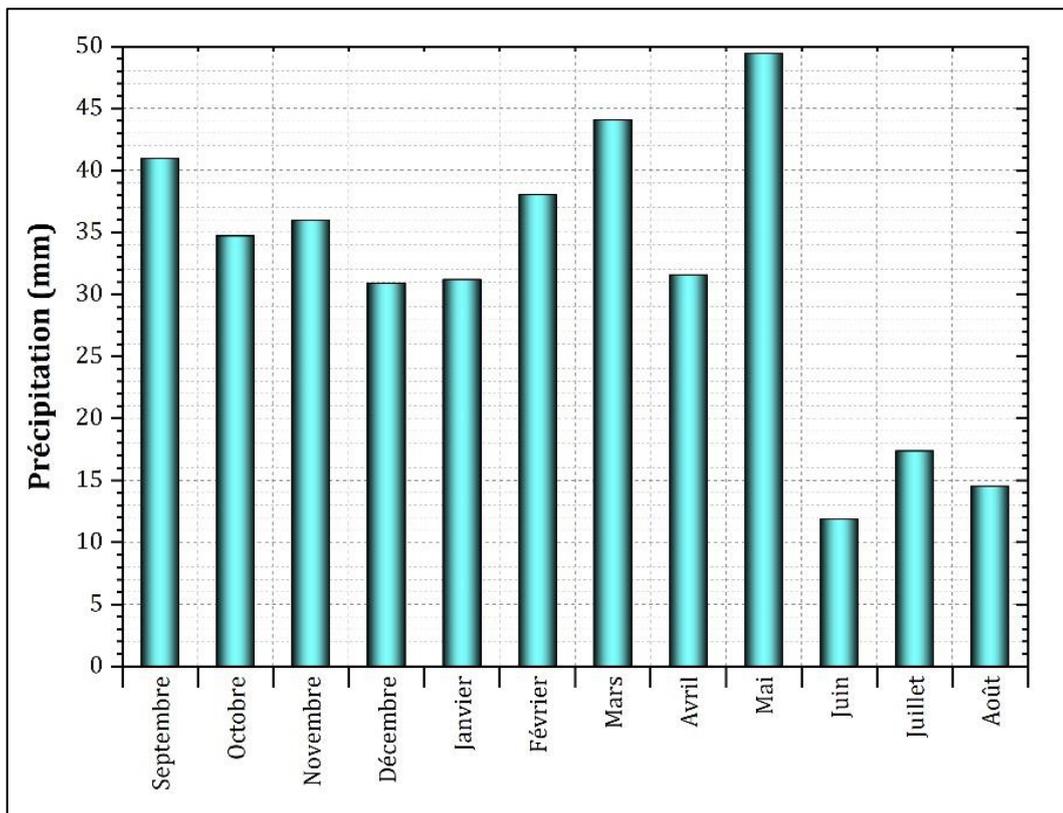


Figure 11: Variations mensuelles des précipitations dans la station de Meskiana.

Variations moyennes annuelles des précipitations :

On peut observer sur ce graphique qui montre les précipitations annuelles du bassin Meskiana les précipitations annuelles varient considérablement d'une année à l'autre, avec des pics et des creux marqués. Certaines années connaissent des niveaux de précipitations très élevés, dépassant parfois les 500 mm, tandis que d'autres années enregistrent des niveaux beaucoup plus faibles, inférieurs à 260 mm (Fig. 12).

Ce graphique met en évidence la grande variabilité interannuelle des précipitations dans cette région, caractéristique des climats semi-arides ou méditerranéens. On remarque des périodes de sécheresse prolongées, avec plusieurs années consécutives de faibles précipitations, entrecoupées de périodes plus humides avec des épisodes pluvieux intenses. Cette fluctuation des précipitations d'une année sur l'autre peut avoir des impacts significatifs sur les ressources en eau de la région, ainsi que sur les activités agricoles et d'autres secteurs économiques dépendants de l'eau.

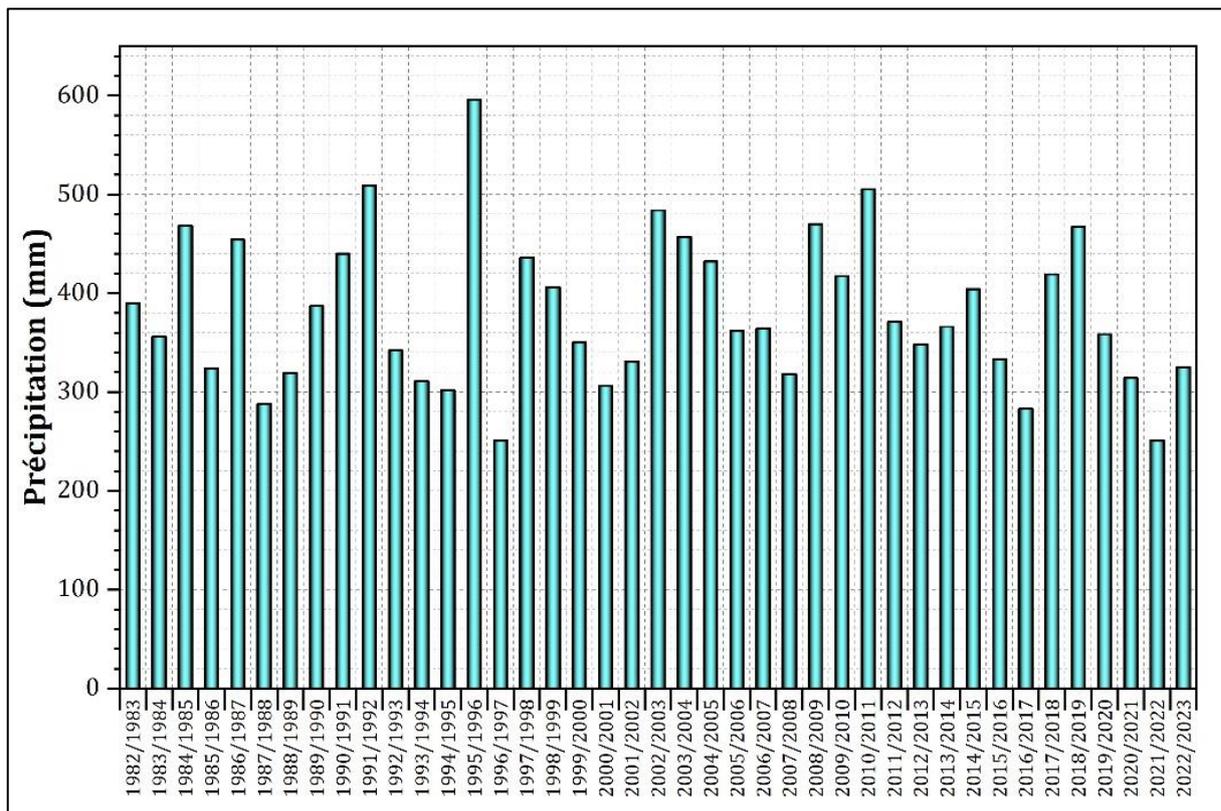


Figure 12: Variations annuelles des précipitations dans la station de Meskiana.

7.2.3. Relation température-précipitation :

Selon les climatologues Gaussen et Bagnouls (1953), pour déterminer si un mois ou une période (saison) est véritablement sèche ou pluvieuse, il ne suffit pas de considérer seulement les précipitations. Il faut combiner à la fois les facteurs thermiques (températures) et pluviométriques (précipitations) (Fig. 13).

La courbe pluviothermique :

Ce graphique représente les variations de la précipitation (en mm), de la température (en °C), ainsi que les périodes sèches et humides tout au long de l'année dans une région de Meskiana.

L'axe vertical de gauche montre l'échelle des précipitations en millimètres, tandis que l'axe de droite indique les températures en degrés Celsius.

La courbe noire représente les niveaux de précipitations mensuelles. On observe deux pics distincts, un en mai et mars (période humide en bleu clair) avec des précipitations dépassant 50 mm, et un second plus petit en décembre et janvier.

La courbe rouge illustre les températures moyennes mensuelles. Elles sont les plus basses en décembre, janvier et février, autour de 10°C, puis augmentent progressivement pour atteindre un maximum d'environ 28°C en juillet et août (période sèche en jaune).

Les zones bleues claires correspondent aux périodes humides où les précipitations sont élevées, typiquement en hiver. Les zones jaunes indiquent les périodes sèches et chaudes, généralement en été.

Ce graphique montre donc les tendances saisonnières marquées d'une région, avec un hiver humide et frais suivi d'un été chaud et sec, séparés par des transitions printanières et automnales. Il permet de visualiser les variations conjointes des précipitations et des températures au fil des mois.

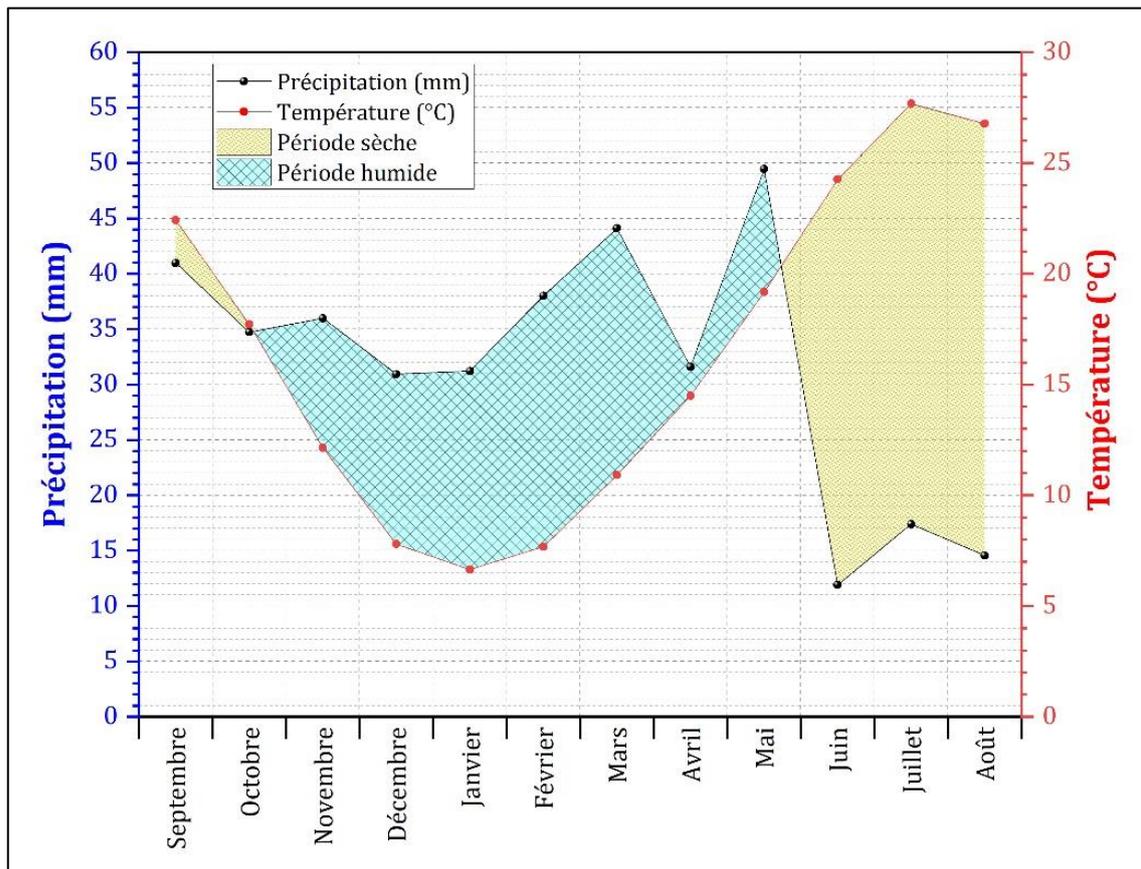


Figure 13: Diagramme pluviométrique de la station de Meskiana.

7.2.4. La vitesse du vent :

Ce graphique (Fig. 14) est un diagramme à barres qui représente les vitesses moyennes du vent pour différents mois de l'année.

On observe que les vitesses de vent sont relativement constantes tout au long de l'année, avec des valeurs comprises entre environ 3,2 et 3,6 m/s pour la plupart des mois.

Cependant, quelques mois se démarquent légèrement avec des vitesses de vent un peu plus élevées ou plus basses que la moyenne :

Avril et février affichent les vitesses les plus élevées, autour de 3,8 m/s et octobre à la vitesse la plus basse, autour de 3,1 m/s.

Dans l'ensemble, le graphique montre une certaine stabilité des régimes de vents tout au long de l'année pour cette région, avec de légères variations saisonnières.

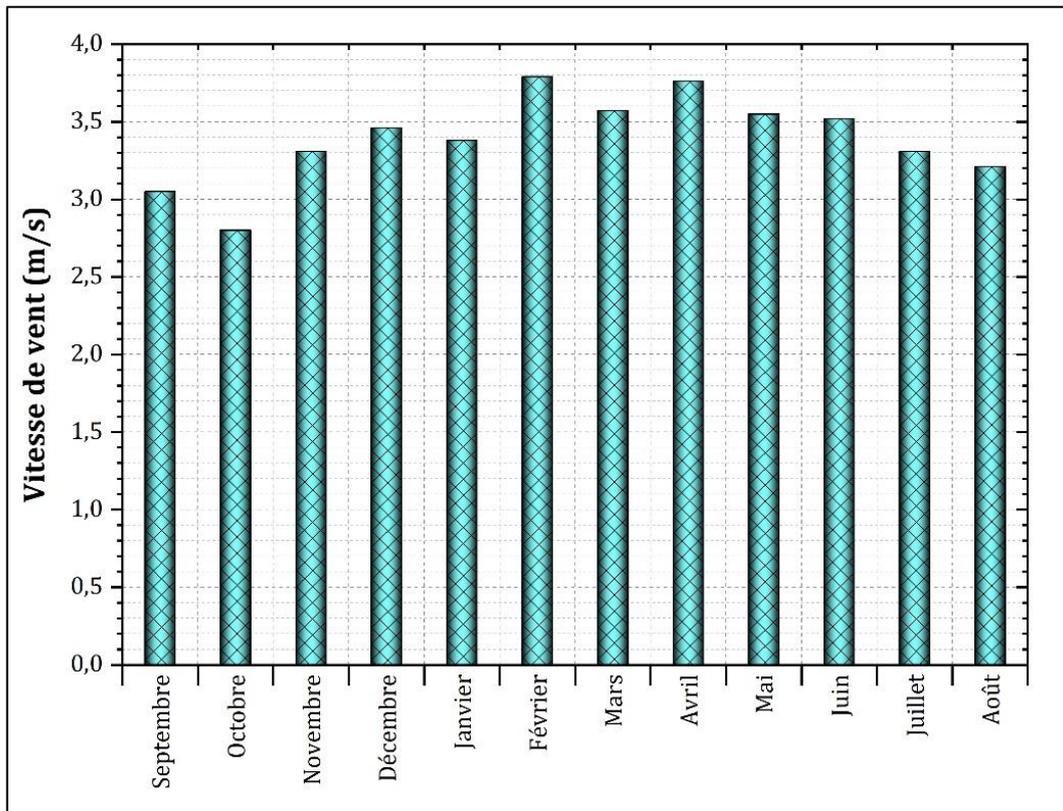


Figure 14: Variations mensuelles de la vitesse des vents à la station de Meskiana.

7.2.5. Ruissellement :

Le ruissellement est l'écoulement à la surface du sol des eaux provenant des précipitations, qu'il s'agisse de la pluie ou de la fonte des neiges, avant que ces eaux ne rejoignent les cours d'eau ou nappes souterraines.

Variations moyennes mensuelles des ruissellements :

Ce graphique (Fig. 15) à barres représente les niveaux moyens de ruissellement pour chaque mois de l'année. L'axe horizontal indique les mois, tandis que l'axe vertical représente ruissellement en millimètres.

On observe que les mois de février ont les taux d'ruissellement les plus élevés, atteignant environ 2,9 mm. Ensuite, ruissellement commence à diminuer progressivement pendant les mois de juin et juillet et aout, atteignant son niveau le plus bas à environ 0,5 mm à 0,9 mm. Quant aux autres mois, le débit de ruissellement varie entre 1,6 mm et 2,5 mm.

Ce modèle indique l'existence de deux saisons principales : une saison humide en hiver et une saison relativement sèche en été. Ce modèle saisonnier des ruissellements pourrait être lié aux conditions climatiques et géographiques de la région où les données ont été recueillies.

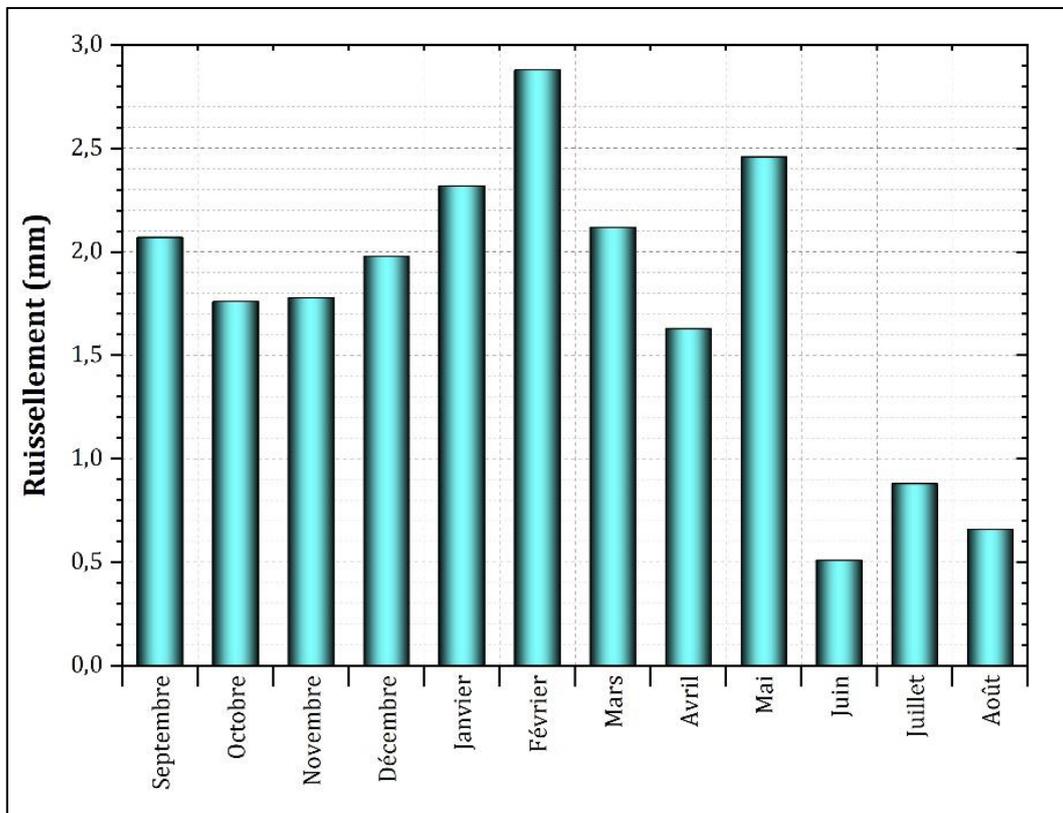


Figure 15: Variations mensuelles de la vitesse des vents à la station de Meskiana.

