R**épublique Algérienne Démocratique et Populaire**

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi -Tebessa

Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie

Département : Sciences de la Terre et de l'univers

MEMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences de la terre et de l'univers

Filière : Géosciences

Option : Hydrogéologie

Thème :

Etude comparative des aptitudes des eaux souterraines à l'irrigation : cas de la nappe de Meskiana (Nord-Est Algérien)

Présenté par :

BENALDJIA WIAM

Devant les jurys :

Pr. FEHDI CHEMSEDDINE	Université Cheikh Larbi Tebessi	**Président**
Pr. GOUAIDIA LAYACHI	Université Cheikh Larbi Tebessi	**Encadreur**
Dr .RAHAL OMAR	Université Cheikh Larbi Tebessi	**Examinateur**

Session : 2024/2025

ملخص:

شهدت نوعية المياه الجوفية بسهل مسكيانة (شمال شرق الجزائر) تدهورًا ملحوظًا خلال السنوات الأخيرة، نتيجة الضغط المتزايد عليها في المجال الزراعي. تهدف هذه الدراسة إلى تقييم مدى صلاحية هذه المياه للري، من خلال تحليل خصائصها الفيزيائية والكيميائية، ومقارنتها بالمعايير الدولية المعتمدة.

يتميز سهل مسكيانة بتكوين جيولوجي معقّد يتضمن طبقات رملية وحصوية تتخللها تكوينات طينية ومناطق غنية بالأملاح، مما ينعكس على درجة ملوحة المياه. كما أن المنطقة تخضع لمناخ شبه جاف، يتسم بندرة التساقطات وارتفاع التبخر، ما يُضعف من تغذية الطبقات الجوفية ويؤدي إلى تركز الأملاح.

أظهرت النتائج أن المياه الجوفية تتراوح بين "صالحة" و"مقبولة بشروط" للاستعمال في الري، حسب موقعها ضمن الحوض. وقد تم تسجيل تجاوزات في بعض المعايير، خاصة نسبة الصوديوم والكلور والنترات، وهو ما يُعزى إلى كل من الطبيعة الجيولوجية للطبقات، والأنشطة الزراعية المكثفة، وغياب نظم معالجة المياه المستعملة.

خلصت الدراسة إلى ضرورة وضع استراتيجية متكاملة لإدارة المياه الجوفية، تقوم على المراقبة المنتظمة للجودة، وتوجيه استعمالها حسب المعايير الهيدروكيميائية لضمان استدامة المورد المائي في منطقة تعاني هشاشة مناخية واضحة.

الكلمات المفتاحية: سهل مسكيانة، المياه الجوفية، الري، الملوحة، النترات، المناخ شبه الجاف، التكوين الجيولوجي.

RÉSUMÉ :

- La nappe phréatique de la plaine de Meskiana, située au nord-est de l'Algérie, connaît une dégradation progressive de la qualité de ses eaux souterraines, principalement en raison de la pression croissante liée aux activités agricoles. Cette étude vise à évaluer l'aptitude de ces eaux à l'irrigation à travers une analyse comparative de leurs caractéristiques physico-chimiques et leur confrontation aux normes internationales en vigueur.
- La région se distingue par une structure géologique complexe, composée de formations sableuses et graveleuses intercalées par des couches argileuses et des affleurements salins, influençant fortement la minéralisation des eaux. Le climat semi-aride, marqué par une faible pluviométrie et une évapotranspiration élevée, limite la recharge naturelle de la nappe et favorise l'accumulation des sels dissous.
- Les résultats ont montré que la qualité des eaux varie d'un secteur à l'autre, allant de bonne à marginalement acceptable pour l'irrigation. Toutefois, certains paramètres comme le sodium, le chlorure et les nitrates dépassent les seuils recommandés, en lien avec la nature des formations géologiques traversées et l'impact des pratiques agricoles, notamment l'usage excessif d'engrais et l'absence de traitement des eaux usées.
- Cette étude souligne la nécessité d'adopter une stratégie de gestion intégrée et durable des ressources en eau, fondée sur le suivi régulier de la qualité, l'adaptation des usages agricoles et la protection de la nappe face aux risques de pollution.
-

- **Mots-clés** : Plaine de Meskiana, eaux souterraines, irrigation, salinité, nitrates, climat semi-aride, formations géologiques.

ABSTRACT:

- The groundwater of the Meskiana plain, located in northeastern Algeria, has experienced a progressive decline in quality in recent years, mainly due to increasing pressure from agricultural activities. This study aims to evaluate the suitability of these waters for irrigation through a comparative analysis of their physico-chemical characteristics and their alignment with international standards.
-
- The region features a complex geological structure composed of sandy and gravelly layers interspersed with clay deposits and salt-rich outcrops, which strongly influence water mineralization. The prevailing semi-arid climate, characterized by low rainfall and high evapotranspiration, limits natural recharge and promotes the accumulation of dissolved salts.
-
- Results show spatial variability in water quality, ranging from suitable to conditionally acceptable for irrigation. However, certain parameters, including sodium, chloride, and nitrate, exceed recommended thresholds due to both the geological nature of the aquifer formations and the impact of agricultural practices—particularly the excessive use of fertilizers and the discharge of untreated wastewater.
-
- This study highlights the urgent need for an integrated and sustainable groundwater management strategy, focusing on regular monitoring, optimized agricultural practices, and effective protection of water resources against contamination risks.
-

- **Keywords:** Meskiana plain, groundwater, irrigation, salinity, nitrates, semi-arid climate, geological formations.

-
-
-
-
-
-
-
-

REMERCIMENT

En tout premiers lieu ; je remercie Dieu le tout puissant et miséricordieux ; qui m'aide et donne la force ; la patience et courage durant ces longues années d'étude ; d'accomplir ce modeste travail. Je remercie Ma chère famille de leurs aides morale et financière J'exprime mes profonds remerciements à mon directeur de mémoire ; **Pr ' Gouaidia Layachi'** que acquitté de la délicate tâche de rapporteur sur cette étude ; pour sa patience et son encouragement ; encadrement et son orientation. Je voudrais ensuite remercier les nombres du jury pour m'avoir guidé et fait l'honneur d'évaluer mon travail ; j'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches et amis qui ont contribué de près ou de loin à ce mémoire. J'adresse également mes plus vifs remerciements à tous mes collèges de promotion (2éme année Master hydrogéologie 2025) pour leur soutien et leur encouragement. Je remercie toutes les personnes, qui de près ou de loin, m'ont aidé à la réalisation de ce travail. En fin je remercie Tout le corps enseignant et personnel de département de la science de la terre qui a contribué de près ou de loin à ma formation.

DÉDICACE

- Louange à **Allah** qui a facilité mon chemin et m'a permis de réussir.

  Après tout cela, je tiens à remercier du fond du cœur ceux qui ont combattu à mes côtés pour que j'en sois là aujourd'hui.

- **À mon père**, qui a porté le poids de ma fatigue sur ses épaules.

  À ma mère, qui a veillé tard, lutté, sacrifié et supporté bien des épreuves pour que je réalise mes rêves.

  À mes sœurs, qui ont tout donné pour moi, et à celles qui ont complété ce que je ne pouvais achever :

  Amel, Hanan.

  À mes frères, piliers solides au cœur tendre :

  Abderrahim, Houssam.

  À mes amies de route, avec qui j'ai partagé les échecs avant les réussites, les larmes de joie comme de tristesse :

  Nessrine, Yousra, Manal, Nourhane, Yasmine.

  À toutes mes camarades d'études, qui ont laissé en moi une empreinte unique.

- Et pour finir, en beauté…

  À celui qui a redonné le sourire à mon cœur, et semé l'espoir sur mon chemin :

  mon époux, Tarek

TABLE DES MATIERES

I. CADRE GENERAL II-17
A. Situation géographique : II-17
B. APERCU GEOLOGIQUE : II-17
C. APERCU CLIMATOLOGIQUE : II-17
D. APERCU ECONOMIQUE : II-18
I. INTRODUCTION : II-21
II. DESCRIPTION LITHOLOGIQUE DES FORMATIONS : II-21
A. TRIAS : II-21
B. Crétacé : II-24
1. Aptien : II-24
2. Albien et Cénomanien inférieur : II-24
C. Turonien : II-24
D. Emschérien (Coniacien – Santonien) : II-24
E. Campanien : II-24
F. Maestrichtien : II-25
G. Paléogène : II-25
1. Paléocène : II-25
2 : Eocène : II-25
H. Néogène : II-25
1. Miocène : II-25
I. Glacis polygéniques nappant les reliefs : II-25
J. Alluvions actuelles et récentes :; II-25
III. Géologie aquifère : III-26
IV. Aperçu Tectonique : IV-27
V. CONCLUSION : V-28
I. Introduction : V-30
II. Prospection électrique : II-30
A. Interprétations des résultats de la prospection électrique : II-31
B. Apport de la prospection électrique : II-31
III. CONCLUSION : III-33
I. INTRODICTION : III-35
II. CLIMATOLOGIE : II-35
III. Indice de De Martonne : III-35

IV. Indice d'aridité mensuel : IV-36
V. : Évolution mensuelle des précipitations à Meskiana (1990/1991–2022/2023) : V-37
A. Evolution mensuelle des précipitations V-37
B. Évolution annuelle des précipitations à Meskiana (1990/1991–2022/2023) : V-38
C. Variations de la température moyenne mensuelle à Meskiana (1990/1991-2022/2023) : V-39
D. Variations de la température moyenne annuelle à Meskiana (1990/1991-2022/2023) : V-40
VI. Diagramme ombrothermique : VI-41
VII. Bilan hydrologique :..... VII-42
VIII. CONCLUSION : VIII-43
I. introduction :..... VIII-15
II. GEOMETRIE DE L'AQUIFERE : II-15
III. Etudes piézométriques :..... II-15
A. Piézométrie :..... II-16
B. Interprétation des cartes piézométriques :..... II-16
1. Carte de mars 2022 : II-16
2. Carte de juillet 2022 : II-17
IV. Alimentation et recharge de la nappe :..... IV-19
V. Condition Aux Limites :..... V-20
VI. Conclusion : VI-23
1 INTRODUCTION : VI-25
II. Cycle de l'eau et minéralisation : VI-26
A. Minéralisation :..... VI-26
III. DESCRIPTION SOMMAIRE DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES : III-28
A. Les résultats d'analyse physico-chimique des eaux de la nappe de Meskiana, pendant la période d'observation, ont été consignés dans le tableau 05 :..... III-28
IV. Représentation graphique des faciès hydrochimiques : IV-28
A. Diagramme de PIPER IV-29
1. Période de mars 2022 :..... IV-29
2 : Période de juillet 2022 :..... IV-30
B. Diagramme de SHOLLER IV-33
1. Période de mars 2022 :..... IV-33
2. Période de juillet 2022 :..... IV-33
C. Classification de Stabler :..... IV-37
D. Période de mars et juillet 2022 : IV-37
V. CARTOGRAPHIE HYDROCHIMIQUE :..... V-39

A. Carte des Bicarbonates : (figure 24) V-40
B. Cartes des chlorures : (figure 25) V-41
C. Cartes des sulfates : (figure 26) V-42
D. Cartes du calcium : (figure 27) V-44
E. Cartes du sodium : (figure 28) V-45
F. Cartes du magnésium : (figure 29) V-46
VI. Classification des eaux d'irrigation selon le %Na : VI-47
A. . Analyse des résultats de la classification de 39 puits selon le pourcentage de sodium (Na%) : (Mars 2022) : VI-47
VII. Classification Selon des eaux d'irrigation selon le SAR : VII-49
A. Analyse des résultats de la classification de 39 puits selon le SAR (juillet 2022) : VII-49
B. Analyse des résultats de la classification de 39 forages selon le SAR (juillet 2022) : VII-51
VIII. Classification Selon des eaux d'irrigation selon le Wilcox : VIII-52
A. Classification de Richards mars 2022 : VIII-56
B. Classification de Richards juillet 2022 : VIII-57
IX. Ratio d'absorption de MAGNESIUM : IX-57
A. Calcul du MR pour le mois de mars : IX-58
B. Calcul du MR pour le mois de juillet : IX-58
X. Bicarbonate de sodium résiduel (RSBC) : X-58
A. Calcul du RSBC pour le mois de mars : X-58
B. Calcul du RSBC pour le mois de juillet : X-59
XI. Risque de Salinité : XI-59
A. Classification de l'eau pour risque de salinité (mars 2022) : XI-60
B. Classification de l'eau pour risque de salinité (juillet 2022) : XI-60
XII. . Indice de Kelly : XII-61
A. Classification de l'eau pour risque de salinité (juillet 2022) : XII-61
XIII. . Indice de perméabilité : XIII-62
A. Recommandations agronomiques : XIII-63
XIV. CONCLUSION : XIV-64

Liste des figures

Figure 1: Situation Géographique de la Plaine de Meskiana II-19
Figure 2:géologique schématique du bassin de l'Oued Meskiana ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure 3: Coupes géologiques dans le bassin de Meskiana (Gouaidia, 2008). II-23
Figure 4: Schéma litho stratigraphique **des formations géologiques du bassin de Meskiana. (Gouaidia ; 2008).** III-26
Figure 5: Esquisse tectonique de la région de Meskiana, J.M.VILA (1980). IV-27
Figure 6: Carte de position des sondages électriques verticaux et des profils (CGG, 1974) II-30
Figure 7 : Coupe géo électrique du profil B (CGG in Gouaidia, 2008) II-31
Figure 8: Coupes géo électriques des profils E et H (CGG in Gouaidia, 2008) II-32
Figure 9: Évolution mensuelle des précipitations à Meskiana (1990/1991–2022/2023) V-37
Figure 10: Évolution annuelle des précipitations à Meskiana (1990/1991–2022/2023) V-38
Figure 11: Variabilité de la température moyenne et des précipitations à Meskiana (1990/1991-2022/2023) .. V-39
Figure 12: Variabilité de la température moyenne et des précipitations à Meskiana (1990/1991-2022/2023) .. V-40
Figure 13: Courbe Ombrothermique de la station de Meskiana. VI-41
Figure 14: Carte piézométrique de la nappe de Meskiana mars 2022. ..... II-18
Figure 15: Carte piézométrique de la nappe de Meskiana, juillet 2022. ..... II-19
Figure 16: Carte des conditions aux limites dans la nappe de Meskiana, Mars 2008 ..... V-22
Figure 17: Carte de la minéralisation dans la nappe de Meskiana, mars 2022 ..... VI-27
Figure 18: Diagramme de Piper, campagne de Meskiana, mars 2022 ..... IV-31
Figure 19: Diagramme de Piper, campagne de Meskiana, juillet 2022 ..... IV-32
Figure 20: Diagramme de Scheller des eaux souterains de Meskiana mars 2022 ..... IV-35
Figure 21: Diagramme de Scheller des eaux souterains de Meskiana juillet 2022 ..... IV-36
Figure 22: Diagramme de Stabler des eaux souterrains de Meskiana mars, juillet 2022 ..... IV-38
Figure 23: Carte des facies chimique, Meskiana 2022 (mg/l). IV-39
Figure 24: Carte des bicarbonates, nappe de Meskiana, juillet 2022 (mg/l). V-41
Figure 25: Carte des chlorures, du plain de Meskiana, juillet 2022 (mg/l). V-42
Figure 26: Carte des sulfates, du plain de Meskiana, juillet 2022 (mg/l). V-44
Figure 27: Carte du calcium, du plain de Meskiana, juillet 2022 (mg/l). V-45
Figure 28: Carte du sodium, du plain de Meskiana, juillet 2022 (mg/l). V-46
Figure 29: Carte du magnésium, du plain de Meskiana, juillet 2022 (mg/l). V-47
Figure 30 : Diagramme de Wilcox des eaux souterraines de Meskiana mars 2022 ..... VIII-53
Figure 31: Diagrammes de Richards (Meskiana mars 2022) VIII-54
Figure 32: Diagramme de Wilcox des eaux souterraines de Meskiana juillet 2022 ..... VIII-55
Figure 33: Diagrammes de Richards (Meskiana juillet 2022) VIII-55