Variations moyennes annuelles des ruissellements :

Ce graphique (Fig. 16) représente l'évolution d'un paramètre appelé "Ruissellement" en mm sur une période de temps allant de 1982 à 2023.

On observe une série de pics et de creux qui indiquent des variations significatives du ruissellement au fil du temps. Les deux pics les plus élevés atteignent environ 5,5 mm deux années différentes (1996/1997) et (2002/2003), probablement en raison de fortes précipitations pendant ces périodes.

En dehors de ces pics majeurs, le graphique montre une alternance de sommets plus modestes, généralement compris entre 1 et 3 mm, et de creux approchant zéro. Cette alternance régulière de hausses et de baisses du ruissellement pourrait être liée à un cycle saisonnier, avec des épisodes pluvieux plus importants à certaines périodes de l'année.

Il est intéressant de noter que l'amplitude des variations semble relativement stable sur l'ensemble de la période représentée, sans tendance claire à l'augmentation ou à la diminution à long terme du ruissellement.

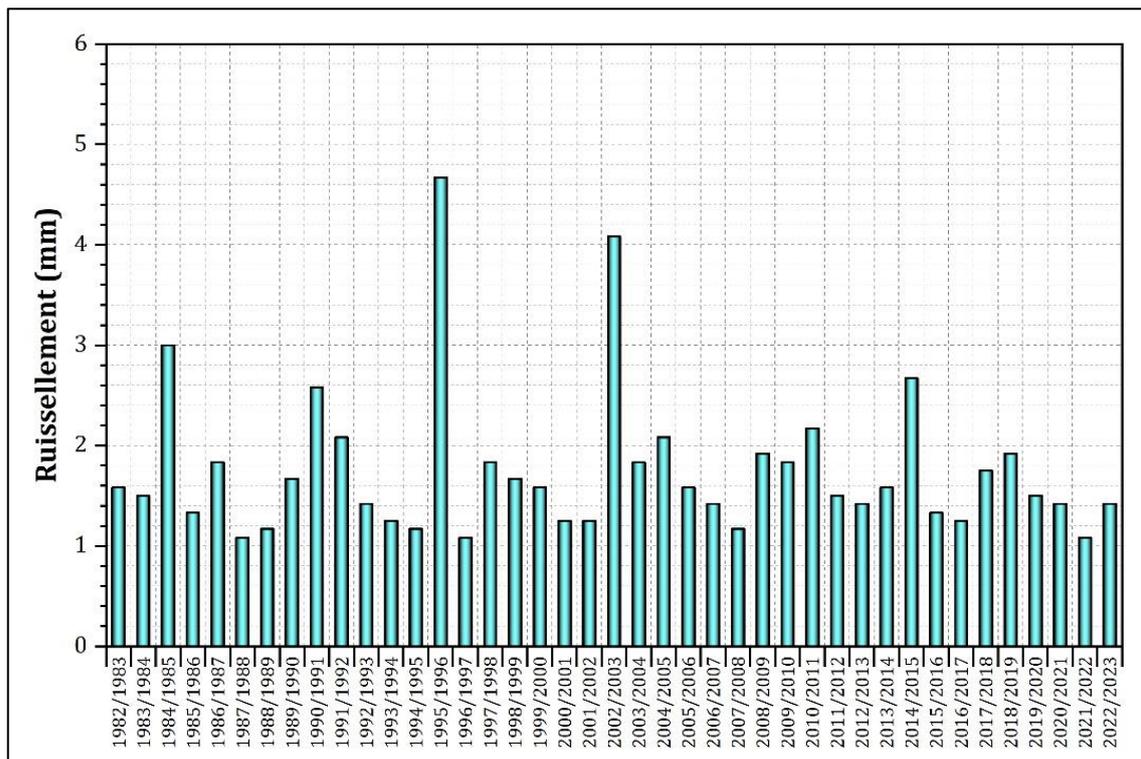


Figure 16: Variations mensuelles de la vitesse des vents à la station de Meskiana.

7.2. Bilan hydrique :

La connaissance approfondie du bilan hydrique est cruciale car elle nous permet d'évaluer comment les précipitations se répartissent entre les différentes composantes de ce bilan. Ces composantes sont l'écoulement (ruissellement des eaux en surface), l'infiltration (pénétration des eaux dans le sol) et l'évaporation (vaporisation de l'eau du sol et des surfaces).

L'estimation précise de ces trois paramètres (écoulement, infiltration, évaporation) constitue un outil fondamental pour analyser la ressource en eau disponible à différentes échelles temporelles (jour, mois, année...) et spatiales (bassin versant, région, pays...).

7.2.1. Calcul du bilan hydrique selon la formule de CW Thornthwaite :

Le bilan de Thornthwaite permet d'estimer pour chaque mois :

- L'évapotranspiration potentielle en mm ;
- L'évapotranspiration réelle en mm ;
- La réserve facilement utilisable (RFU) en mm, qui représente la quantité d'eau disponible dans les couches superficielles du sol.
- L'excédent d'écoulement (Ex) en mm dans le cas où l'ETP est égal à l'ETR, donc lorsque la RFU est à son maximum (100 mm).

Cet excédent, également appelé pluie efficace, correspond à l'eau restante des précipitations qui alimente le ruissellement et l'infiltration.

- Le déficit agricole (DA) en mm, résultant de la différence entre l'ETP et l'ETR. Il indique la quantité d'eau qu'il faudrait apporter par irrigation aux cultures pour éviter les effets de la sécheresse.

Dans ce cas précis, l'évapotranspiration potentielle calculée selon la formule de Thornthwaite est:

$$\text{ETP} = 16 (10 T / I) a. K$$

$$a = (1.6/100) I + 0.5 \quad (12)$$

Avec :

ETP : Evapotranspiration potentielle mensuelle en mm ;

T : Température moyenne mensuelle en °C ;

I : Indice thermique annuelle où $I = \sum_1^{12} i$ et $i = (T/5)^{1.514}$

7.2.2. Interprétation du bilan de Thornthwaite :

Ce graphique (Fig. 17) représente le bilan hydrique d'une région de Meskiana, en illustrant les surplus d'eau ainsi que les périodes de déficit agricole et epuisement du stock.

Le graphique comporte plusieurs courbes :

- La courbe rouge représente l'évapotranspiration potentielle (ETP), c'est-à-dire l'eau qui pourrait être perdue par évaporation et transpiration des plantes, atteignant un pic élevé en été.
- La courbe verte correspond à l'évapotranspiration réelle (ETR), plus faible que l'ETP car limitée par les disponibilités en eau.
- La courbe bleue indique les précipitations mensuelles.

On distingue deux zones principales :

- Un déficit agricole en début de saison (bleu), où l'ETR dépasse les précipitations, entraînant un épuisement des réserves en eau du sol.
- Un surplus d'eau (vert) au cœur de la saison, où les précipitations excèdent l'ETR, permettant de recharger les stocks en eau.

Au total, on note un épisode prolongé d'épuisement du stock d'eau (jaune) durant l'été chaud, impliquant un important déficit agricole qui peut affecter les cultures.

Ce bilan hydrique permet de visualiser les périodes critiques de stress hydrique et d'identifier les besoins éventuels en irrigation pour une gestion durable des ressources en eau agricoles.

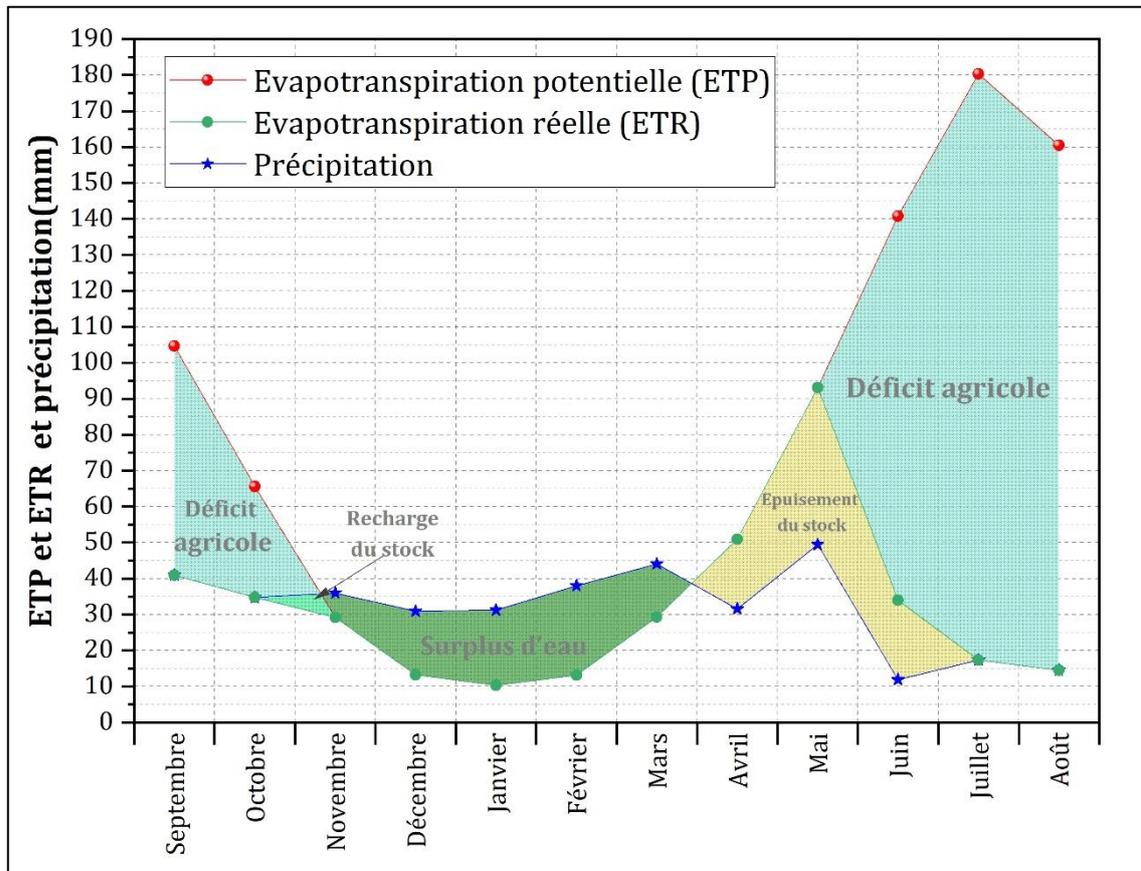


Figure 17: Représentation graphique du bilan hydrique du bassin versant Meskiana.

Chapitre II

Matériels et méthodes

Chapitre II : Matériels et méthodes

Dans ce chapitre, nous allons présenter les diverses approches de traitement pour identifier et cartographier l'ensemble des paramètres ou indices caractérisant les méthodes de vulnérabilité (DRASTIC et IS), en intégrant plusieurs sources de données telles que les images satellites, les cartes scannées, les données numériques, etc. Ces données seront traitées à l'aide de formules numériques et intégrées dans le système d'information géographique (SIG) afin de produire une carte globale de la vulnérabilité de la région de Meskiana. Tous les processus de traitement seront effectués à l'aide du logiciel ArcGIS.

1. Les logiciels utilisés :

1.1. Arc Gis 10.3 :

Le logiciel ArcGIS Desktop a été mis à contribution pour accomplir une variété de tâches liées aux systèmes d'information géographique (SIG). Parmi celles-ci figurent la cartographie, la gestion des données, l'analyse spatiale, la mise à jour des données et le géotraitement. Grâce à cet outil, nous avons pu créer des cartes thématiques, effectuer des calculs, réaliser divers traitements et superposer les différents paramètres entrant en jeu dans le calcul des indices de vulnérabilité.

1.2. Google Earth Pro :

Google Earth est un logiciel conçu par Google qui offre la possibilité de visualiser la Terre grâce à un assemblage d'images satellitaires. Cet outil nous a été utile pour collecter des données géographiques facilitant la localisation et le repérage de zones spécifiques. Son interface visuelle construite à partir de prises de vue satellites nous a permis de mieux situer et identifier certains éléments géographiques nécessaires à notre étude.

2. Les données utilisées :

2.1. Le Modèle Numérique de terrain (MNT) :

Un Modèle Numérique de Terrain (MNT) est une représentation en trois dimensions de la surface d'une région ou d'une planète, construite à partir de données d'élévation du sol. Ce modèle ne prend pas en compte les objets présents sur le terrain et repose sur le modèle STRM avec une résolution de 30 mètres par pixel. Dans notre étude, ce modèle numérique de terrain a été exploité dans deux objectifs principaux :

- Délimiter avec précision les bassins versants et tracer le réseau hydrographique.
- Générer la carte des pentes du terrain afin de déterminer le paramètre "T" de notre analyse.

2.2. Les cartes scannées :

Carte géologique : Nous avons obtenu une version numérisée (scannée) de la carte géologique du bassin versant de Meskiana. Cette carte a ensuite été importée dans le logiciel ArcGIS, puis géoréférencée afin de la positionner correctement. Une fois cette étape réalisée, nous avons extrait la partie de la carte correspondant précisément aux limites du bassin versant, limites déterminées lors de l'étape de "Délimitation d'un bassin versant", en utilisant l'outil "Extract by Mask". Pour finaliser le traitement, nous avons procédé à la numérisation (digitalisation) de cette carte en différenciant les diverses formations lithologiques présentes. Une rasterisation a ensuite été appliquée, ce qui nous a permis de générer les cartes représentant les paramètres "I" (lithologie de la zone non saturée) et "A" (lithologie de l'aquifère) du modèle DRASTIC.

Carte des sols : Nous nous sommes d'abord procuré la carte pédologique (des sols) de la région de Tébessa en Algérie. Cette carte a été importée dans le logiciel ArcGIS, puis géoréférencée afin de la positionner correctement. Ensuite, en utilisant l'outil "Extract by Mask", nous avons découpé cette carte pédologique numérisée en nous basant sur les limites du bassin versant déterminées précédemment. Pour conclure, nous avons procédé à la digitalisation de cette carte en différenciant les différents types de sols présents. Après une étape de rasterisation, elle nous a permis de créer la carte représentant le paramètre "S" (types de sol) du modèle DRASTIC.

Carte hydrogéologique : Nous avons acquis la carte des ressources en eau souterraine du nord-Est de l'Algérie et l'avons intégrée dans ArcGIS, suivie d'une opération de géoréférencement. Ensuite, nous avons découpé cette carte des ressources en eau, préalablement scannée, en suivant les contours du bassin versant définis lors de l'étape de « Délimitation de bassin versant », en utilisant l'outil « Extract by Mask ». Pour finir, la numérisation de la carte a été réalisée en tenant compte des différents types d'aquifères et des valeurs de leur perméabilité, afin de produire la carte du paramètre DRASTIC « C ».

Carte piézométrique : Pour générer une carte piézométrique similaire à celle présentée dans l'image, les étapes suivantes doivent être suivies :

- Collecter les données spatiales relatives aux niveaux des nappes souterraines à partir de mesures sur le terrain ou de données existantes provenant de puits d'observation dans la zone d'étude.
- Saisir ces données de niveaux piézométriques dans un logiciel SIG sous forme d'une couche de points, chaque point représentant un puits avec sa valeur de niveau d'eau associée.

- Utiliser l'outil d'interpolation du logiciel SIG pour créer une surface continue des niveaux piézométriques à partir des données ponctuelles. Différentes méthodes d'interpolation peuvent être utilisées comme l'inverse de la distance pondérée (IDW) ou le krigeage.
- Classer cette surface continue en différentes catégories ou plages de valeurs à l'aide de l'outil de reclassement.
- Attribuer une gamme de couleurs distincte à chaque catégorie de niveaux piézométriques afin de les différencier facilement sur la carte finale.

2.3. Données climatiques :

Nous avons collecté les données rasters relatifs aux précipitations moyennes annuelles du bassin versant de Meskiana entre les années 1982 et 2023, et les avons traitées directement dans le système d'information géographique (SIG) en utilisant les outils d'interpolation « Krigeage ». Une équation empirique a été utilisée pour calculer la recharge effective « R » en mm en fonction du produit des précipitations moyennes annuelles « P » avec les facteurs que du type de sol et de l'occupation des sols (Williams et Kissel, 1991) :

$$R = P * (C_i * C_s * C_f)$$

Avec :

R : Recharge

P : Précipitation

C_i : Facteur de sol

C_s : Facteur de pente

C_f : Facteur culture/végétation

3. Modélisation de la vulnérabilité : (méthode DRASTIC et méthode IS) :

3.1. La conversion des données vectorielles en raster (Rastérisation) :

La modélisation DRASTIC implique de travailler avec des données raster. Par conséquent, il est nécessaire de convertir les données vectorielles en raster par le processus de rastérisation.

Les données vectorielles, telles que les cartes géologiques, pédologiques, hydrogéologiques et d'occupation du sol, sont obtenues par la numérisation des cartes scannées après géoréférencement afin de créer des cartes des paramètres de vulnérabilité pour la méthode de vulnérabilité "DRASTIC" et la méthode d'indice de susceptibilité « IS » ou « DRATOS ».