Liste des Tableaux

Tableau 1: Caractéristiques hydrogéologiques et géophysiques des formations (Gouaidia, 2008)..... II-33
Tableau 2: Les coordonnées de station météorologique de Meskiana. II-35
Tableau 3: Indices d'aridité mensuels (I) à la station de Meskiana. IV-36
Tableau 4: Bilan hydrologique moyen (1971/1972-2004/2005) à la station de Meskiana, par la méthode de Thornthwaite..... VII-42
Tableau 5: Variation des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines (mars, juillet 2022) III-28
Tableau 6: classification des eaux d'irrigation selon le NA% (juillet 2022)..... **Erreur ! Signet non défini.**
Tableau 7: classification des eaux d'irrigation selon le NA% (mars 2022)..... VI-48
Tableau 8: classification des eaux d'irrigation selon le SAR (juillet 2022) VII-49
Tableau 9: classification des eaux d'irrigation selon le SAR (mars 2022)..... VII-51
Tableau 10: Classification de Richards (mars 2022)..... VIII-56
Tableau 11: Classification de Richards (juillet 2022)..... VIII-57
Tableau 12: Classification de MR (mars 2022)..... IX-58
Tableau 13: Classification de MR (juillet 2022) IX-58
Tableau 14: Qualité des eaux pour l'irrigation à partir de l'évolution du RSBC (mars 2022)..... X-58
Tableau 15: Qualité des eaux pour l'irrigation à partir de l'évolution du RSBC (juillet 2022)..... X-59
Tableau 16: Classification de l'eau pour risque de salinité (Adapté des données de FAO) (mars 2022) XI-60
Tableau 17: Classification de l'eau pour risque de salinité (Adapté des données de FAO) (juillet 2022) XI-60
Tableau 18: Classification de l'eau pour risque de salinité (Adapté des données de FAO) (juillet 2022) ... XII-61
Tableau 19: Qualité de l'eau pour le ratio de Kelley (Kelley, Brown et al. 1940) (juillet 2022)..... XII-62
Tableau 20: classification des eaux souterraines basée sur le IP (mars 2022) XIII-62
Tableau 21: classification des eaux souterraines basée sur le IP (juillet 2022)..... XIII-63
Tableau 22: Évaluation globale de la qualité des eaux pour l'irrigation : XIII-63

Liste des symboles

CE : Conductivité électrique (µS/cm)

DA : Déficit Agricole (mm)

Da : Densité apparente du sol

ETP : Evapotranspiration potentielle (mm)

ETR : Evapotranspiration Réelle (mm)

EX : Excédent en eau du sol (mm)

I : Indice d'aridité

I : Infiltration de l'eau dans le sol (mm)

K : Perméabilité (m/s)

P : Précipitations (mm)

P : Profondeur de la couche traversée par les racines (cm)

R : Ruissellement (mm)

RFU : Réserve Facilement Utilisable (mm)

SAR : Sodium Absorption Ratio

T : Température (°C)

T : Transmissivités (m^2/s)

MR : Rapporte d'absorption de magnésium

RSBC : Bicarbonate de sodium résiduel

KR : Indices de Kelly

IP : Indices de perméabilité

Introduction générale :

- La plaine de Meskiana, située dans la wilaya d'Oum El Bouaghi à l'est de l'Algérie, est une région agricole essentielle en raison de la fertilité de ses sols et de son climat semi-aride. Cependant, elle fait face à des défis majeurs liés à la gestion des ressources en eau, notamment en raison de la surexploitation des nappes phréatiques et de la diminution des précipitations, exacerbées par le changement climatique.
- Plusieurs facteurs influencent la disponibilité et la qualité des eaux souterraines dans cette région :
- Les conditions climatiques : un climat semi-aride marqué par une évapotranspiration élevée et des précipitations irrégulières, accentuant la vulnérabilité hydrique.
- La nature géologique : une lithologie dominée par des formations triasiques et évaporitiques, influençant la composition chimique des eaux souterraines.
- Les activités anthropiques : des rejets urbains non contrôlés et l'usage intensif d'engrais chimiques, contribuant à la pollution et à la dégradation de la qualité de l'eau.
- L'irrigation repose principalement sur l'exploitation des eaux souterraines, complétée par l'utilisation des eaux de surface lors des périodes pluvieuses. Cependant, la salinisation des sols et l'assèchement fréquent de l'Oued de Meskiana aggravent la situation, rendant nécessaire l'adoption de pratiques d'irrigation plus durables et efficaces.
- Dans ce contexte, cette étude vise à évaluer la qualité des eaux souterraines de la nappe de Meskiana et leur aptitude à l'irrigation à travers l'analyse de leurs caractéristiques physico-chimiques. Plus précisément, elle a pour objectifs de :
- ● Déterminer la qualité des eaux souterraines en fonction de paramètres physico-chimiques (salinité, conductivité électrique, concentration en ions majeurs, etc.).
- ● Évaluer leur adéquation pour l'irrigation en les comparantes aux normes internationales et aux critères d'aptitude agricole.
- ● Identifier les contraintes potentielles liées à leur utilisation, notamment les risques de salinisation des sols et de détérioration de la structure du sol.
- ● Proposer des recommandations pour une gestion durable des ressources en eau et une optimisation de leur usage en agriculture
- Pour répondre à ces problématiques, cette étude tentera d'apporter des éléments de réponse aux questions suivantes :

- ● Comment la rareté des eaux de surface influence-t-elle la dépendance de l’agriculture vis-à-vis des eaux souterraines ?
- ● Quelles sont les caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines de la région de Meskiana ?
- ● Quels critères permettent d’évaluer leur aptitude à l’irrigation ?
- ● Quelles recommandations peuvent être proposées pour une meilleure gestion et utilisation de ces ressources hydriques en agriculture ?
- ● Cette analyse contribuera ainsi à une meilleure compréhension de la dynamique des eaux souterraines dans la région et à la mise en place de stratégies adaptées pour leur gestion durable.

I. CADRE GENERAL

A. Situation géographique :

- La plaine de Meskiana, s'étendant sur 1700 km², se situe au Nord-Est de l'Algérie, à 200 km de la mer Méditerranée, dans le haut bassin de l'Oued Mellègue. Elle fait également partie des hauts plateaux, caractérisés par un réseau dense de montagnes de moyenne à forte altitude, séparées par des dépressions. Plusieurs localités importantes se trouvent dans cette plaine, telles que Bellala, Dalâa, Meskiana, Rehia et Zebar, totalisant plus de 48 000 habitants selon un recensement de 2004. En raison de sa position géographique, les limites du bassin de Meskiana sont définies comme suit :

- Au Nord : Djebel Mesloula, Argoub El Mnachir et Djebel Khannaga ;
- Au Nord-Ouest : Djebel Chettaya, Djebel Bou Thokhma et Djebel Ahmar ;
- Au Nord-Est : Djebel Belkfif ;
- Au Sud-Est : Djebel Gouriguer, Djebel Es Stih et Djebel Khemalal ;
- Au Sud-Ouest : Djebel Boutoukhma et Chott Esbikha.

B. APERCU GEOLOGIQUE :

- Sur le plan géologique, le bassin de Meskiana est constitué de formations sédimentaires autochtones datant du nord des Hautes Plaines constantinoises. Ces formations, selon KUSCER (1985), comprennent :

- Des terrains anciens, principalement du Trias, qui se manifestent par des diapirs, comme ceux du Djebel Mesloula et du Djebel Belkfif.
- D'importantes couches datant du Crétacé (Aptien et Maestrichtien), composées de marnes et de calcaires.
- Divers recouvrements continentaux, tels que des alluvions actuelles et récentes, ainsi que des grès, des sables et des graviers, qui correspondent aux périodes du Mio-Plio-Quaternaire

C. APERCU CLIMATOLOGIQUE :

- La plaine de Meskiana présente un climat semi-aride, avec des précipitations moyennes annuelles ne dépassant pas 340 mm, et une évapotranspiration réelle d'environ 315 mm Cette situation entraîne une concentration élevée en sels dans les eaux (LACHARME, 2001).