Pour effectuer la conversion des données vectorielles en raster (rastérisation), l'outil suivant est utilisé : ArcToolbox → Conversion Tools → To Raster → Feature to Raster.

Le traitement par interpolation des données alphanumériques permet de créer directement des cartes des iso-valeurs de type raster.

3.1.1. Description de la méthode DRASTIC :

La méthode DRASTIC a été développée dans les années 1980 par l'Association Nationale des Puits d'Eau suite à une demande de l'Agence de Protection de l'Environnement des États-Unis. Son objectif était de créer une méthode pour estimer la vulnérabilité intrinsèque des conditions hydrogéologiques rencontrées aux États-Unis. DRASTIC est la méthode la plus couramment utilisée pour la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines, étant une méthode de système paramétrique.

Elle permet d'évaluer la vulnérabilité verticale en se basant sur sept paramètres principaux :

- D : Épaisseur de la zone non saturée.
- R : Recharge efficace.
- A : Matériaux de l'aquifère ou zone saturée.
- S : Type de sol.
- T : Topographie ou pente.
- I : Impact de la zone vadose ou non saturée.
- C : Perméabilité.

Chaque paramètre se voit attribuer un poids prédéterminé compris entre 1 et 5, reflétant son importance dans les processus de transport et d'atténuation des contaminants. Un paramètre jugé crucial se voit attribuer un poids de 5, tandis qu'un paramètre ayant moins d'impact reçoit un poids de 1.

Les valeurs des poids des paramètres de la méthode DRASTIC utilisées sont celles définies par Aller et al. (1987).

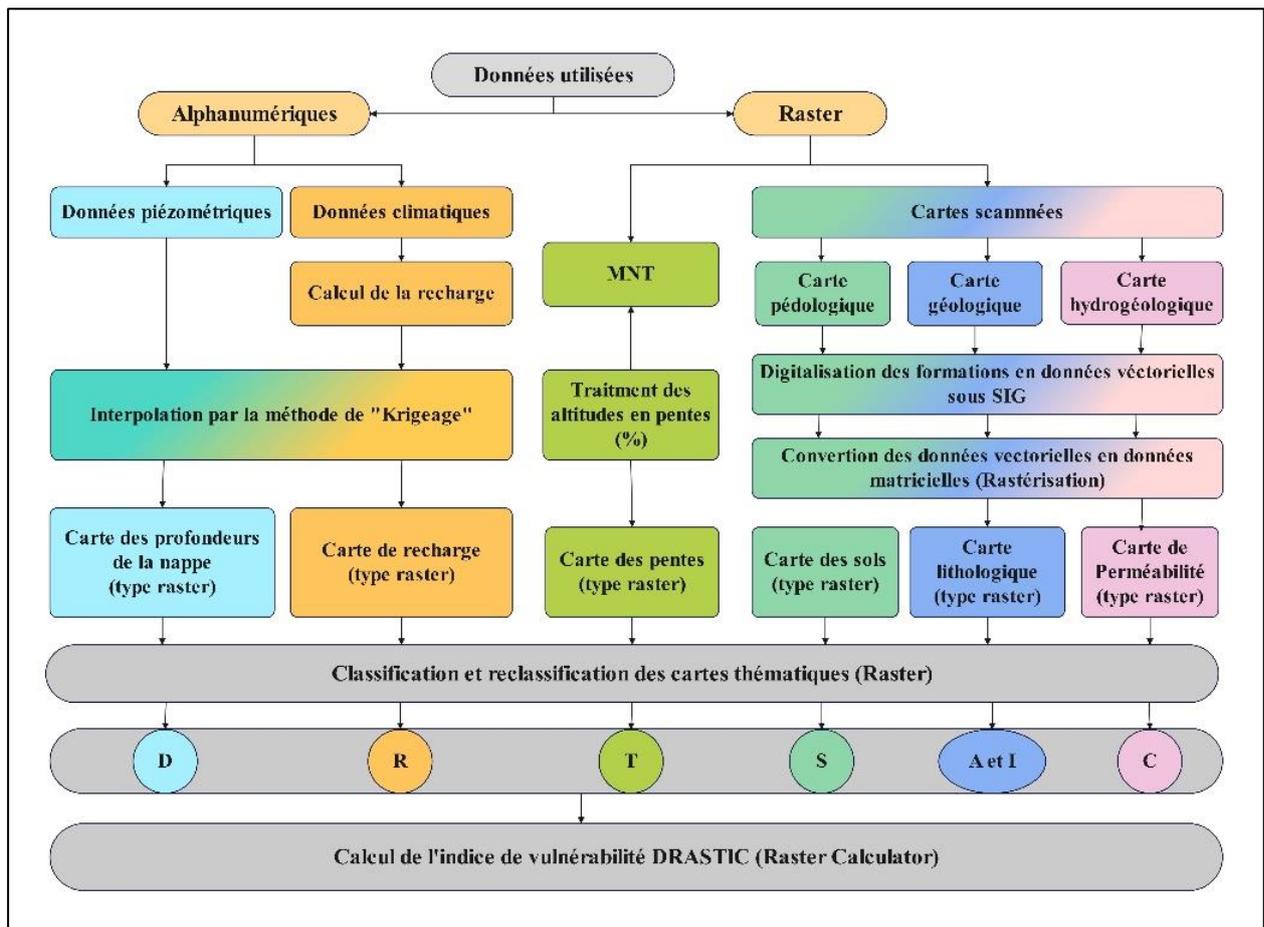


Figure 18: organigramme de la modélisation de la vulnérabilité des eaux souterraines (DRASTIC).

3.1.2. Classification et reclassification et pondération des données (paramètres DRASTIC) :

Dans la méthode DRASTIC, il existe 7 paramètres correspondant aux initiales formant le nom de la méthode. Chacun de ces paramètres est subdivisé en plusieurs classes, définies par des intervalles de valeurs. Chaque intervalle se voit attribuer une cote variant de 1 à 10. La cote la plus basse correspond à une vulnérabilité à la contamination plus faible.

La reclassification consiste à attribuer à chaque classe de chaque paramètre la cote DRASTIC appropriée selon le tableau suivant. Un système de pondération (poids) de 1 à 5 est également appliqué par l'auteur en fonction de l'importance du paramètre pour la vulnérabilité.

Tableau 1: Les paramètres DRASTIC (Aller et al. 1987)

Symbole	Nom du paramètre	Classe	Cote	Poids
D	Distance à la nappe (m)	0 -1.5	10	5
		1.5 – 4.5	9	
		4.5 – 9	7	
		9 – 15	5	
		15 – 23	3	
		23 – 30	2	
		> 30	1	
R	Recharge efficace (mm)	0 – 50	1	4
		50 – 100	3	
		100 – 175	6	
		175 – 225	8	
		> 225	9	
A	Nature de la zone saturée	Calcaire karstique	10	3
		Basalte	9	
		Sable et gravier	8	
		Calcaire massif	6	
		Grès massifs	6	
		Métamorphique altéré	4	
		Métamorphique	3	
		Shale massif	2	
S	Nature du sol	Peu épais ou absent	10	2
		Gravier	10	
		Sables	9	
		Argile, agrégats	7	
		Limon sableux	6	
		Limon	5	
		Limon silteux	4	
		Limon argileux	3	
		Argiles non agrégée	1	
T	Topographie, pente (%)	0 – 2	10	1
		2 – 6	9	
		6 – 12	5	
		12 – 18	3	
		> 18	1	
I	Nature de la zone vadose	Calcaire karstique	10	5
		Sable et gravier	9	
		Sable et gravier avec silt et argile	8	
		Grès	6	
		Calcaire	6	
		Silt/Argile	1	
C	Perméabilité (m/s)	$> 9,4 \cdot 10^{-4}$	10	3
		$4,7 \cdot 10^{-4} - 9,4 \cdot 10^{-4}$	8	
		$32,9 \cdot 10^{-5} - 4,7 \cdot 10^{-4}$	6	
		$14,7 \cdot 10^{-5} - 32,9 \cdot 10^{-5}$	4	
		$4,7 \cdot 10^{-5} - 14,7 \cdot 10^{-5}$	2	
		$4,7 \cdot 10^{-7} - 4,7 \cdot 10^{-5}$	1	

3.1.3. Calcul de l'indice de vulnérabilité DRASTIC des eaux souterraines :

Maintenant que nous disposons des couches de données requises, nous allons procéder à la création d'une grille de vulnérabilité des eaux souterraines DRASTIC en utilisant l'équation d'index DRASTIC. Cela nécessitera l'utilisation du calculateur de raster pour combiner plusieurs grilles dans une superposition pondérée.

La fusion de couches raster est un processus essentiel mais simple avec "Spatial Analyst". Il est souvent nécessaire de créer un seul raster composé de plusieurs ensembles de données. Le concept est similaire à celui de la superposition avec des couches vectorielles, où vous créez un seul raster parmi plusieurs, à la différence notable que les valeurs de cellule varient en fonction de l'expression utilisée. Il est impératif que la syntaxe du calculateur de raster soit correcte, sinon vous risquez de rencontrer une "erreur de syntaxe".

$$"D" * 5 + "R" * 4 + "A" * 3 + "S" * 2 + "T" * 1 + "I" * 5 + "C" * 3$$

Les indices obtenus sont regroupés en cinq classes selon la méthode d'Aller et al. (1987), chaque classe correspondant à un degré de vulnérabilité.

Tableau 2: les valeurs des indices correspondent à chaque degré de vulnérabilité (Aller et al. 1987).

Degré de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité
Très faible	< 80
Faible	80 – 120
Moyen	120 – 160
Elevé	160 – 200
Très élevé	> 200

L'approche cartographique a été mise en œuvre à l'aide du logiciel ArcGIS. Elle permet de compiler les données spatiales, de calculer les indices à partir de la répartition géographique des scores pondérés attribués aux sept paramètres, et de créer une carte de vulnérabilité représentant la variation des indices de vulnérabilité. La classification de ces indices selon les classes DRASTIC permet de spatialiser la vulnérabilité relative de chaque secteur étudié.

3.1.4. Description de la méthode d'indice de susceptibilité « SI » ou « DRAOS » :

La méthode SI est une méthode spécifique de vulnérabilité verticale développée au Portugal par Ribeiro (2000). Elle prend en compte les polluants d'origine agricole, notamment les nitrates et les pesticides.

Cette méthode considère cinq paramètres, dont les quatre premiers sont identiques à ceux de la méthode DRASTIC, mais avec des cotes multipliées par 10.

- D : Profondeur de la nappe
- R : Recharge efficace de l'aquifère
- A : Lithologie
- T : Pente topographique

Un cinquième paramètre, OS, a été introduit pour représenter l'occupation du sol, avec des cotes variant de 0 à 100, indiquant la vulnérabilité croissante attribuée à chaque classe d'occupation des sols.

Les poids attribués aux paramètres IS varient de 0 à 1 en fonction de leur importance dans la vulnérabilité.

L'indice de vulnérabilité IS est calculé en faisant la somme des produits des cotes par les poids des paramètres correspondants.

L'utilisation des terres et la couverture végétale jouent un rôle crucial dans la prospection des eaux souterraines, influençant le taux de recharge, le ruissellement et l'évapotranspiration.

a. Caractérisation de l'occupation des sols :

La carte d'occupation des sols a été élaborée à partir d'images de très haute résolution de Google Earth. Ces images ont été digitalisées, classées, vérifiées sur le terrain, puis converties au format raster à l'aide du logiciel ArcGIS. Les classes d'occupation du sol comprennent :

- Surface d'eau
- Forêt
- Surface agricole
- Surface urbaine
- Sol nu

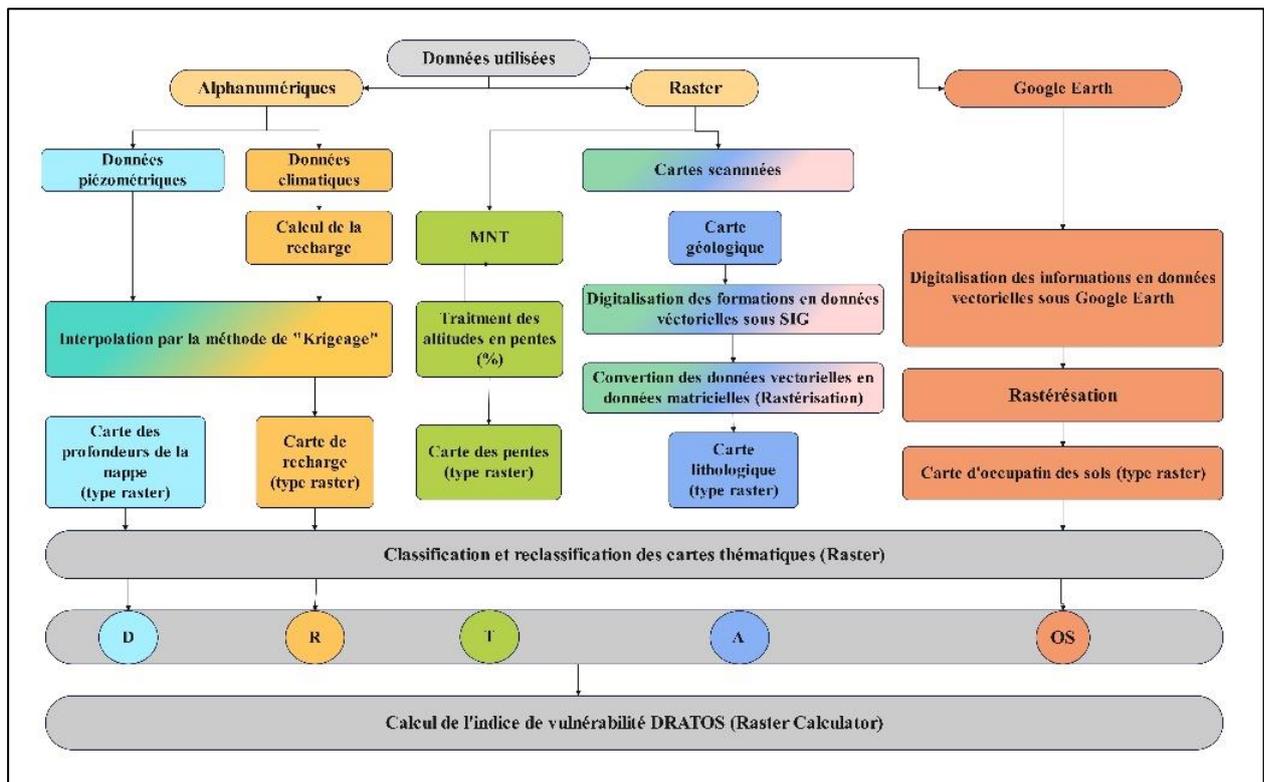


Figure 19: organigramme de la modélisation de la vulnérabilité des eaux souterraines (DRATOS).

b. Classification, reclassification et pondération des données (paramètres IS) :

La reclassification est effectuée pour les données de la classe de paramètre OS, en utilisant le tableau suivant :

Tableau 3: les valeurs lues attribuées à l'occupation du sol dans (IS) et adoption à la zone de Meskiana

Classes d'occupation du sol selon Corine Land Cover	LU selon L.Ribeiro
Décharge industrielle, décharge d'ordures, mines	100
Périmètre irriguée, rizières	90
Carrière, chantier naval	80
Zone artificielle couvertes, zone vertes	75
Cultures permanentes (vignes, vergers, oliviers, ... etc.)	70
Zone urbaine discontinues	70
Pâturages et zones agro forestières	50
Milieux aquatiques (marais, salines, ... etc.)	50
Forêts et zones semi-naturelles	0

Tableau 4: Poids attribués aux paramètres SI.

Paramètre	D	R	A	T	OS
Poids	0.186	0.212	0.259	0.121	0.222

c. Calcul de l'indice de vulnérabilité des eaux souterraines SI :

Comme dans la méthode DRASTIC, l'équation implique l'utilisation de poids (dont la somme totale est égale à 1) attribués à divers paramètres :

$$SI = "D" * 0.186 + "R" * 0.212 + "A" * 0.259 + "T" * 0.121 + "OS" * 0.222$$

Tableau 5: Critères d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode SI

Degré de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité
Faible	< 45
Moyen	45 – 64
Élevé	65 – 84
Très élevé	85 – 100

4. Validation de la carte de vulnérabilité :

Toute carte de vulnérabilité élaborée doit être soumise à des tests et à une validation par le biais de mesures et de l'analyse des données chimiques des eaux souterraines. En effet, plusieurs chercheurs tels que Isabel et al. (1990), Champagne et Chapuis (1993), Mohamed (2001), Jourda et al. (2006), Hamza et al. (2007), Kouamé (2007), et Gabriel Etienne et al. (2009) ont examiné la validité des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité à la pollution en se fondant sur des données chimiques des eaux souterraines.

4.1. Concentration des nitrates :

Dans le cadre de notre étude, la validité de l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution par les méthodes DRASTIC et la méthode IS a été vérifiée en analysant le taux de nitrates dans les eaux souterraines et en comparant la répartition spatiale de ces nitrates avec la distribution des classes de vulnérabilité. À cet effet, les résultats d'analyse des nitrates réalisés en 2016 sur un ensemble de seize puits ont été utilisés.

4.2. Matrice de confusion :

Cet outil calcule une matrice de confusion à partir des points d'évaluation de la précision. Les points d'évaluation de la précision sont générés par l'outil "Créer des points d'évaluation de la précision" et mis à jour par l'outil "Mettre à jour les points d'évaluation de la précision". Ces deux

outils s'assurent que chaque point dispose de valeurs de classes valides pour les champs CLASSIFIED et GROUND_TRUTH. L'outil calcule la précision des utilisateurs et des producteurs pour chaque classe, ainsi qu'un indice Kappa d'accord global. Ces taux de précision sont compris entre 0 et 1,1 représentant une précision de 100 %.

Chapitre III
Résultats et discussion

Chapitre III : Résultats et discussion

1. Élaboration des couches thématiques correspondant aux paramètres de la méthode DRASTIC :

2.1. Profondeur de la nappe (D) :

Sur la carte (Fig. 20) représentant les profondeurs de la nappe phréatique dans le bassin versant de Meskiana, on observe la présence de nombreuses zones aux profondeurs variées à travers l'ensemble du bassin. En effet, la profondeur représentée s'étend d'une valeur inférieure à 1,5 mètre jusqu'à une profondeur supérieure à 30 mètres.