D. APERCU ECONOMIQUE :

- La plaine de Meskiana fait partie d'un domaine sub-saharien au climat semi-aride, caractérisé par de faibles précipitations, ce qui limite le développement du couvert
- Végétal. Les agglomérations de la région ne disposent d'aucune infrastructure industrielle, à l'exception d'une usine de laine et de textiles actuellement à l'arrêt. Cependant, l'agriculture et l'élevage y ont bien évolué. En effet, cette région appartient agro-écologiquement aux hautes plaines intérieures orientales, qui sont principalement céréalières et présentent des microclimats généralement contraignants (hiver froid à très froid, été chaud à très chaud et sec). Les précipitations y sont souvent faibles, et l'eau est un facteur crucial pour les systèmes de culture. Lors des années pluvieuses, lorsque l'eau d'irrigation est disponible, on cultive des légumes, des fourrages et des céréales, avec un assolement biennal ou parfois triennal. En revanche, durant les années de sécheresse, les cultures maraîchères et fourragères diminuent, et l'on se concentre principalement sur les céréales pour assurer un revenu minimum aux agriculteurs. Ces dernières années, le secteur agricole et l'élevage ont connu un important développement grâce au lancement des programmes PNDA en 2000 et FNRDA en 2001, qui ont permis l'extension des terres irriguées et l'augmentation des cycles culturaux.

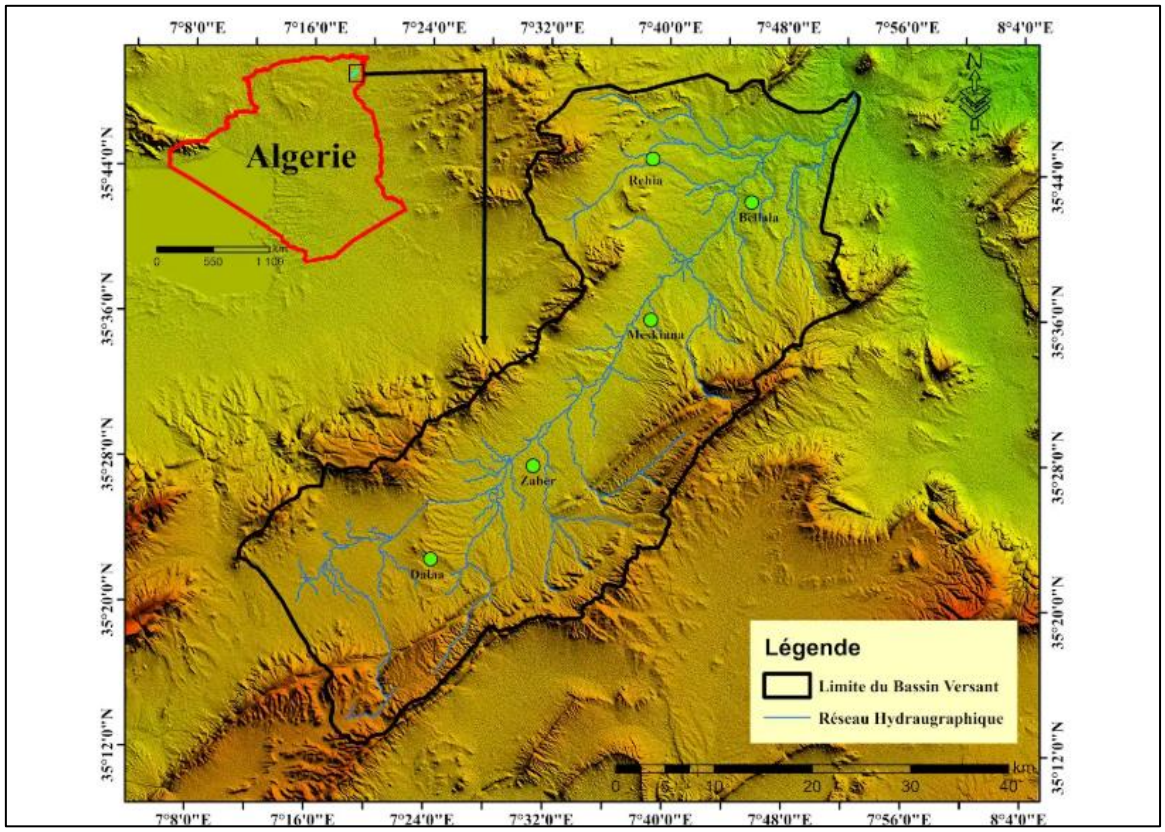


Figure 1: Situation Géographique de la Plaine de Meskiana

CHAPITRE I : GEOLOGIE

I. INTRODUCTION :

- La géologie du bassin de Meskiana a été l'objet de nombreuses études par des géologues tels que M.G. BETIER et al. (1951), qui ont réalisé la carte géologique de l'Algérie à l'échelle 1/500.000, J.M. VILA (1977), qui a établi les cartes de Dalâa, F'Kirina et Ain Beida à l'échelle 1/50.000, D. KUSCER et al. (1985), qui ont conçu la carte de Meskiana à l'échelle 1/50.000, et S. DOZET (1985), qui a réalisé la carte d'El Aouinet à la même échelle. La zone nord-est, incluse dans la carte de Youks-Les Bains, a été cartographiée par W.M. KOWALSKI (2002).

  Les recherches sur le bassin de Meskiana ont révélé qu'il s'agit de terrains sédimentaires autochtones nord-aurésiens (J.M. VILA, 1980) situés dans la partie orientale des Hautes Plaines constantinoises. Ces formations comprennent :

- Des terrains anciens du Trias à faciès lagunaire, qui apparaissent sous forme de diapirs ;
- D'importantes couches du Crétacé (Aptien et Maestrichtien), constituées de marnes et de calcaires ;
- Des grès et des calcaires gréseux marins formant la base du Miocène ;
- Divers recouvrements continentaux représentant le Mio-Plio-Quaternaire.

II. DESCRIPTION LITHOLOGIQUE DES FORMATIONS :

- La litho stratigraphie du bassin de Meskiana est dominée par deux grands ensembles :
- Le premier ensemble est principalement constitué des formations crétacées et tertiaires qui affleurent sur les bordures de la région ;
- Le second ensemble, quant à lui, est formé en majorité par un recouvrement Mio-Plio-Quaternaire qui se dépose dans la plaine (voir figure 02).

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

A. TRIAS :

- Le Trias est représenté par des masses chaotiques sans stratification (J.M. VILA, 1977), caractérisant ainsi le Trias du Constantinois. Ces roches triasiques forment des diapirs, qui entrent en contact anormal avec les couches plus récentes. On les retrouve notamment :

- Au nord, près d'El Aouinet.
- Au nord-est, au niveau du Djebel Belkfif.