- Les zones de couleur rouge représentent les endroits où la profondeur est inférieure à 1,5 mètre.
- Les zones de couleur jaune sont considérées comme des zones de profondeur moyenne, c'est-à-dire entre 9 et 15 mètres.
- Quant aux zones de couleur vert foncé, elles représentent les endroits où la profondeur dépasse 30 mètres.

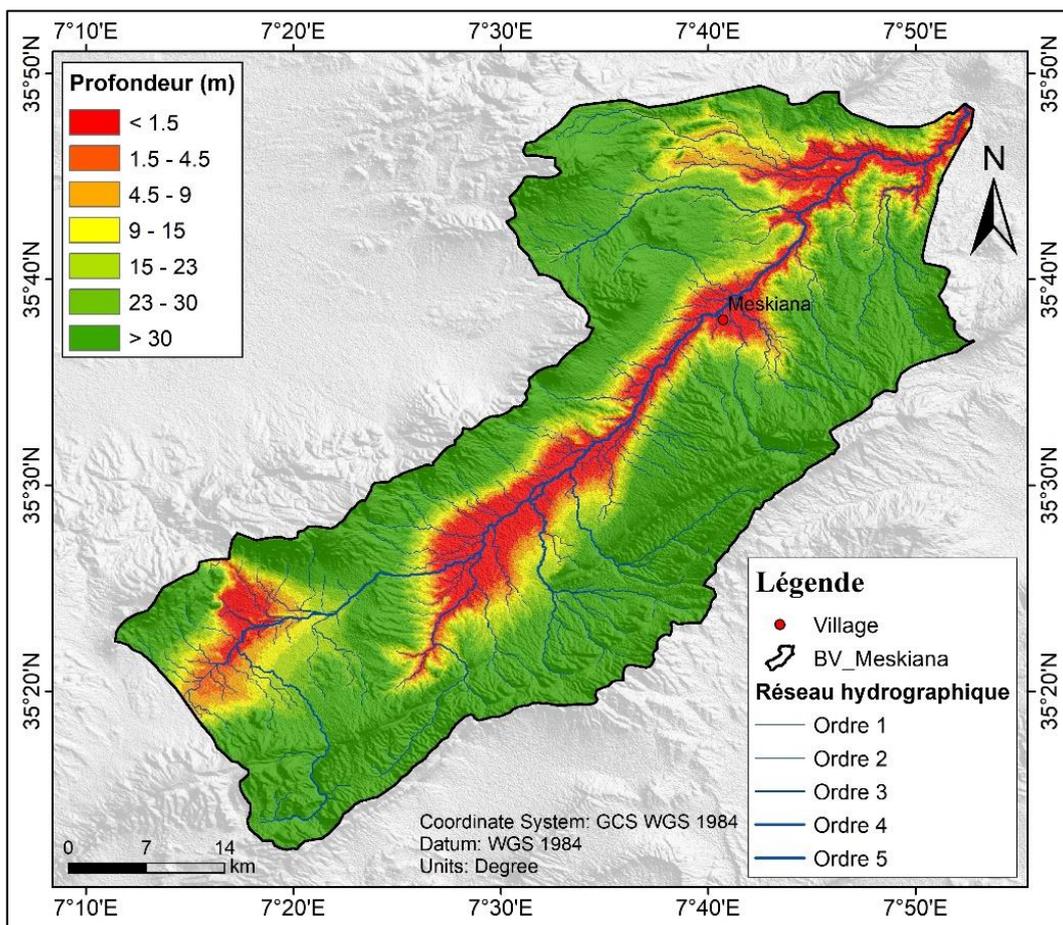


Figure 20: Carte des profondeurs de la nappe du Bassin versant de Meskiana.

Les valeurs du paramètre D s'échelonnent entre 1 et 10.

La carte de la profondeur (Fig. 2) de la nappe phréatique classe les zones en 05 catégories :

- Les zones répertoriées en "rouge" (< 1,5 m) constituent les secteurs présentant les risques les plus élevés et sont donc considérées comme les plus vulnérables. Couvrant une superficie approximative de 58,07 km², ces régions rouges critiques nécessitent une attention de la plus haute priorité et des mesures d'urgence adéquates.
- Bien que moins vulnérables que les zones rouges, les zones dites "oranges" (1,5 - 4,5 m) demeurent relativement exposées aux risques. Couvrant une superficie approximative de 8,75 km², ces régions nécessitent une attention particulière et des mesures préventives adéquates.
- Les zones répertoriées en "jaune" (4,5 - 15 m) présentent un niveau de risque modéré. Représentant 14,94% de la superficie totale, soit environ 272,97 km², ces régions requièrent une vigilance accrue sans toutefois nécessiter des mesures d'urgence immédiate. Bien que moins exposées que les zones rouges ou oranges, leur vulnérabilité intermédiaire ne doit pas être négligée.
- Les zones dites "vert clair" (15 - 30 m) bénéficient d'un niveau de protection relativement élevé grâce à leur profondeur importante. Ces régions, couvrant près de 30% de la superficie totale, soit approximativement 187.89 km² carrés, présentent des risques minimales en raison de leur altitude supérieure.
- Les zones qualifiées de "vert foncé" (> 30 m) sont les plus sécurisées et les moins vulnérables parmi toutes les zones évoquées précédemment. Grâce à leur altitude élevée dépassant les 30 m, ces régions bénéficient d'une protection maximale face aux risques potentiels qui représente 9.75% de la superficie totale, soit environ 178.14 km².

Tableau 06 : Répartitions des classes de vulnérabilité pour le coefficient "D".

Tableau 6: Répartitions des classes de vulnérabilité pour le coefficient "D".

Classe de Vulnérabilité		Value	Surface (km ²)	Surface (%)	
Très élevé	(<1.5)	1	1060.94	58.07	58.07
Elevé	(1.5 - 4.5)	2	159.85	8.75	8.75
Moyen	(4.5 - 9)	3	155.16	8.49	14.94
	(9 - 15)	5	117.81	6.45	
Faible	(15 - 23)	7	97.92	5.36	8.49
	(23 - 30)	9	57.27	3.13	
Très faible	(> 30)	10	178.14	9.75	9.75

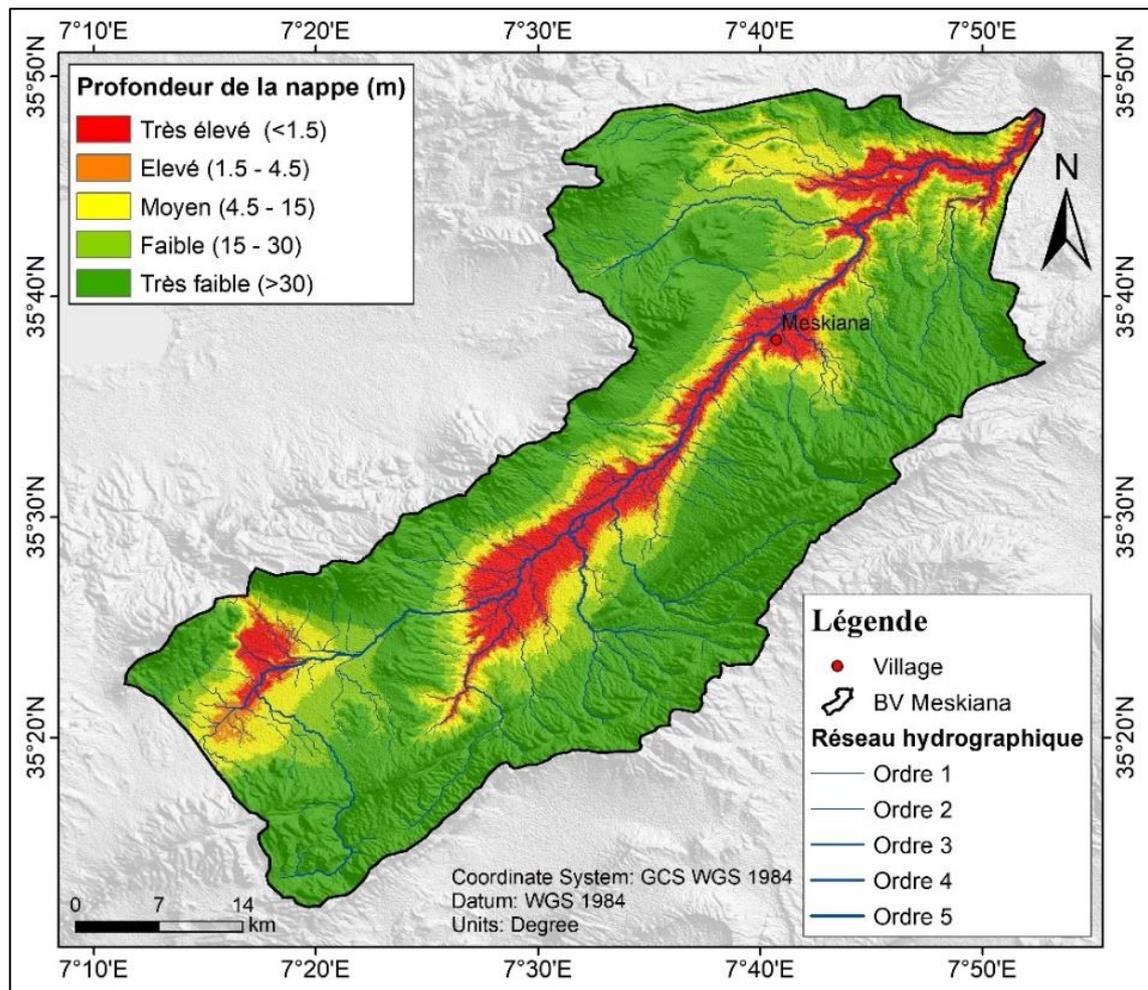


Figure 21: carte de la profondeur du niveau statique (D) dans le bassin versant de Meskiana.

2.2.Recharge :

Après avoir intégré les données des précipitations moyennes annuelles dans ArcGIS et effectué le calcul ainsi que la création de la carte de la recharge du bassin versant de Meskiana, nous constatons que les cinq classes de recharge couvrent l'ensemble du bassin avec des taux variant de 01 à 259,8 mm.

Nous constatons à travers la carte que la majeure partie de la superficie de notre région étudiée présente des niveaux de recharge allant de 1 à 255 mm (Vert foncé, vert, jaune, et orange) (Fig. 22).

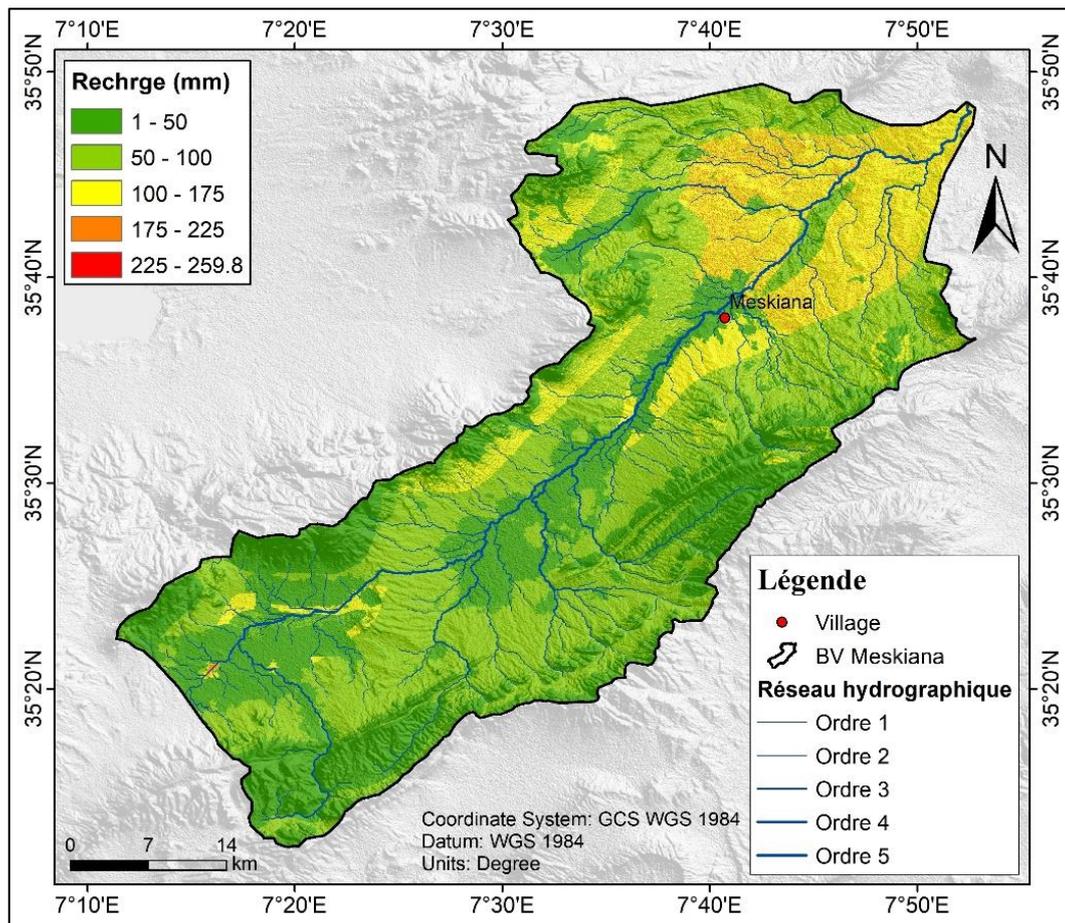


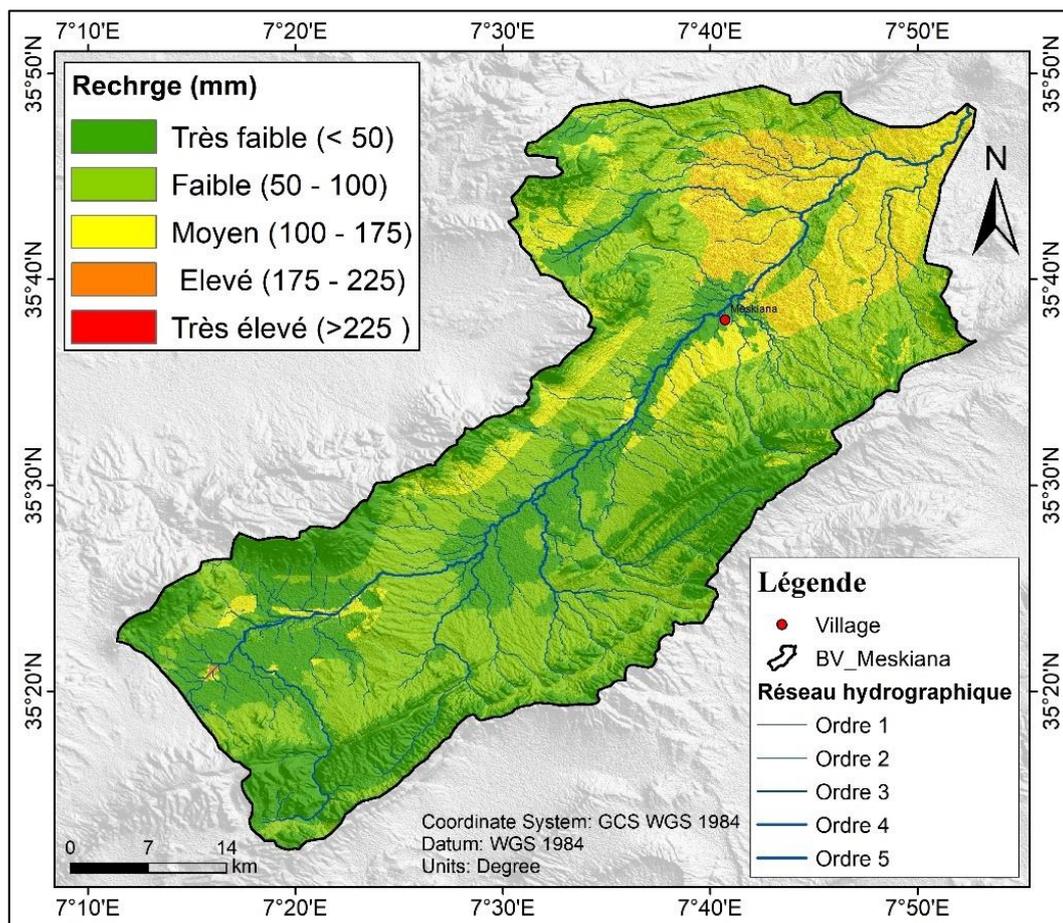
Figure 22: Carte de recharge du bassin versant de Meskiana.

La carte (Fig. 23) présente les coefficients (R) montre cinq catégories de degrés de vulnérabilité :

- L'analyse de la carte révèle qu'une grande partie de la zone étudiée présente des niveaux de vulnérabilité allant de faibles à modérés, compris approximativement entre 1 et 25 mètres (représentés par les codes couleurs vert foncé, vert et jaune). Cette plage altimétrique confère à ces secteurs une protection relative face aux risques potentiels qui représente 97.41% de la superficie totale, soit environ 1778.99 km².
- Les zones en « orange (175 - 225mm) » sont moins exposées au risque que les zones rouges, mais sont considérées comme relativement à risque et la superficie de ces régions est d'environ 47.20 km² Et à un pourcentage estimé à 2.58%.
- Les zones en « rouge (< 255mm) » représentent les zones à très élevé, c'est-à-dire les zones les plus vulnérables la superficie de ces régions est d'environ 0.02 km² qui représente un pourcentage pratiquement négligeable.

Tableau 7: Répartitions des classes de vulnérabilité pour le coefficient "R".

Degré de vulnérabilité	Value	Surface (km2)	Surface (%)
Très faible (<50)	1	689.23	37.74
Faible (50-100)	3	757.77	41.49
Moyen(100-175)	6	331.99	18.18
Elevé (175-225)	8	47.20	2.58
Trése élevé (>225)	9	0.02	0.00

**Figure 23:** Carte de la recharge efficace (R) dans le bassin versant Meskiana

2.3.Nature de la zone saturée (A) :

La carte (Fig. 24) montre la nature des zones saturées d'eau dans la région de Meskiana, où nous l'avons distinguée en utilisant 3 couleurs :

- La teinte "verte" désigne les zones à faible saturation, en raison de la nature géologique de la région qui confère à ces secteurs une perméabilité réduite. Bien que couvrant 24.85 % de la superficie totale, soit approximativement 454.19 km² carrés, ces zones vertes bénéficient d'un risque limité grâce à leur composition peu perméable.