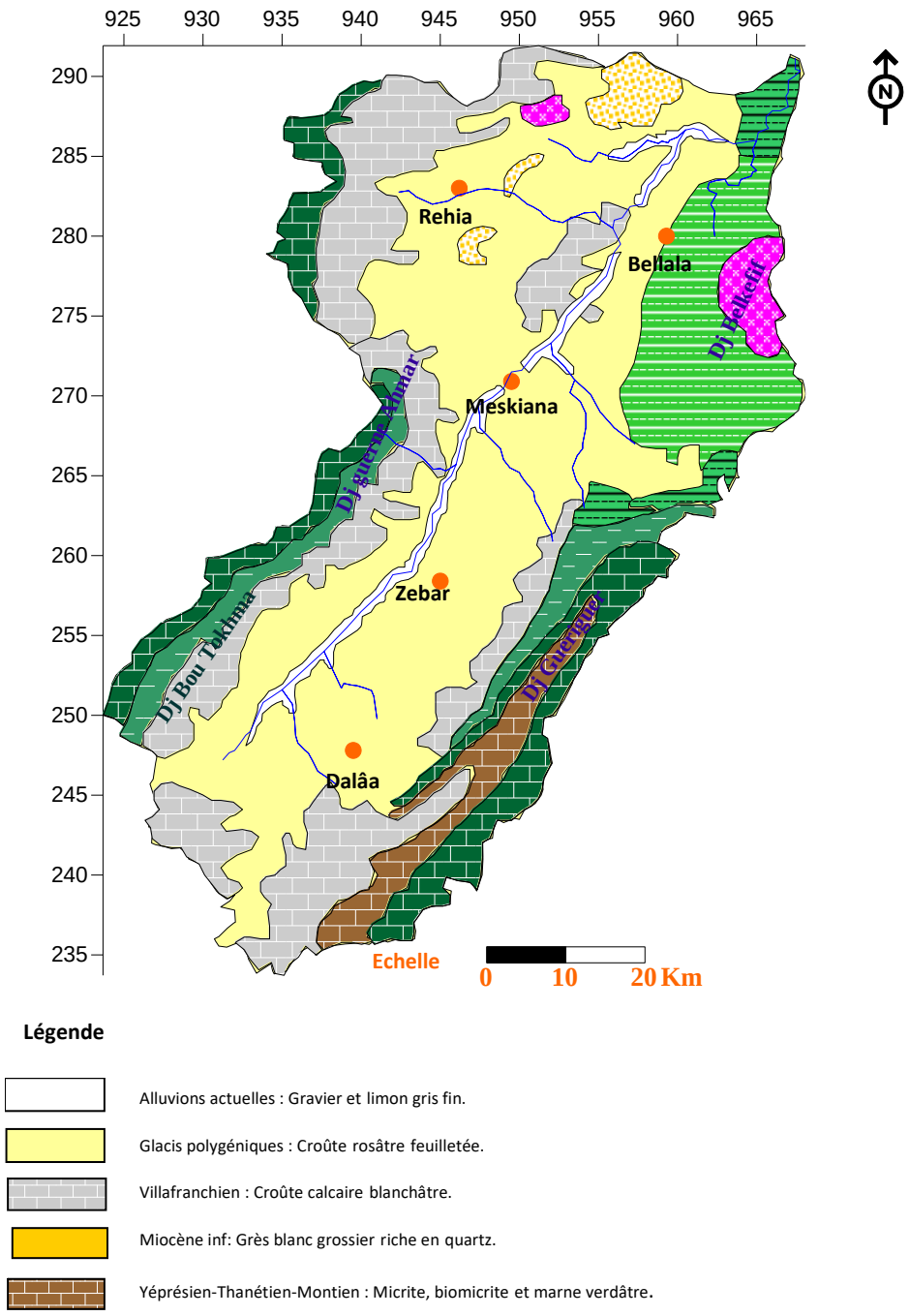


Figure 02 : Carte géologique schématique du bassin de l'Oued Meskiana Gouaidia 2008

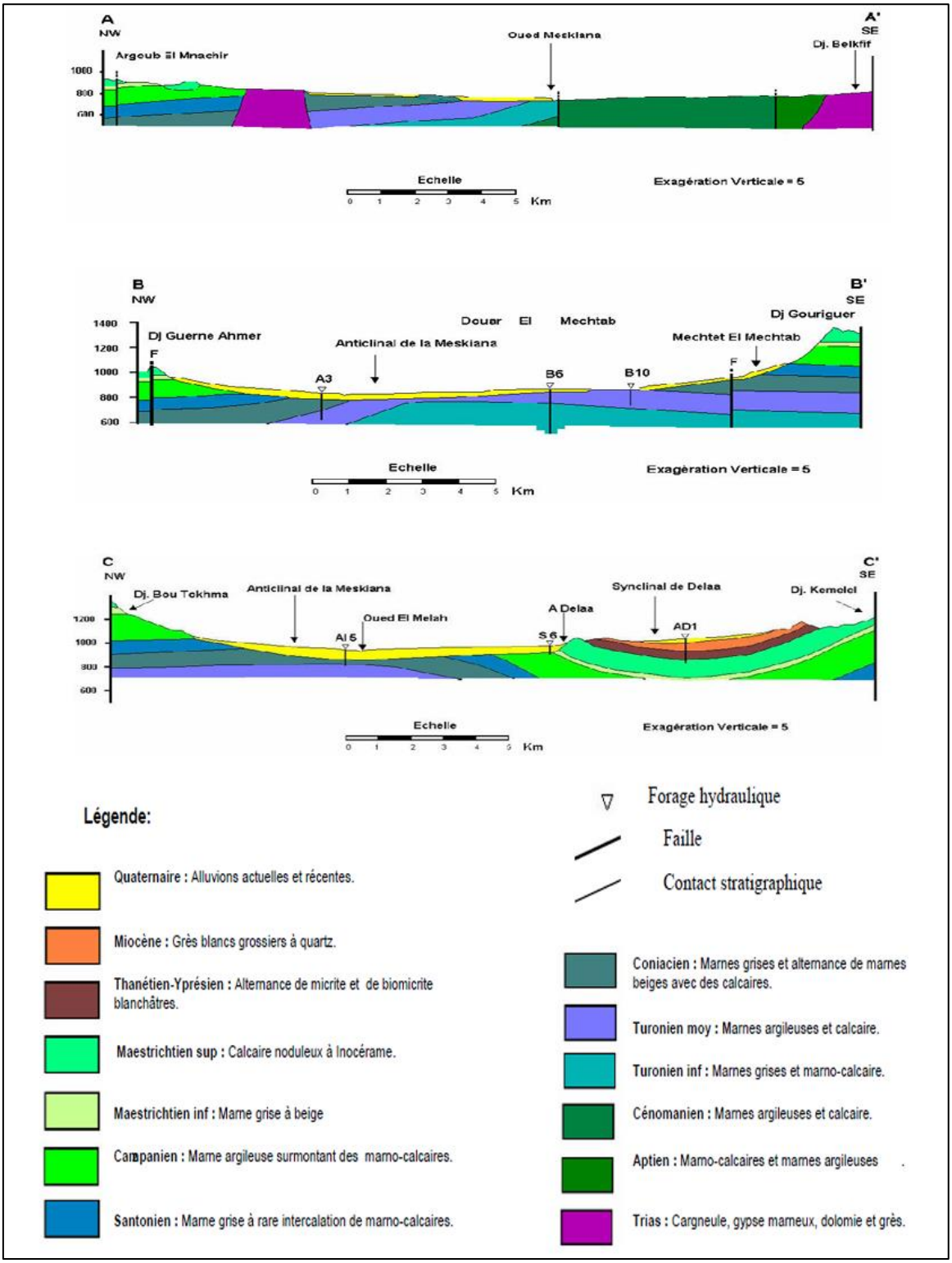


Figure 2: Coupes géologiques dans le bassin de Meskiana (Gouaidia, 2008).

B. Crétacé :

1. Aptien :

- Les formations aptiennes sont de taille relativement petite et affleurent au nord. Elles sont en contact anormal avec des affleurements triasiques, notamment dans les zones de Mesloula, Djebel Belkfif, Argoub Ezzitoun et Kodiat El Hadjel. Ces formations aptiennes se divisent en deux faciès : le premier est marno-calcaro-gréseux, et le second est composé de calcaires récifaux (DOZET, 1985).

2. Albien et Cénomanien inférieur :

- Ces formations sont présentes au Djebel Belkfif et à Mesloula, mais elles sont caractérisées par des épaisseurs très limitées, ne dépassant pas les 100 mètres.
- Cénomanien moyen et supérieur :

Ce niveau est observable à la limite nord-est de la plaine, dans la région de Bellala. Il est représenté par une série très épaisse, dont l'épaisseur varie entre 600 mètres et 1000 mètres

C. Turonien :

- Le Turonien est visible au nord-est, notamment à Douar El Machtab, et se compose de plusieurs unités :
- Turonien basal
- Turonien moyen et supérieur

D. Emschérien (Coniacien – Santonien) :

- Le long des bordures est et ouest, l'Emschérien est constitué de deux unités :
- Le Coniacien, composé d’alternances de marnes beiges ou grises et de calcaires gris bio détritiques et grumeleux. Son épaisseur attaint environ 90 mètres (voir figure 3, coupe CC') ;
- Le Santonien, formé de marnes grises et de calcaires marneux à inocérames, avec une épaisseur d’environ 100 mètres.

E. Campanien :

- Le Campanien affleure sur les bordures occidentales, à Djebel Bou Thokma, et orientales, à Djebel Gourigueur

F. Maestrichtien :

- Les calcaires maestrichtiens forment les montagnes du Djebel Gourigueur, Djebel Bou Tokhma et Djebel Garne Lahmar.
- Le Maestrichtien inférieur est dominé par des marnes, et la série ne dépasse pas 40 mètres d'épaisseur.
- Le Maestrichtien supérieur est représenté par des formations calcaires.

G. Paléogène :

1. Paléocène :

- Le Paléocène est uniquement observé à la limite orientale, entre Djebel Guerigueur et Djebel Serdies, où il est représenté par une série d'une épaisseur de 50 mètres.