- La couleur "jaune" identifie les zones à saturation moyenne, présentes en quantités limitées sur les bordures de la région en raison de leur perméabilité modérée. Qui représente 14.55 % de la superficie totale, soit environ 226.04 km². Leur perméabilité intermédiaire les rend plus vulnérables à une saturation excessive que les zones vertes peu perméables. Une surveillance étroite et un plan d'action préventif dédié s'imposent pour ces secteurs jaunes afin d'anticiper toute dégradation et de prendre les mesures adéquates en temps utile.
- La couleur "rouge" désigne les zones à forte saturation en eau en raison de leur grande perméabilité, les rendant ainsi vulnérables à la pollution. Comme nous pouvons le constater, ces secteurs rouges occupent une large partie de la zone étudiée, les exposant davantage aux risques de contamination. Bien que représentant 60.60 % de la superficie totale, soit environ 1107.81 km² carrés, leur étendue significative appelle à la plus grande vigilance. Leur perméabilité élevée favorise l'infiltration des polluants, menaçant la qualité des nappes phréatiques et des sols.

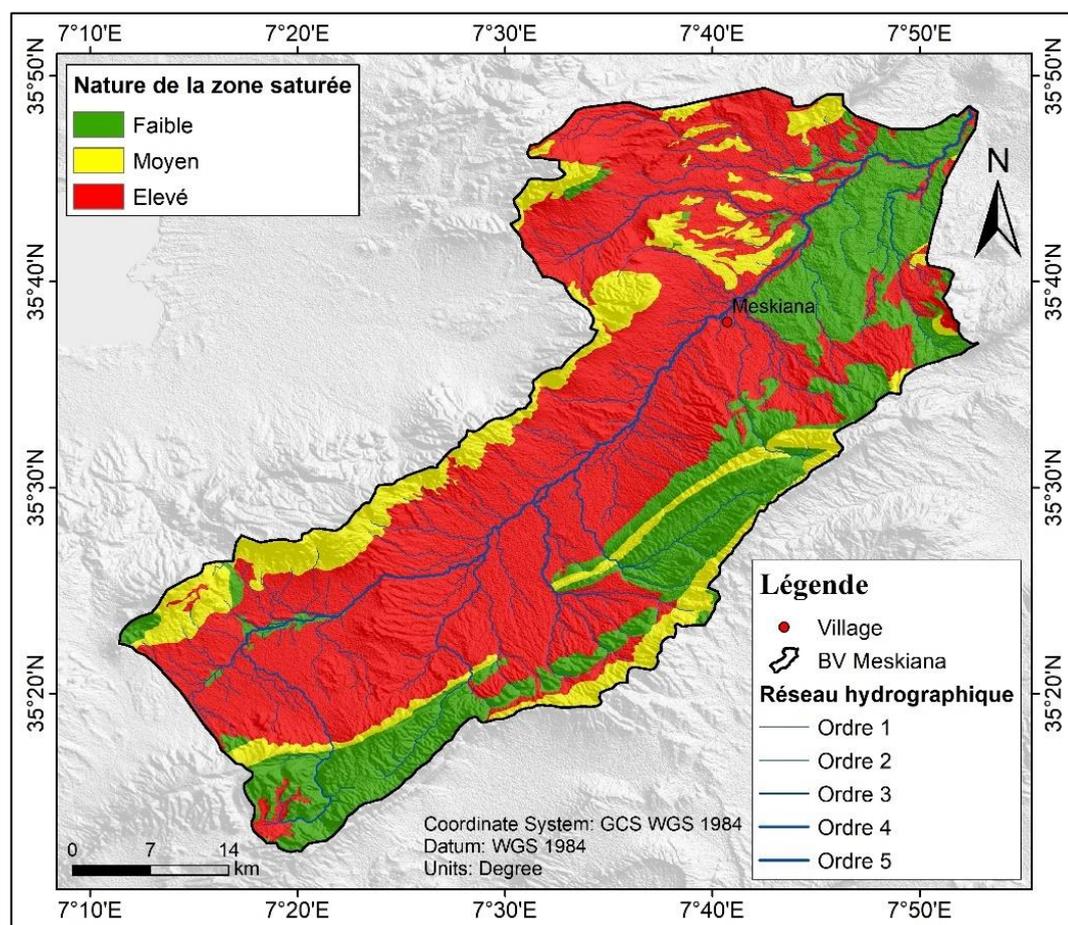


Figure 24: Nature lithologique de la zone saturée (A) dans le bassin versant de Meskiana.

2.4.Sol (S) :

Sur cette carte (Fig. 25) topographique, elle nous montre que la région contient 6 types différents de sols, qui sont les suivants :

- **Sols Alluviaux basiques** : Ces zones se situent principalement dans la partie nord-est de la région, s'étendant approximativement jusqu'au centre, ainsi que dans la portion ouest. Couvrant 19.82 % de la superficie totale, soit environ 362.29 km² carrés,
- **Sols calcaires humifère** et **Roche mère** : Bien que présentes à différents degrés sur les franges de la zone d'étude, ces régions représentant 20.50% de la superficie totale, soit environ 374.92 km² carrés, ne doivent pas être négligées.
- **Sols calciques** : Occupant la majeure partie de la région étudiée, ces zones couvrant 56.77 % de la superficie totale, soit approximativement 1037.81 km² carrés, revêtent une importance capitale.
- **Sols marais** et **Sols salins solontchak** : Bien que présentes en très faible quantité dans les parties nord ainsi qu'ouest et sud de la région, ces zones représentant 2.90 % de la superficie totale, soit environ 53.03 km², ne doivent pas être négligées.

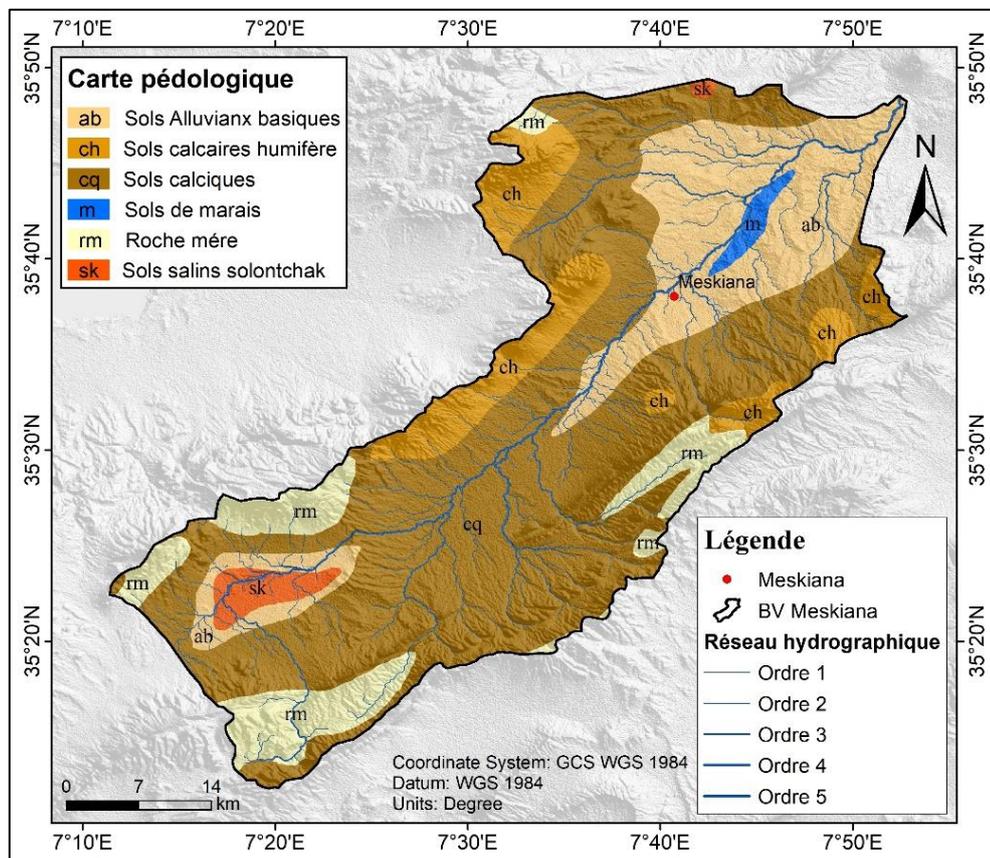


Figure 25: Carte des sols du bassin versant de Meskiana.

La carte (Fig. 26) présente les coefficients (S) de trois zones à degré de vulnérabilité différent :

- La teinte "verte" identifie les zones de faible vulnérabilité, occupant la majeure partie du territoire étudié. Bien que représentant 67.15 % de la superficie totale, soit environ 1227.47 km², leur prédominance géographique ne doit pas occulter les risques, même atténués, qu'elles présentent.
- La teinte jaune désigne les zones de vulnérabilité moyenne, majoritairement concentrées dans la partie nord de la région. Cette zone représente 29.59 % de la superficie totale, ce qui équivaut à environ 547.55 km².
- Concernant la couleur rouge, elle symbolise la zone de grande vulnérabilité, qui est présente en faible quantité dans la région étudiée, comme l'illustre la carte. Cette portion représente 2.90 % de la superficie totale, soit approximativement 53.02 km².

Tableau 8: Répartitions des classes de vulnérabilité pour le coefficient "S".

Classe de Vulnérabilité	Value	Texture	Surface (km ²)	Surface (%)	
Elevé	9	Sols de marais	16.69	0.91	2.90
	7	Sols salins solontchak	36.34	1.99	
Moyen	5	Sols calcaires humifère	185.26	10.13	29.95
	6	Sols Alluvianx basique	362.29	19.82	
Faible	2	Roche mère	189.66	10.37	67.15
	3	Sols calciques	1037.81	56.77	

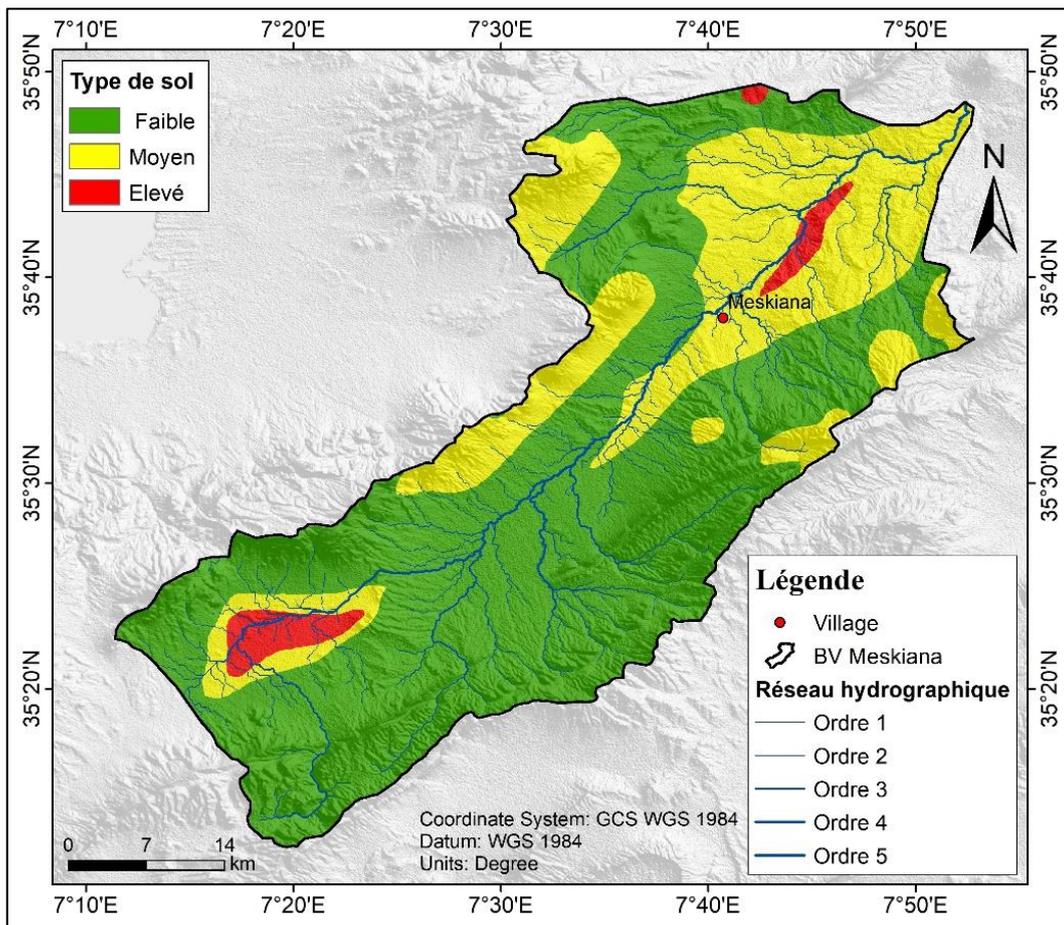


Figure 26: Carte des sols (S) dans le bassin versant de Meskiana.

2.5.Topographie (T) :

La carte (Fig. 27) des pentes élaborée révèle une distribution normale en fonction de la topographie des classes de pentes dans le bassin. Nous avons identifié cinq classes de pentes (en %) caractérisant notre zone d'étude :

- Classe 1 : de 0 à 2, cette catégorie englobe les zones les plus planes du bassin versant, souvent situées à proximité des cours d'eau ou au fond des vallées. Cette portion représente 7.07 % de la superficie totale, soit approximativement 129.18 km².
- Classe 2 : de 2 à 6, cette catégorie comprend les terres légèrement inclinées. Cette portion représente 7.35 %, soit approximativement 134.31 km².
- Classe 3 : de 6 à 12 ces pentes modérées sont courantes sur les flancs des collines et des montagnes et cette portion représente 23.68 %, soit approximativement 432.82 km².
- Classe 4 : de 12 à 18 les terres dans cette catégorie se caractérisent par des pentes plus raides et cette portion représente 47.56 %, soit approximativement 869.38 km².
- Classe 5 : > 18 cette catégorie regroupe la plupart des régions escarpées du bassin versant, souvent montagneuses et inadaptées à la vie humaine ou aux activités économiques.

Comme le montre la carte, la plupart de ces régions se trouvent aux marges du bassin versant et cette portion représente 14.35 %, soit approximativement 262.37 km².

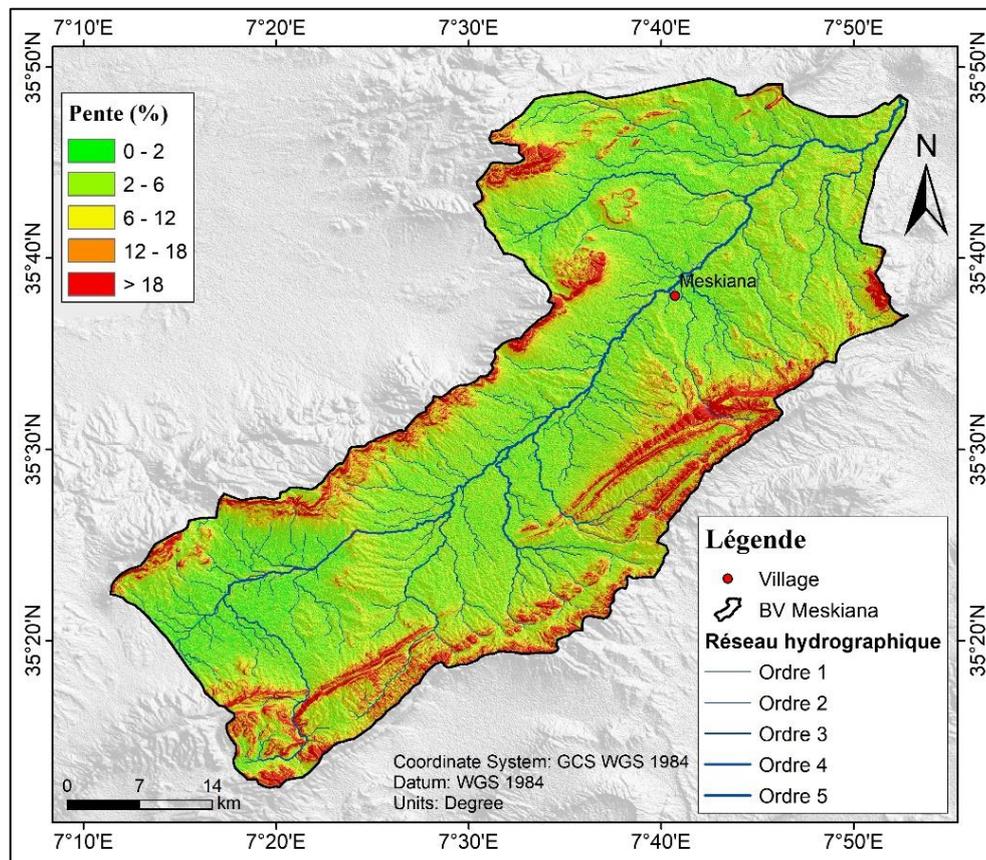


Figure 27: Carte des pentes du bassin versant de Meskiana.

La carte (Fig. 28) des coefficients "T" montre cinq catégories de degrés de vulnérabilité :

- Comme nous pouvons le constater, la région est dominée par des zones de vulnérabilité faible à élevée (rouge, orange, jaune et verte). Cette zone représente 85.65% de la superficie totale, soit approximativement 1565.69 km².
- Quant au reste de la région, la plupart des zones sont considérées comme faibles à très faibles (vert foncé) et cette portion représente 14.35 %, soit approximativement 262.37 km².

Tableau 9: Répartitions des classes de vulnérabilité pour le coefficient "T".

Classe de Vulnérabilité	Value	Surface (km ²)	Surface (%)
Très élevé (<2)	1	129.18	7.07
Elevé (2 - 6)	3	134.31	7.35
Moyen (6 - 12)	5	432.82	23.68
Faible (12 -18)	9	869.38	47.56
Très faible (>18)	10	262.37	14.35

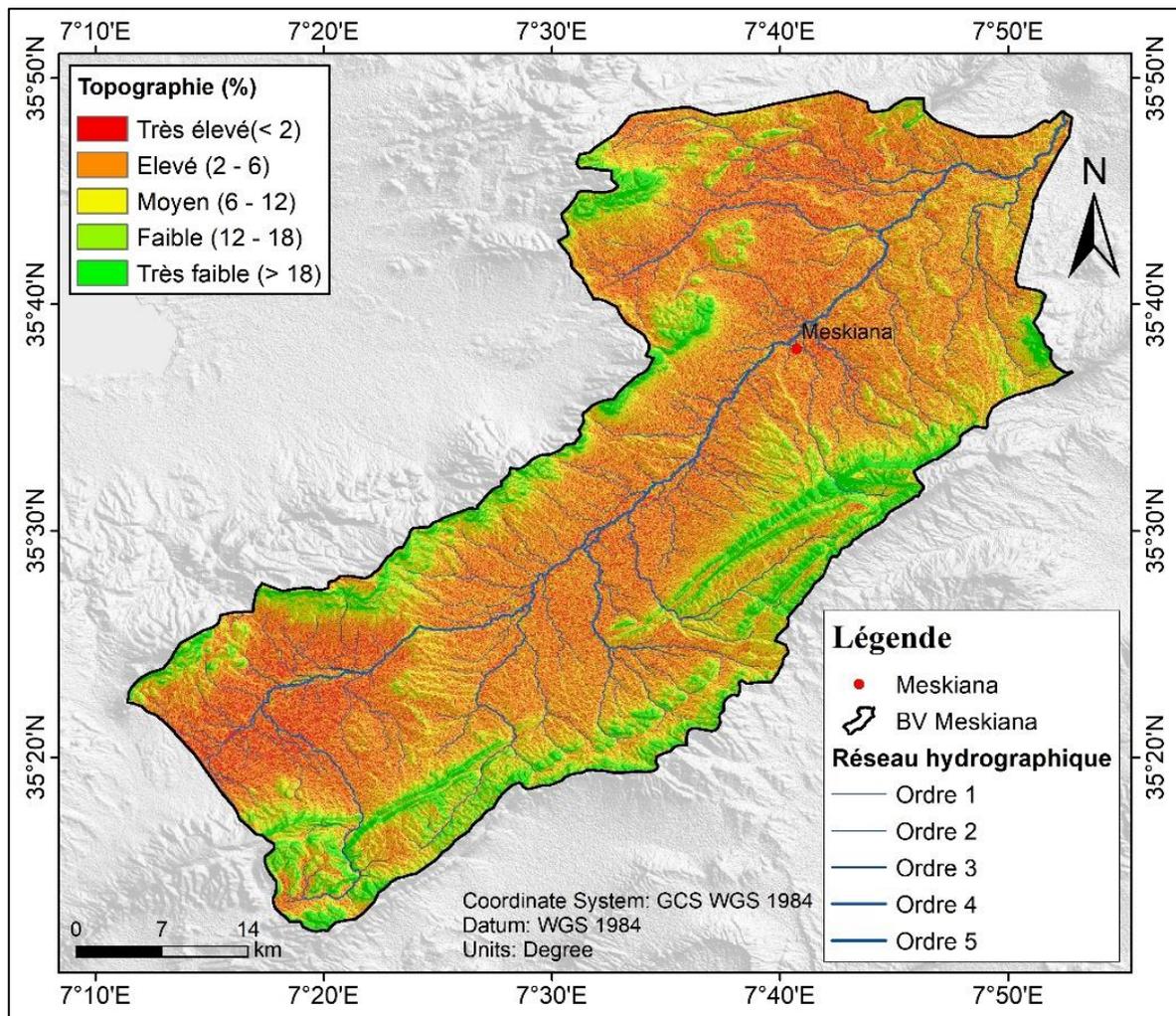


Figure 28: Carte du paramètre « T » dans le bassin versant de Meskiana.

2.6. Nature de la zone non saturée (I) :

La carte (Fig. 29) montre la nature des zones non saturées "I" d'eau dans la région de Meskiana, où nous l'avons distinguée en utilisant 3 couleurs :

- Le vert représente les zones à faible saturation, en raison de la nature peu perméable des formations géologiques locales. Cela signifie que ces zones ont une capacité limitée à absorber l'eau en raison de la composition et de la structure des roches et des sols présents. Ces formations géologiques imperméables empêchent l'eau de s'infiltrer facilement, ce qui entraîne une saturation plus faible des sols par rapport à d'autres zones. Et sa superficie représente 24.85% de la superficie totale, ce qui en fait une partie importante de la région étudiée.
- Le jaune représente les zones à saturation modérée en eau sur 14,55% de la superficie totale. Ces petites poches en périphérie ont une perméabilité moyenne, permettant une infiltration d'eau intermédiaire dans le sol en raison des propriétés semi-perméables des formations géologiques locales. Cette saturation modérée est probablement due à des

variations dans la composition des sols et roches de ces zones spécifiques. Bien que d'une superficie non négligeable, ces zones ne présentent ni une saturation trop élevée ni trop faible en raison de leur perméabilité moyenne.

- Le rouge représente les zones fortement saturées en eau et très vulnérables à la pollution sur 60,60% de la superficie totale étudiée. Ces zones ont une forte capacité d'absorption en raison de la grande perméabilité des formations géologiques locales comme certaines roches poreuses ou sols sableux. Cette perméabilité élevée permet à de grandes quantités d'eau de s'infiltrer facilement, saturant les sols, mais facilitant aussi la propagation des contaminants. Occupant une large part du territoire, ces zones extrêmement vulnérables nécessitent une attention particulière en termes de protection environnementale contre les polluants véhiculés par l'eau qui peuvent aisément s'y infiltrer.

Tableau 10: Répartitions des classes de vulnérabilité pour le coefficient "I".

Classe de Vulnérabilité	Value	Lithologique	Surface (km ²)	Surface (%)	
Faible	1	Chott et Sebkh	6.68	0.37	24.85
	2	Calcaires/Calcaires jaunes, marnes et gypse et dolomies/ Marnes et marno-calcaires	285.56	15.62	
	3	Calcaires et marnes/Calcaires à silex et marno-calcaires, parfois à gypse	161.95	8.86	
Moyen	4	Gypses, argiles et dolomies noires/ Ensemble marneux à la base et calcaires variés (oolitic, zoogen, à silex) au sommet/ Gré	231.44	12.66	14.55
	5	Cailloutis, argiles sableuses rougeâtres et conglomérats/ Cailloutis (grés et conglomérats) et marnes	8.00	0.44	
	6	Grés, Calcaires ocres et argiles/ Travertins, tufs et calcaires hydrothermaux	26.60	1.46	
Elevé	7	Calcaires et grés/Calcaires à lithothamnium et grés à clypéastres	4.60	0.25	60.60
	8	Croute calcaire - dépôts quaternaires anciens avec surface encroutée	313.04	17.12	
	9	Alluvions actuelles et récentes (sables, graviers et argiles) et mollasses/ Alluvions actuelles_sable, graviers, limons et a	790.16	43.22	

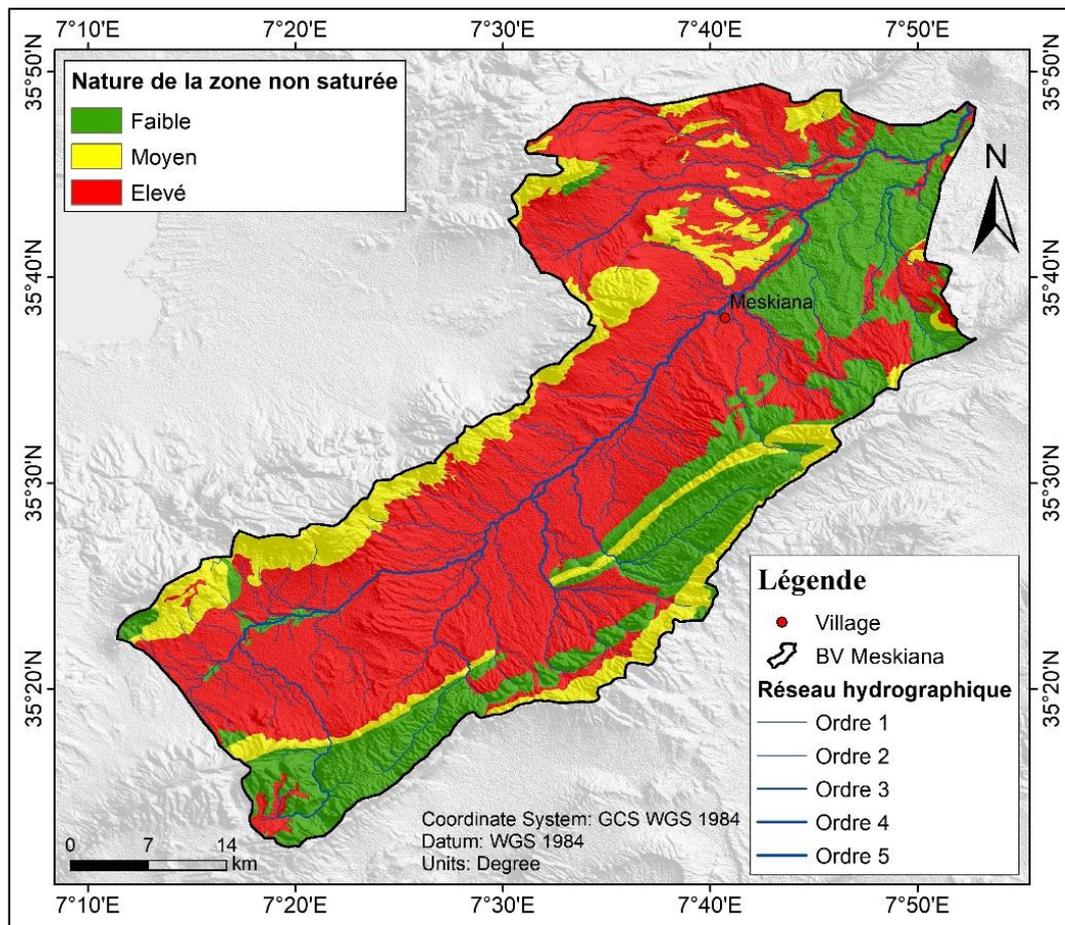


Figure 29: Nature lithologique de la zone non saturée (I) dans le bassin versant de Meskiana.

2.7.Perméabilité (C) :

La carte (Fig. 30) du coefficient "S" indique trois zones différentes en fonction du degré de vulnérabilités et est distinguée par des couleurs différentes :

- Le rouge sur la carte représente les zones à forte perméabilité du bassin versant, soit 1,38% de sa superficie totale. Ces zones ont la capacité d'absorber facilement l'eau en raison de la nature poreuse des formations géologiques locales comme certaines roches sédimentaires ou sols sableux. Cependant, cette perméabilité élevée les rend également plus vulnérables à la pollution, car les contaminants peuvent se propager facilement à travers ces formations perméables. Ces zones se situent principalement au nord, probablement en raison de la nature spécifique des sols et roches de cette région. Une gestion appropriée des risques de pollution est donc importante dans ces zones vulnérables.
- Le jaune représente les zones de perméabilité moyenne sur 36,09% de la superficie totale étudiée. Ces zones ont une capacité d'absorption d'eau intermédiaire, ni trop élevée ni trop faible, probablement due à la nature semi-perméable des formations géologiques locales comme certaines roches sédimentaires ou sols argileux. Bien que modérée, cette perméabilité permet l'infiltration d'une certaine quantité de polluants présents dans l'eau,

représentant donc un risque modéré de contamination à prendre en compte. La plupart de ces zones se trouvent en périphérie, probablement en raison de variations locales dans la composition des sols et roches. Malgré un risque modéré, leur grande superficie en fait une partie importante nécessitant une gestion adéquate.

- Le vert représente les zones de faible perméabilité sur 62,53% de la superficie totale étudiée. Ces zones ont une très faible capacité d'absorption de l'eau en raison de la nature imperméable ou peu perméable des formations géologiques locales comme certaines roches compactes ou argiles. Cette faible perméabilité empêche l'infiltration de l'eau et des polluants qu'elle pourrait contenir, offrant ainsi une protection naturelle contre la pollution des eaux souterraines. La majeure partie du territoire analysé étant composée de ces formations peu perméables, il est important de préserver ces zones peu vulnérables qui représentent une part considérable de la région.

Tableau 11 : Répartitions des classes de vulnérabilité Pour le coefficient "C".

Classe de Vulnérabilité	Value	Perméabilité	Surface (km2)	Surface (%)
Faible	1	Chott et sebkha	6.64	0.36
	3	Faible	1136.55	62.17
Moyen	6	Moyenne	659.67	36.09
Elevé	9	Bonne	25.18	1.38

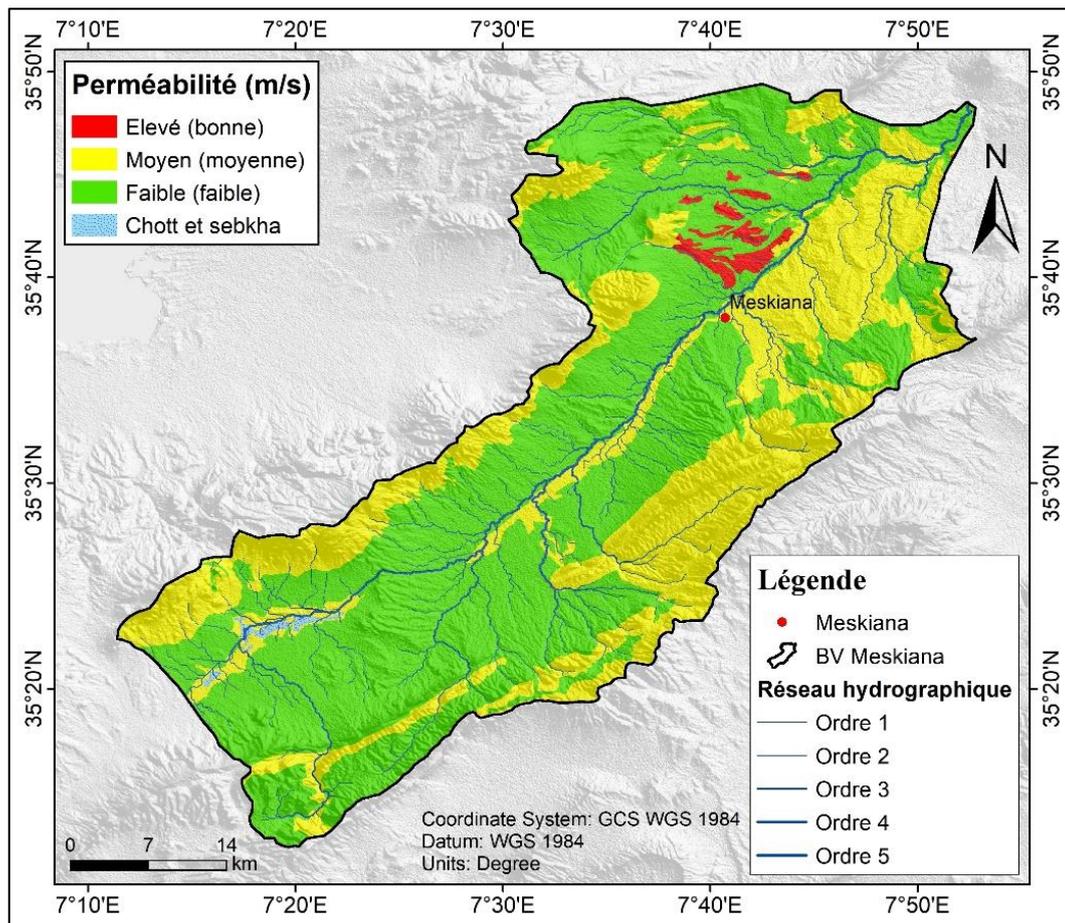


Figure 30: Carte de perméabilité (C) dans le bassin versant de Meskiana

2.8. Indice DRASTIC et degré de vulnérabilité (Niveau de la vulnérabilité par la méthode DRASTIC) :

Râce à la méthode DRASTIC, nous avons pu calculer les indices de vulnérabilité qui évaluent le risque de contamination, lequel augmente lorsque la valeur de l'indice est plus élevée. Ces indices ont ensuite été cartographiés à l'aide d'un système d'information géographique (SIG), permettant de créer une carte de vulnérabilité pour le bassin versant étudié. Cette carte offre une vision d'ensemble du risque de pollution, même dans les zones non encore contaminées, facilitant ainsi la prise de mesures de protection. En utilisant ArcGIS, cinq classes de vulnérabilité ont été identifiées pour le bassin versant de Meskiana (Fig. 31) :

- Sur la carte, une petite zone au nord de la région étudiée présente une très haute vulnérabilité, représentant seulement $0,18 \text{ km}^2$ (0,01%) de la superficie totale. Bien que de taille réduite, cette zone est particulièrement menacée par un risque important de pollution des eaux souterraines et des sols en raison de la forte perméabilité des formations géologiques locales comme les roches poreuses ou les sols sableux. Cette perméabilité excessive facilite grandement l'infiltration de l'eau et des polluants. Malgré sa superficie limitée, cette zone de vulnérabilité critique nécessite une attention particulière et des

mesures de protection adéquates pour prévenir tout risque majeur de contamination lié à son niveau d'exposition extrême aux polluants.