2 : Eocène :

- L'Eocène a été identifié sur les flancs est et ouest du vaste anticlinal de Meskiana, notamment à Djebel Gourigueur et dans le synclinal de Ain Dalâa. IL se caractérise par :
- Des formations montiennes.
- Des formations thanétio-yprésiennes.

H. Néogène :

- **Miocène :**

- Les affleurements miocènes sont de taille réduite et se trouvent principalement dans la partie nord de la plaine, surtout à Mesloula, Argoub El Manchar, Argoub Ez Zitoun, Kodiat El Agab, Kodiat Rehia et Kodiat Naga.

I. Glacis polygéniques nappant les reliefs :

- Ces glacis couvrent de vastes surfaces de la plaine en pente douce.

J. Alluvions actuelles et récentes :;

- Ces alluvions se trouvent principalement dans la vallée de Meskiana et sont limitées à cette région.

III. GEOLOGIE AQUIFERE :

- L'analyse de la série litho stratigraphique permet d'identifier certaines formations perméables qui peuvent constituer des aquifères. On peut citer :

- Les calcaires turoniens ;
- Les calcaires du Maestrichtien supérieur ;
- Les calcaires de l'Eocène, qui forment le synclinal perché de Zoui-Ain DalâaLes formations plio-quaternaires, qui sont très perméables et se rapprochent progressivement de la surface du sol, du sud-ouest au nord-est, en raison de la remontée du substratum.

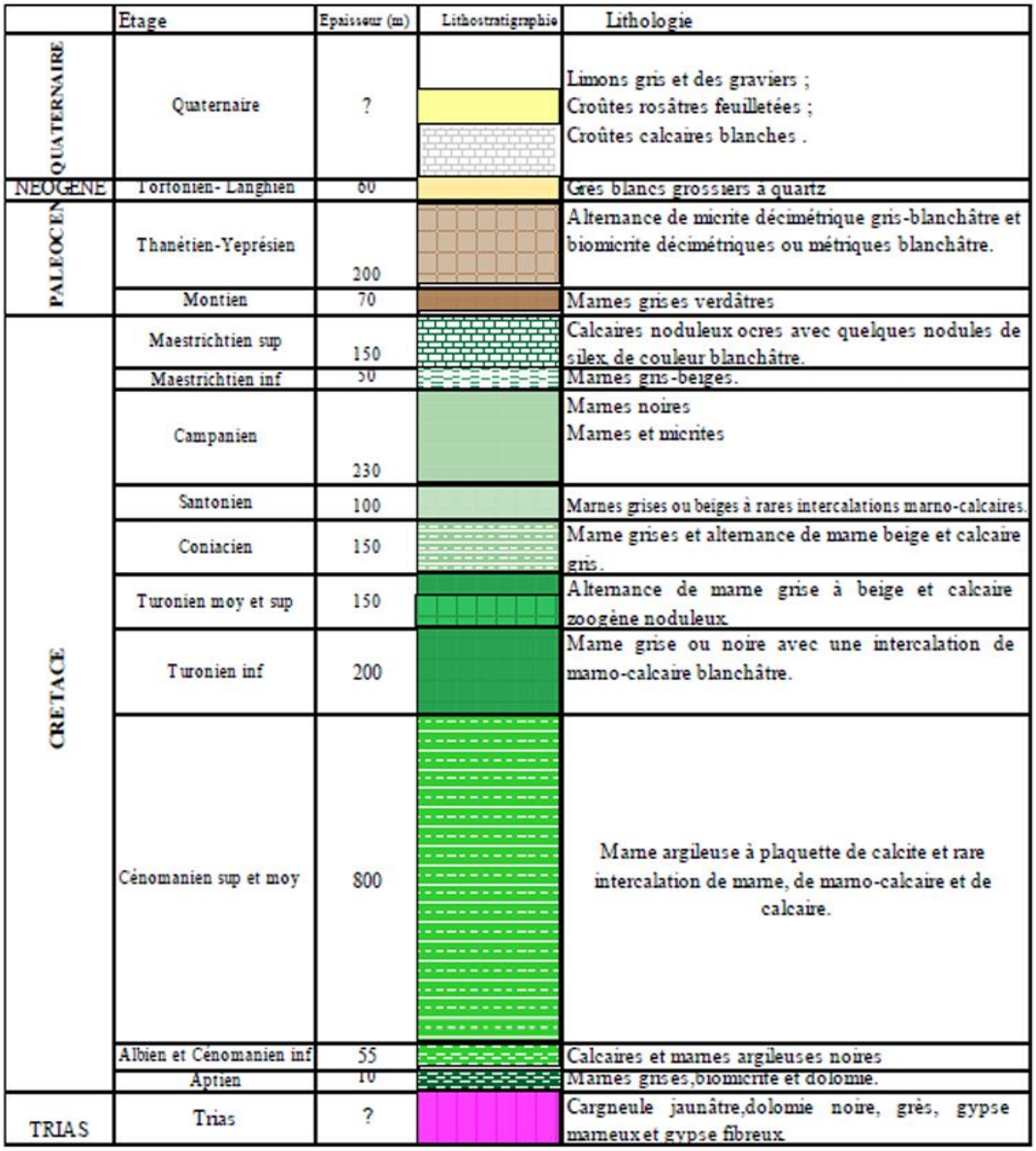


Figure 3: Schéma litho stratigraphique des formations géologiques du bassin de Meskiana. (Gouaidia ; 2008)

IV. APERÇU TECTONIQUE :

- La plaine de Meskiana fait partie de l'Atlas saharien (J.M. VILA, 1980) et se caractérise par des éléments tectoniques relativement simples, tels que des plis orientés NE-SW, ainsi que des dislocations souvent perpendiculaires à la direction de ces plis. On y trouve également des structures particulières formées sous l'influence de la tectonique diapirique. Du point de vue tectonique, la période crétacée a été globalement calme (DOZET, 1985). Parmi les principales dynamiques observées pendant cette époque, on note une subsidence continue au sud du bassin, ainsi que des soulèvements relatifs affectant certaines zones au nord de celui-ci (voir figure 05).

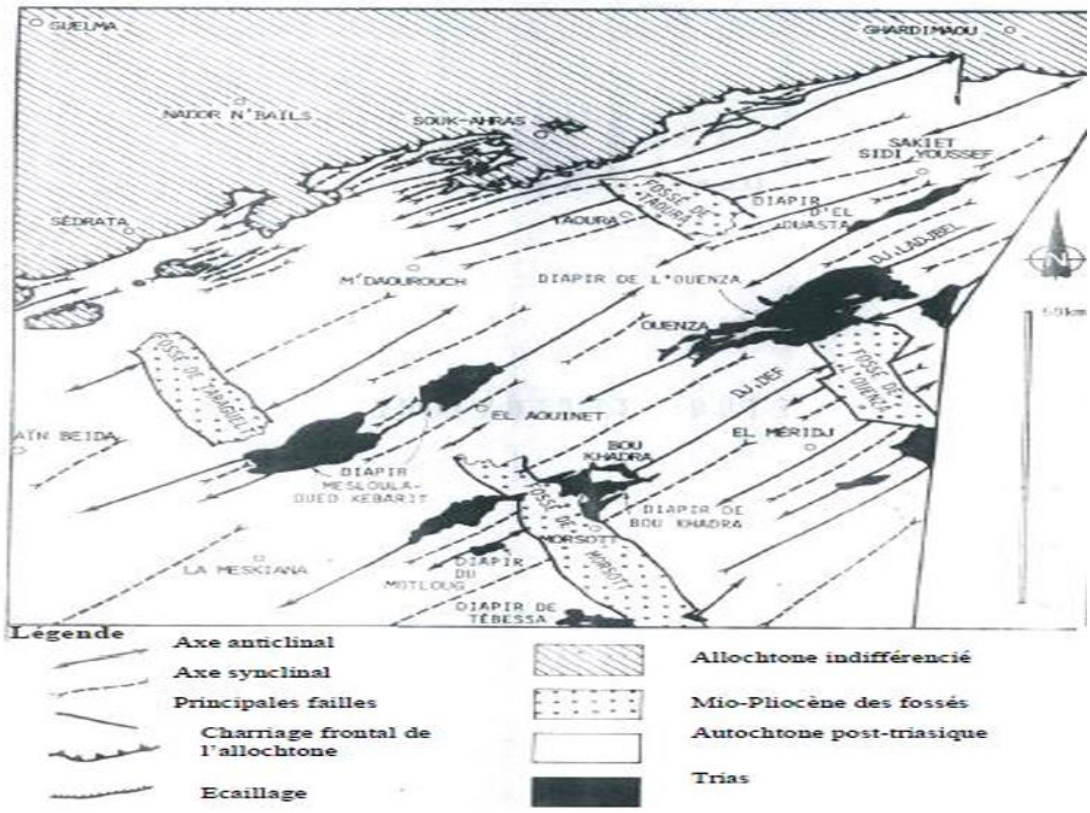


Figure 4: Esquisse tectonique de la région de Meskiana, J.M.VILA (1980).