- Une zone de vulnérabilité élevée couvrant 86,52 km² (4,74%) de la superficie totale présente un risque non négligeable de pollution. Ce niveau est probablement dû à la nature perméable des formations géologiques permettant une infiltration importante des eaux et contaminants. La plupart de ces zones vulnérables se concentrent autour de la vallée, en raison de la composition particulière des sols et roches sédimentaires plus poreux dans cette région. Bien que d'étendue relativement restreinte, ces zones très perméables à vulnérabilité élevée requièrent une gestion attentive des risques de pollution en raison de leur grande sensibilité à l'infiltration de contaminants provenant des eaux de surface ou souterraines.
- On constate qu'une partie non négligeable de cette zone, estimée à 28,20% ou 514,86 km², présente un niveau de vulnérabilité moyen. Cela signifie que cette portion du territoire étudié est modérément exposée à certains risques ou aléas, qu'ils soient naturels ou anthropiques. De plus, il est précisé que la majeure partie de ces zones vulnérables de niveau moyen est concentrée le long du centre de la région analysée.
- La carte fait référence aux zones de faible vulnérabilité qui représentent la plus grande partie de la superficie totale analysée, avec 39,60% soit 722,86 km². Près de 40% du territoire présente donc un niveau de vulnérabilité relativement bas face aux risques potentiels. Cela peut s'expliquer par divers facteurs comme l'éloignement des zones à risque, l'absence d'activités dangereuses, une faible densité de population ou la présence de mesures de protection efficaces. Cependant, malgré leur faible vulnérabilité, un risque résiduel existe toujours dans ces zones.
- Fait le carte référence aux zones de très faible vulnérabilité dans la région étudiée. Ces zones représentent environ 27,45% de la superficie totale, soit 501,07 km². Cela signifie qu'un peu plus d'un quart du territoire analysé présente un niveau de vulnérabilité extrêmement bas face aux différents risques et aléas potentiels. Il est précisé que la plupart de ces zones très peu vulnérables se situent en périphérie, c'est-à-dire dans les zones limitrophes ou aux frontières de la région d'étude.

Tableau 11: Répartitions des classes de vulnérabilité DRASTIC.

Classe	Value	Surface (km ²)	Surface (%)
Très faible (39 – 80)	1	501.07	27.45
Faible (80 – 120)	2	722.86	39.60
Moyen (120 – 160)	3	514.86	28.20

Elevé (160 – 200)	4	86.52	4.74
Très élevé (200 – 203)	5	0.18	0.01

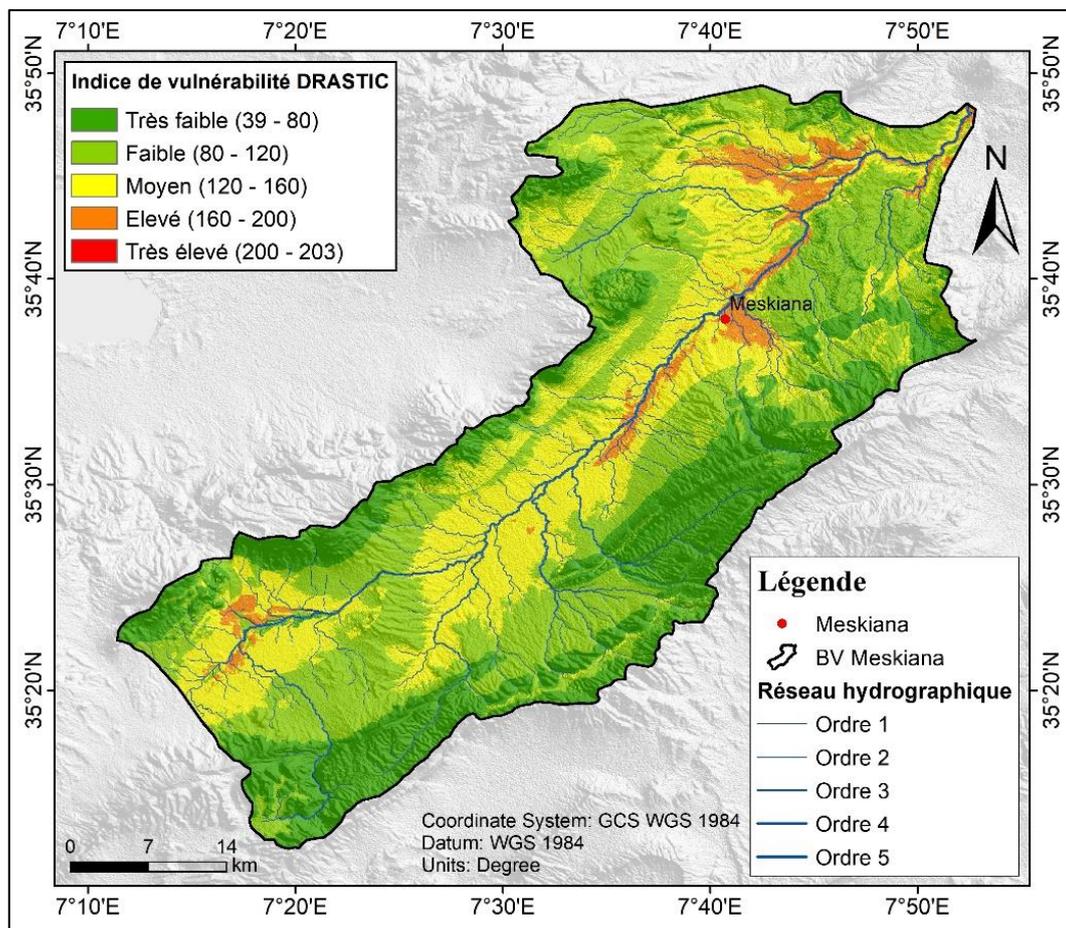


Figure 31: Carte de l'indice de vulnérabilité (ID) dans le bassin versant de Meskiana.

2. Élaboration des couches thématiques correspondant aux paramètres de la méthode IS (DRATOs) :

2.1. Occupation des sols (OS) :

La carte (Fig. 32) représente l'occupation des sols et le réseau hydrographique d'une région, vraisemblablement en Algérie, où se trouve le village de Meskiana.

La légende fournit les différents types d'occupation des sols représentés par des couleurs distinctes:

- Les surfaces d'eau.
- Les zones forêt.
- Les surfaces agricoles.
- Les surfaces urbaines.
- Les sols nus.

On peut observer que la région est principalement composée de zones montagneuses arides avec quelques zones forestières et agricoles concentrées le long des cours d'eau.

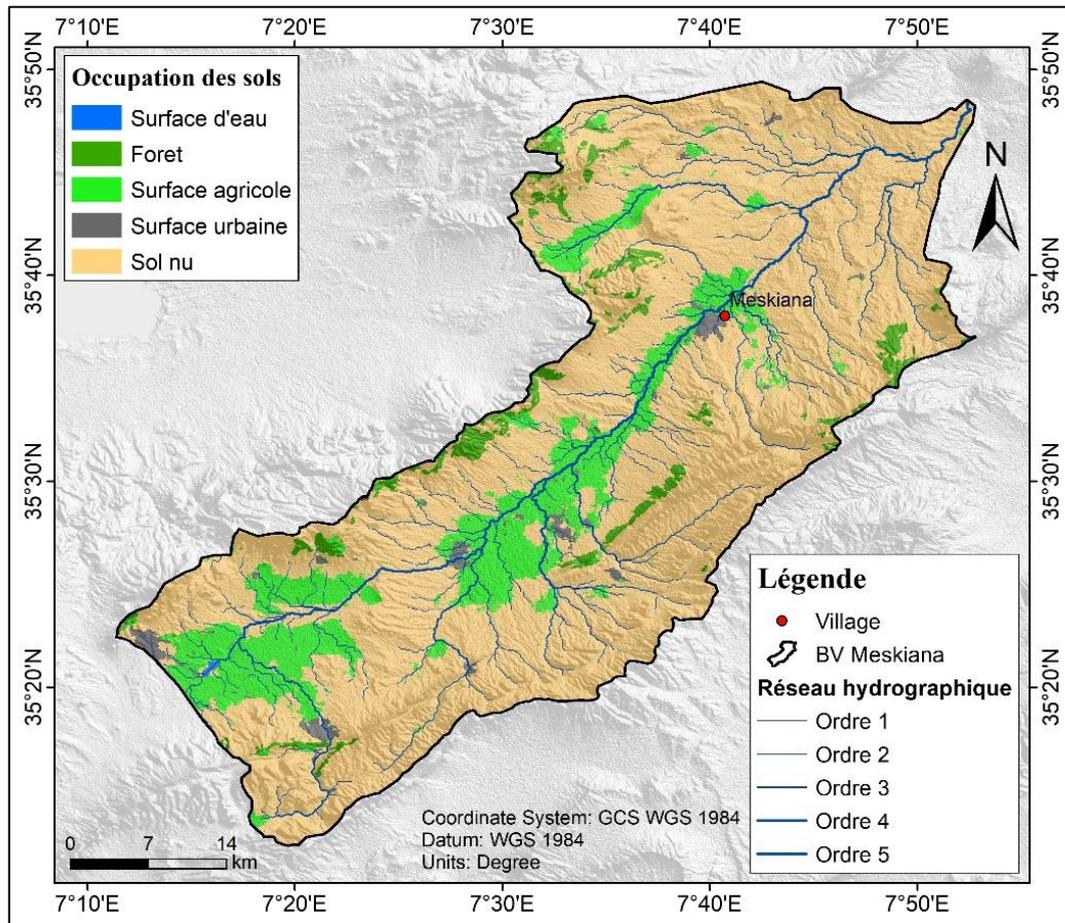


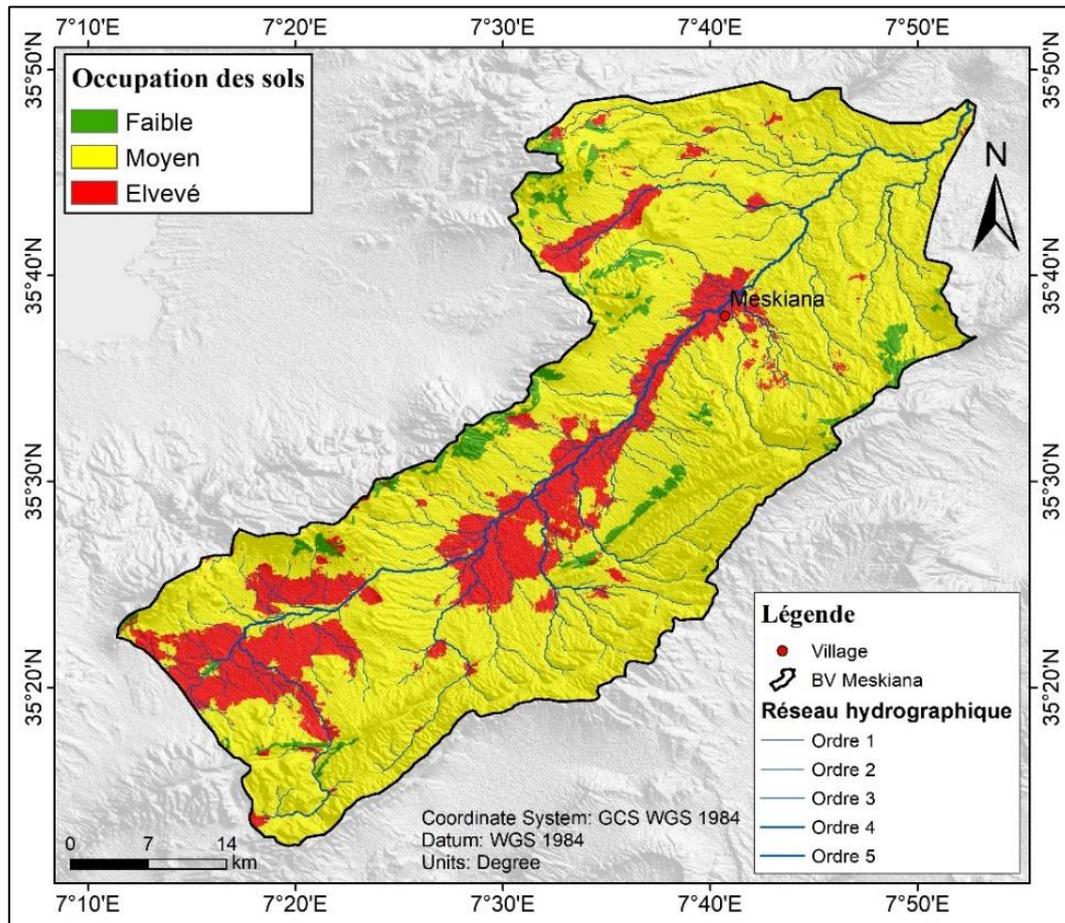
Figure 32: Carte d'occupation des sols.

La carte représente du coefficient "OS" dans le bassin versant de Meskiana. Elle utilise une échelle de couleurs (vert, jaune, rouge) pour indiquer le niveau de vulnérabilité, allant de faible à élevé (Fig. 33).

- On observe que les zones de vulnérabilité élevée, représentées en rouge, se concentrent principalement le long d'une large bande diagonale traversant le bassin du nord-ouest au sud-est. Cette zone, qui a une superficie d'environ 294.44 km² (16.11%), correspond probablement à la vallée principale et aux terres les plus propices aux activités humaines.
- Les zones de vulnérabilité moyenne, en jaune, semblent entourer cette bande centrale rouge, suggérant des zones périphériques moins vulnérables. Cette zone de vulnérabilité moyenne a une superficie d'environ 1466.34 km² (80.21 %).
- Enfin, les zones vertes représentent les régions à faible degré de vulnérabilité, qui couvrent une grande partie des franges nord, sud et ouest du bassin versant. Cette zone de faible vulnérabilité a une superficie d'environ 67.28 km² (3.68 %).

Tableau 12: Répartitions des classes d'occupation des sols.

Classe de Vulnérabilité	Value	Name	Surface (Km ²)	Surface (%)
Faible	0	Foret	66.19	3.68
	50	Surface d'eau	1.09	
Moyen	60	Sol nu	1466.34	80.21
Elevé	70	Surface agricole/Surface urbaine	294.44	16.11

**Figure 33:** Carte des classes assignées au paramètre « OS » dans le bassin versant de Meskiana.

2.2. Indice de susceptibilité (IS) et degré de vulnérabilité (Niveau de la vulnérabilité par la méthode IS) :

La carte (Fig. 34) représente l'indice de vulnérabilité DRATOS pour les eaux souterraines du bassin versant de Meskiana. Cet indice évalue le risque de pollution des nappes phréatiques en combinant différents paramètres hydrogéologiques.

L'indice est divisé en trois niveaux de vulnérabilité : faible (en vert), moyen (en jaune) et élevé (en rouge). Les valeurs numériques associées sont respectivement (10,4 – 45) pour le niveau faible, (45 – 65) pour le niveau moyen et (65 - 84,3) pour le niveau élevé.

- On observe que la zone la plus vulnérable, en rouge, forme une large bande diagonale traversant le bassin du nord-ouest au sud-est qui a une superficie d'environ 296.94 km² (16.34 %). Cette région présente donc un risque élevé de contamination des eaux souterraines par les polluants.
- Les zones de vulnérabilité moyenne, en jaune, entourent cette bande centrale, suggérant des risques modérés dans ces secteurs périphériques qui ont une superficie d'environ 902.43 km² (49.69 %).
- Enfin, les zones vertes correspondent aux régions les moins vulnérables du bassin qui ont une superficie d'environ 617.47 km² (33.99 %).

Tableau 13: Répartitions des classes de vulnérabilité DRATOS.

Classe de Vulnérabilité	Value	Surface (km2)	Surface (%)
Faible	1	617.47	33.99
Moyen	2	902.43	49.67
Elevé	3	296.94	16.34

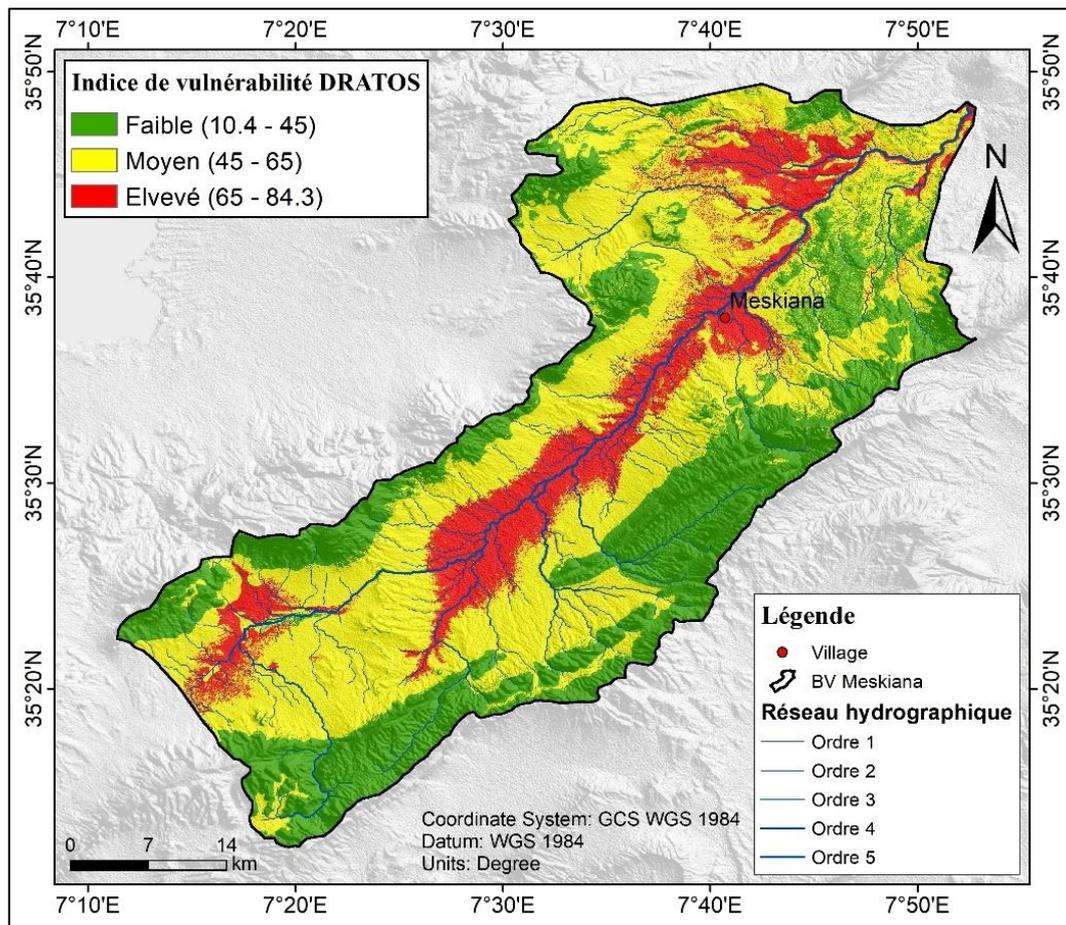


Figure 34: Carte de l'indice de vulnérabilité (IS) dans le bassin versant de Meskiana.

3. Validation de la carte de vulnérabilité :

3.1. La vulnérabilité DRASTIC :

La carte représente la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution par les nitrates dans une région comprenant le village de Meskiana (Fig. 35).

La légende indique les concentrations de nitrates (NO_3) en mg/L, représentées par des points de différentes couleurs :

- Vert : < 25 mg/L
- Jaune : 25 - 50 mg/L
- Rouge : > 50 mg/L

La vulnérabilité DRASTIC, qui mesure le risque de contamination des nappes phréatiques:

- Faible vulnérabilité
- Vulnérabilité moyenne
- Vulnérabilité élevée

On peut observer que les zones de vulnérabilité élevée se concentrent principalement le long des cours d'eau et autour du village de Meskiana, où les concentrations en nitrates sont également les plus élevées (> 50 mg/L).

Les régions ayant une faible vulnérabilité se situent majoritairement dans les zones montagneuses et éloignées des cours d'eau principaux.

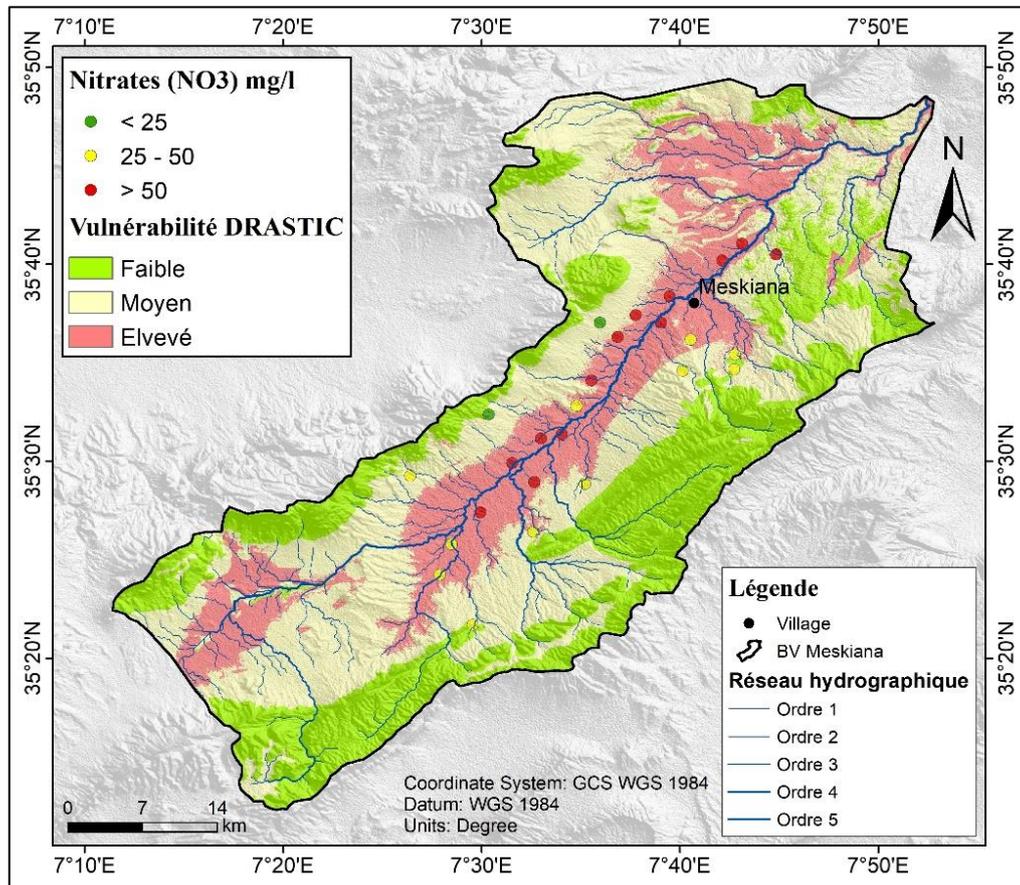


Figure 35: Carte de validation de l'indice DRASTIC par la distribution des nitrates dans le bassin versant de Meskiana.

Tableau 14: Matrice de confusion de vulnérabilité DRASTIC

		Pollution (NO ₃)			Total	Précision utilisateur
		C1	C2	C3		
Vulnérabilité	C1	1	2	0	3	0.33
	C2	1	5	2	8	0.63
	C3	0	4	11	15	0.73
Total		2	11	13	26	
Précision réalisateur		0.50	0.45	0.85		0.65

Ce tableau est également une matrice de confusion qui permet d'évaluer les performances d'un modèle de classification pour prédire la vulnérabilité à la pollution par les nitrates (NO₃), divisée en 3 classes (C1, C2, C3).

Les lignes représentent les valeurs réelles de la vulnérabilité, tandis que les colonnes représentent les prédictions du modèle pour ces mêmes classes.

Les nombres dans les cellules indiquent combien d'instances ont été classées dans chaque combinaison de valeur réelle et prédite. Les valeurs en gras italiques sur la diagonale représentent les prédictions correctes.

Le "Total" en bas indique le nombre total d'instances prédites pour chaque classe. Le "Total" à droite donne le nombre réel d'instances pour chaque classe.

La "Précision utilisateur" mesure la fiabilité des prédictions positives pour chaque classe. La "Précision réalisateur" mesure l'efficacité du modèle à classer correctement les instances réelles de chaque classe.

La précision globale du modèle est de 0.65 ou 65%. C'est le ratio entre le nombre total de prédictions correctes (1+5+11=17) et le nombre total d'instances (26).

On peut voir que le modèle a des difficultés avec la classe C2, avec seulement 45% de précision pour cette classe. En revanche, il performe bien sur la classe C3 avec 85% de précision.

Cette matrice permet ainsi d'identifier les faiblesses et les forces du modèle par classe, et d'évaluer sa performance générale.

3.2. La vulnérabilité DRATOS :

la carte représente la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution par les nitrates dans une région comprenant le village de Meskiana, en utilisant la méthode DRATOS (Fig. 36).

La légende indique les concentrations de nitrates (NO₃) en mg/L, représentées par des points de différentes couleurs :

- Vert : <25 mg/L
- Jaune : 25-50 mg/L
- Rouge : >50 mg/L

La vulnérabilité DRATOS, qui mesure le risque de contamination des nappes phréatiques:

- Faible vulnérabilité
- Vulnérabilité moyenne
- Vulnérabilité élevée

On peut observer que les zones de vulnérabilité élevée se concentrent principalement le long des cours d'eau et autour du village de Meskiana, où les concentrations en nitrates sont également les plus élevées (>50 mg/L).

Les régions ayant une faible vulnérabilité se situent majoritairement dans les zones montagneuses et éloignées des cours d'eau principaux.

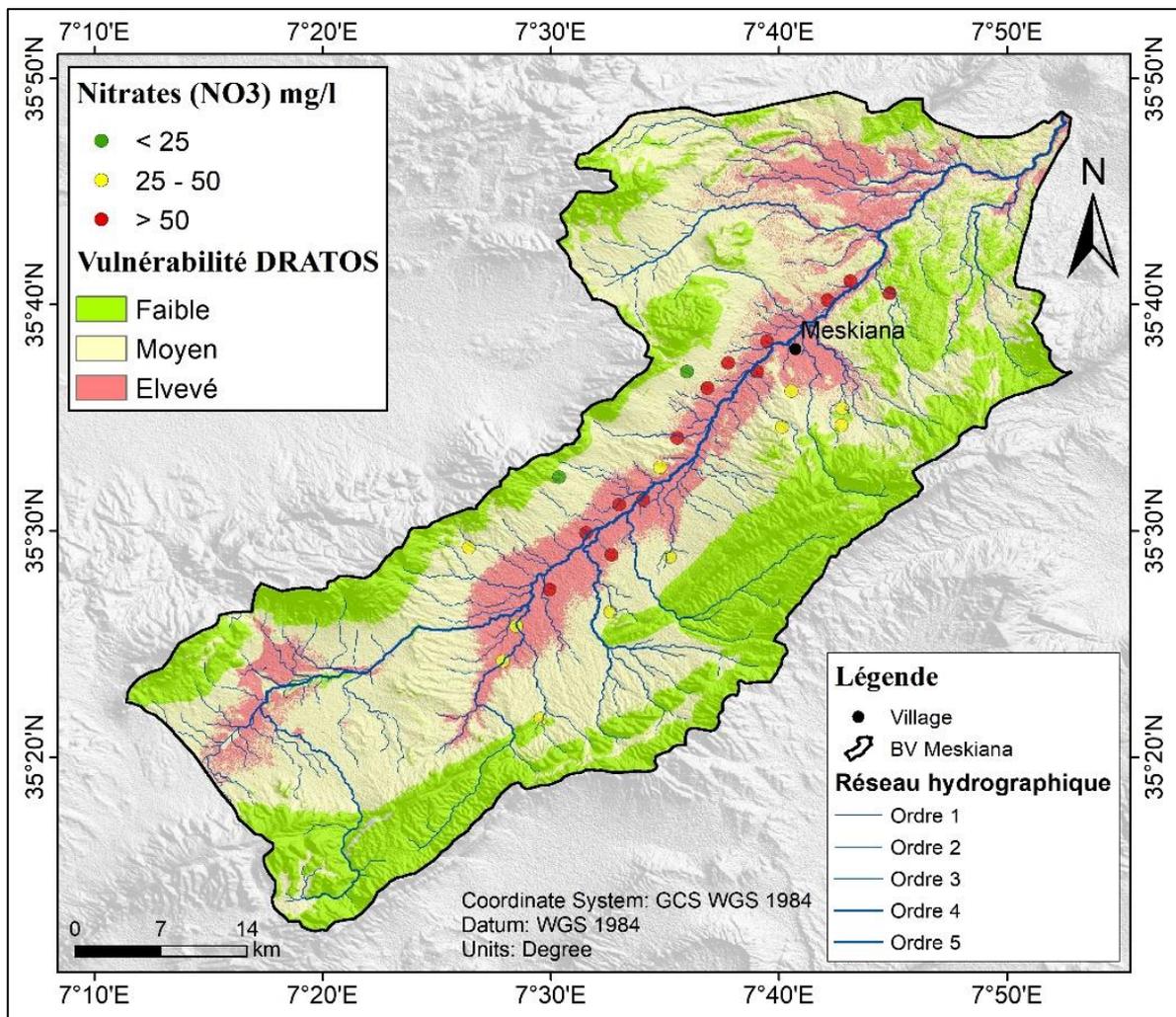


Figure 36: Carte de validation de l'indice DRATOS par la distribution des nitrates dans le bassin versant de Meskiana.

Tableau 15: Matrice de confusion de vulnérabilité DRATOS

Class Value		Pollution (NO ₃)			Total	Précision utilisateur
		C1	C2	C3		
Vulnérabilité	C1	<i>1</i>	2	0	3	0.33
	C2	1	<i>7</i>	2	10	0.70
	C3	0	2	<i>11</i>	13	0.85
Total		2	11	13	26	
Précision réalisateur		0.50	0.64	0.85		0.73

Ce tableau présente une matrice de confusion qui permet d'évaluer les performances d'un modèle de classification en comparant les prédictions faites par le modèle aux valeurs réelles connues.

Les lignes représentent les valeurs réelles (Vulnérabilité) qui sont divisées en 3 classes (C1, C2, C3). Les colonnes représentent les prédictions du modèle pour la pollution par les nitrates (NO₃) également divisées en 3 classes.

Les valeurs dans les cellules de la matrice indiquent le nombre d'instances pour chaque combinaison de valeur réelle et prédiction. Les valeurs en diagonale (en gras et italique) représentent les prédictions correctes.

Le "Total" en bas indique le nombre total d'instances pour chaque classe prédite. Le "Total" à droite donne le nombre total d'instances pour chaque classe réelle.

La "Précision utilisateur" est le ratio entre les prédictions correctes et le total des prédictions pour chaque classe. La "Précision réalisateur" est le ratio entre les prédictions correctes et le total des valeurs réelles pour chaque classe.

La précision globale du modèle, en bas à droite, est de 0.73 ou 73%. C'est la proportion des prédictions correctes sur l'ensemble des instances.

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette recherche visait à évaluer la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution dans le bassin versant de l'Oued Meskiana, une zone semi-aride du nord-est algérien. Appréhender la dynamique de ce système hydrologique revêt une importance cruciale pour une gestion pérenne des ressources en eau limitées de cette région.

Nous avons eu recours aux méthodologies DRASTIC et DRATOS, mises en œuvre à l'aide des systèmes d'information géographique. Cela nous a permis d'analyser divers facteurs influant sur la vulnérabilité à la pollution, tels que la profondeur de la nappe, les propriétés des sols et de la recharge, la topographie et l'occupation des terres. Des cartes classant les zones selon différents niveaux de risque de pollution ont ensuite été produites.

La fiabilité des résultats a été vérifiée par comparaison avec la distribution des concentrations en nitrates dans les eaux souterraines. Une analyse de la répartition spatiale des classes de vulnérabilité et de leurs superficies respectives au sein du bassin a également été menée.

Cette étude offre une évaluation exhaustive de l'état des ressources hydriques dans le bassin de Meskiana, permettant d'orienter la prise de décision et d'établir les priorités en matière de protection et de gestion.

L'importance d'une approche pluridisciplinaire, combinant analyses SIG, modélisation des données et connaissances hydrogéologiques pour appréhender ce système complexe, a été soulignée.

Le contexte géographique, climatique, géologique et économique de ce bassin, caractérisé par un climat semi-aride, une géologie variée et d'importantes activités agricoles, a été examiné. Ces facteurs représentent des défis majeurs pour la gestion des ressources en eau dans cette région.

Dans l'ensemble, ces travaux mettent en lumière le besoin urgent d'adopter une approche intégrée et fondée sur des preuves afin de préserver et d'assurer la pérennité des eaux souterraines, face aux enjeux environnementaux et de développement actuel et à venir dans le bassin de Meskiana et d'autres zones semi-arides similaires.

Références bibliographiques

VILA J.M. (1973) :Notice explicative de la carte géologique, au 1/50.000, de Dalâa (204).
Editée par Sonatrach en 1977. 6pages

M.G.BETIER

S.DOZET (1985)

D. KUSCER

(J.M. VILA, 1980)

W.M. KOWALSKI (2002)

(J.M. VILA, 1980)

J.M. VILA (1977)

DOZET (1985)

<https://www.esri.com/>

ملخص :

لقد هدفنا من خلال هذه الدراسة التي قمنا بها والتي هي تحت عنوان " تحليل الضعف وتقييم مخاطر تلوث المياه الجوفية في منطقة مسكيانة باستخدام تقنيات النمذجة الجغرافية المكانية." ألا وهو الوصول إلى مدى تأثير الملوثات على حوض مسكيانة وهذا من خلال إنشاء خرائط الضعف لتقدير مدى شدة تعرض هذه المنطقة للملوثات . ولقد قمنا باختيار طريقتين لقابلية تأثير الملوثات من أجل هذه الدراسة : الطريقة الأولى ألا وهي "DRASTIC" والطريقة الثانية ألا وهي "DRATOS" .

ومن أجل التحصل على النتائج المرجوة أو المراد الحصول عليها قمنا بمعالجة العديد من البيانات وهذا ضمن برنامج " Arc GIS" والتي من بينها الصور الممسوحة ضوئيا وكذلك صور الأقمار الصناعية وهذا من أجل التحصل على جميع العناصر المختلفة لكل طريقة . ومن خلال النتائج أو الخرائط المتحصل عليها فإننا نلاحظ بأن النتائج المتحصل عليها عن طريق الطريقة الأولى "DRATOS" أكثر دقة ومن خلالها نجد بأن المنطقة المدروسة تعتبر غير محمية نسبيا ولهذا يجب على الجهات المعنية إتخاذ تدابير وقائية واحتياطية من أجل الحفاظ على هذا المورد الثمين.

الكلمات المفتاحية: القابلية للتأثير ، تنقيط الصور ، التلوث ، الخطر ، نظم المعلومات الجغرافية.

Résumé :

À travers cette étude que nous avons menée et qui s'intitule "Analyse de la vulnérabilité et évaluation des risques de pollution des eaux souterraines dans la région de Meskiana en utilisant les techniques de modélisation géographique spatiale", notre objectif était d'évaluer l'impact des polluants sur le bassin de Meskiana. Pour ce faire, nous avons créé des cartes de vulnérabilité afin d'estimer le degré d'exposition de cette région aux polluants. Nous avons choisi deux méthodes d'évaluation de la vulnérabilité aux polluants pour cette étude : la première méthode est "DRASTIC" et la seconde est "DRATOS".

Afin d'obtenir les résultats escomptés, nous avons traité de nombreuses données dans le logiciel "Arc GIS", notamment des images scannées et des images satellitaires, pour obtenir tous les éléments nécessaires à chaque méthode. À travers les résultats ou les cartes obtenus, nous constatons que les résultats de la première méthode "DRATOS" sont plus précis. Nous trouvons que la zone étudiée est relativement non protégée et, par conséquent, les autorités concernées doivent prendre des mesures préventives et de précaution afin de préserver cette précieuse ressource.

Mots clés : Vulnérabilité, Rastérisation, Pollution, Risque, SIG.

Abstract:

Through this study that we conducted, entitled "Vulnerability Analysis and Risk Assessment of Groundwater Pollution in the Meskiana Region Using Spatial Geographic Modeling Techniques", our aim was to assess the impact of pollutants on the Meskiana basin. This was done by creating vulnerability maps to estimate the degree of exposure of this area to pollutants. We chose two methods for assessing the vulnerability to pollutants for this study: the first method is "DRASTIC" and the second method is "DRATOS".

In order to obtain the desired results, we processed numerous data within the "ArcGIS" software, including scanned images and satellite images, in order to obtain all the different elements for each method. Through the results or maps obtained, we note that the results obtained through the first method "DRATOS" are more accurate, and through them, we find that the studied area is relatively unprotected. Therefore, the concerned authorities must take preventive and precautionary measures in order to preserve this valuable resource.

Keywords: Vulnerability, Rasterization, Pollution, Risk, GIS.