- Entre le Crétacé et le Miocène, deux grandes phases tectoniques ont modelé de nombreuses structures géologiques. La première phase a été marquée par de vastes plissements, créant des anticlinaux et des synclinaux, tels que ceux de l'Oued Smara, El Houd, le synclinal de Djebel Belkfif, celui de Kodiat Zennbaî, celui de Reguibet El Assel, celui de Djebel Gourigueur et l'anticlinal de Kessar El Tir. Ces plissements ont été suivis par une phase de tectonique cassante, durant laquelle de nombreuses failles et dislocations longitudinales et transversales ont été générées, notamment la faille de Djebel Gourigueur Ain Dalâa, qui joue un rôle hydrogéologique majeur. Le fossé

- Tectonique de Morsott, qui est d'âge post-Miocène, présente un axe perpendiculaire à la direction des plis.
- Les diapirs, qui forment les noyaux des anticlinaux, peuvent aussi remplir les fractures les plus importantes. Leur activité a eu lieu au Crétacé, au Miocène, au Pliocène, et probablement dès le début du Quaternaire

V. **CONCLUSION :**

- L'étude géologique du bassin de Meskiana a permis de dégager les observations suivantes :
- La région fait partie de l'Atlas Saharien et se situe dans la partie orientale des hautes plaines constantinoises. Elle se compose de deux grands ensembles géologiques :

- Les affleurements de bordure datant du Crétacé.
- Les formations Plio-Quaternaires, qui occupent entièrement la plaine.
- Les activités tectoniques ont engendré des plis orientés NE-SW, accompagnés de failles orthogonales qui affectent les formations crétacées.

- Du point de vue hydrogéologique, les calcaires du Crétacé qui bordent la plaine pourraient servir de puissants aquifères. Les fractures au sein de ces formations pourraient créer des réseaux capables de stocker ou de faire circuler des quantités importantes d'eau. En revanche, les assises marneuses forment un substratum imperméable, tant au niveau des bordures qu'au centre de la plaine.
- À l'intérieur de la plaine, on trouve des formations alluvionnaires composées de galets, cailloutis, graviers, sables et limons. Ces formations pourraient présenter une porosité primaire et donner lieu à des nappes alluviales.
- En ce qui concerne la minéralisation des eaux souterraines, l'analyse lithologique des formations géologiques révèle :

- Les calcaires sont à l'origine d'un faciès principalement bicarbonaté calcique ou magnésique.
- Les marnes produisent des faciès sulfatés.
- Les alluvions engendrent des faciès non salés.

- Il est également à noter que la présence du Trias pourrait entraîner la salinisation des eaux souterraines.

CHAPITRE II : GEOPHYSIQUE

I. INTRODUCTION :

- L'exploration et l'exploitation des aquifères d'une formation géologique dépendent largement de la compréhension de la composition lithologique de cette formation. Pour déterminer la géométrie de ces aquifères, des techniques de reconnaissance telles que la prospection électrique et les forages mécaniques sont souvent utilisées. Ces méthodes permettent de mieux comprendre les dimensions des aquifères, ce qui est essentiel pour une gestion efficace des ressources en eau.

II. PROSPECTION ELECTRIQUE :

- Une première campagne de prospection électrique, couvrant une large portion de la plaine de Meskiana, a été menée en 1974 par la Compagnie Générale de Géophysique (C.G.G.), au profit de la Direction de l'Hydraulique de la Wilaya de Constantine. Une seconde campagne a eu lieu en 1980, cette fois au sud d'Ain Dalâa, et a été réalisée par la compagnie ALGEO (voir figure 06).

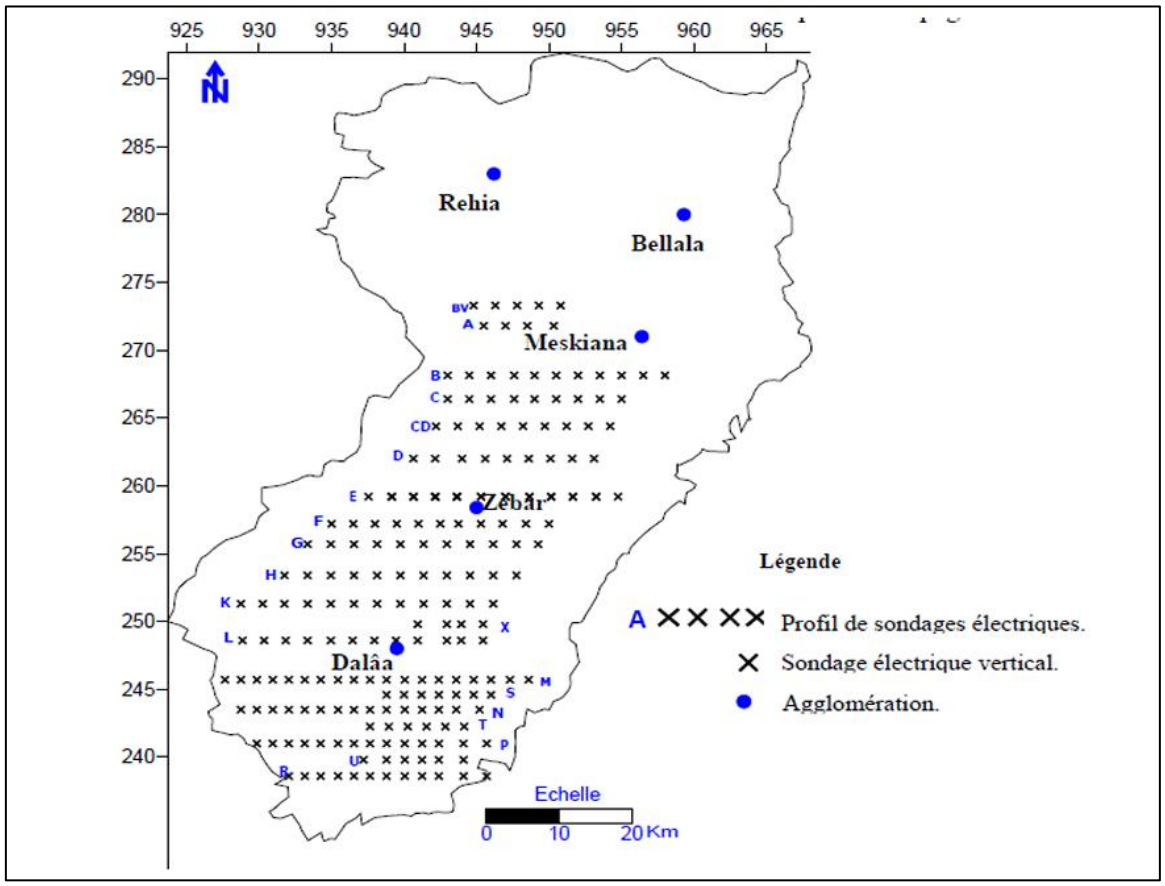


Figure 5: Carte de position des sondages électriques verticaux et des profils (CGG, 1974 in Gouaidia, 2008)

A. Interprétations des résultats de la prospection électrique :

- Ces deux campagnes géoélectriques, réalisées à partir de 25 profils de différentes longueurs AB (4000 m, 3000 m, 2000 m, 600 m et 100 m), avaient pour objectifs principaux :
- Déterminer la profondeur d'un éventuel substratum calcaire résistant datant du Crétacé inférieur, sous le recouvrement marneux et marno-calcaire du Cénomanien ;
- Identifier la géométrie du remplissage alluvial et localiser les zones présentant les meilleures transmissivités dans celui-ci ;
- Étudier la structure de l'anticlinal crétacé de Meskiana ainsi que celle du synclinal éocène perché de Dalâa.

B. Apport de la prospection électrique :

- La comparaison des données issues de la prospection électrique et des forages mécaniques a permis de mieux comprendre le remplissage alluvial de la plaine de Meskiana, qui se caractérise par les éléments suivants :
- Des épaisseurs variables, allant de 5 m en bordure à 155 m au centre de la plaine ;
- Des résistivités comprises entre 3 et 150 Ω.m ;
- Une lithologie très hétérogène.
- Les coupes géo-électriques ont révélé la présence de deux niveaux résistants, dont la résistivité varie de 30 à 100 Ω.m, avec des épaisseurs allant de 5 à 40 m. Il est à noter que le premier niveau présente une certaine discontinuité, probablement en raison d'une érosion.

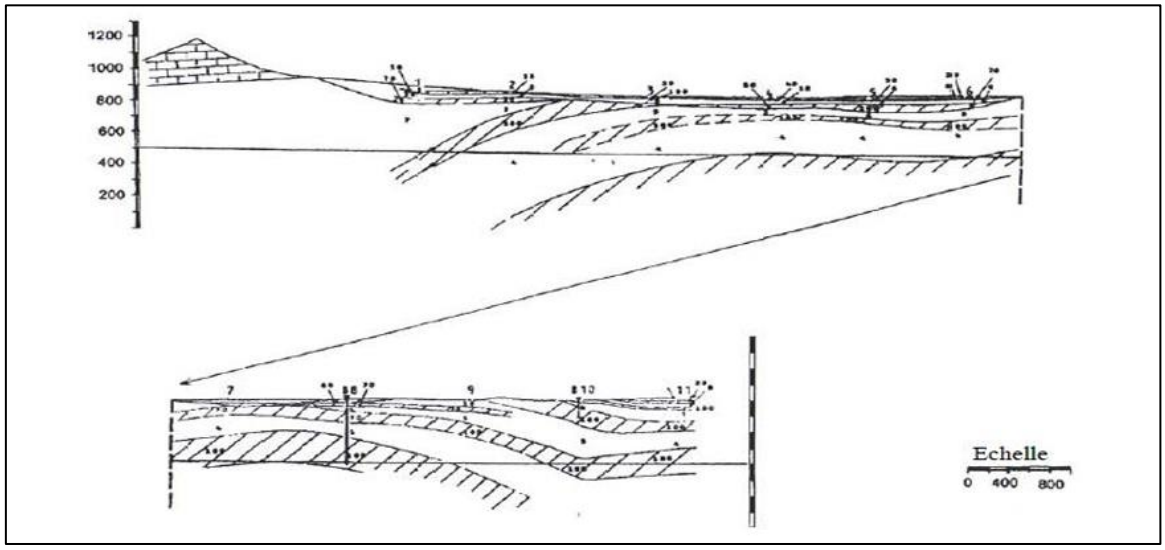
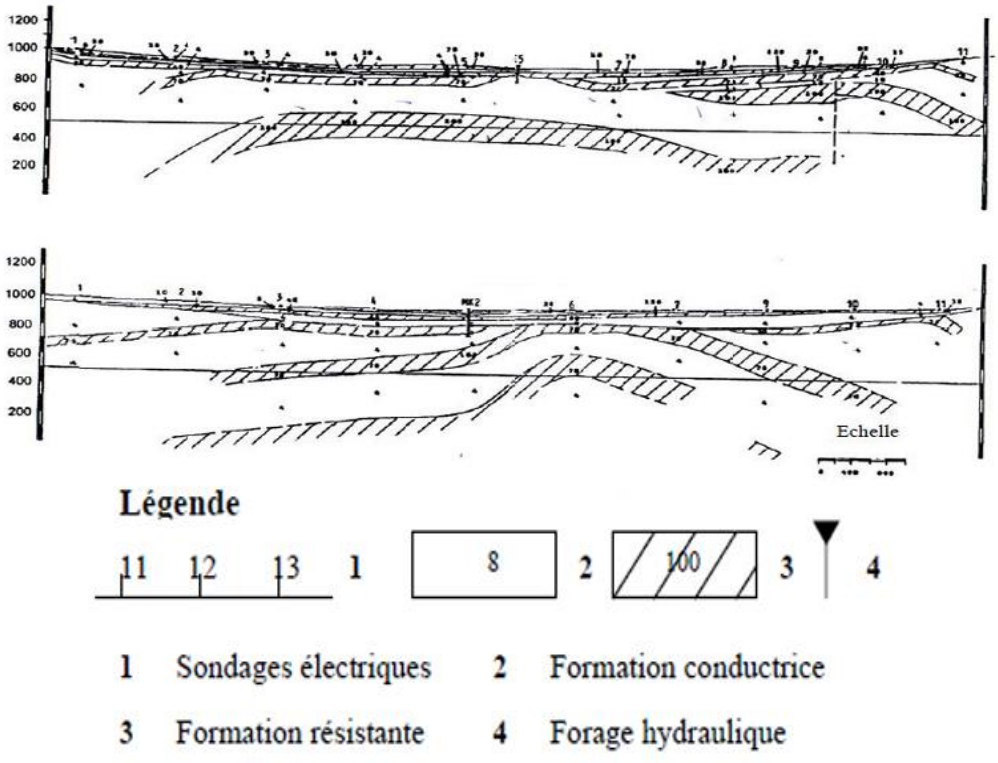


Figure 6 : Coupe géo électrique du profil B (CGG in Gouaidia, 2008)



Légende

1 Sondages électriques 2 Formation conductrice

3 Formation résistante 4 Forage hydraulique

Figure 7: Coupes géo électriques des profils E et H (CGG in Gouaidia, 2008)

Tableau 1: Caractéristiques hydrogéologiques et géophysiques des formations (Gouaidia, 2008)

Formation	Age	Epaisseur (m)	Résistivité (Ωm)	Intérêt hydrogéologique
Sables graviers et cailloutis	Pio -Qauternaire	5-145	30-150	Perméable
Limons et argiles	Pio-Qauternaire	5-30	3 - 5	Imperméable
Calcaires	Eocéne	100	70 - 300	Perméable
Marnes	Montien	70	2 - 5	Imperméable
Calcaires	Maestrichtien Sup	460	70 -300	perméable
Marnes	Maestrichtien inférieur	40- 50	5 - 20	Imperméable
Marnes	Campanien	200	2 - 5	Imperméable
Marnes	Emchérien	90 - 100	2 - 5	Imperméable
Calcaires	Turonien	200 - 270	70 - 300	Perméable
Marnes argileuses	Cénomanien	600 - 1000	2 - 5	Imperméable

III. CONCLUSION :

- Les résultats de la prospection électrique, associés aux données obtenues des forages mécaniques, ont conduit aux observations suivantes :
- Les dépôts du remplissage Mio-Plio-Quaternaire sont très hétérogènes. Ils comprennent des couches conductrices, principalement constituées de marnes et d'argiles, ainsi que des couches résistantes formées de sables, de graviers, de galets et de cailloutis. Ces dernières forment la nappe phréatique du remplissage alluvial de la plaine de Meskiana.
- Une structure anticlinale se distingue dans la zone de Meskiana. Elle est constituée de formations marneuses et marno-calcaires datant du Cénomanien au Campanien, avec un cœur d'âge Turonien.
- Une structure synclinale, localisée dans la zone de Dalâa, est composée de formations résistantes de calcaires et de calcaire marneux, datant du Maestrichtien et de l'Éocène. Ces formations ont une épaisseur considérable, pouvant atteindre 155 m, et sont considérées comme de potentiels bons réservoirs aquifères.

CHAPITRE III : HYDROCLIMATOLOGIE

I. INTRODICTION :

- La nappe de Meskiana est influencée par un climat semi-aride. Cette étude hydroclimatologique vise à comprendre l'alimentation des réservoirs d'eau souterrains, ce qui est essentiel pour évaluer les différents paramètres du bilan hydrologique, tels que les précipitations, ainsi que les pertes d'eau de la nappe dues à l'évaporation et à l'évapotranspiration.

II. CLIMATOLOGIE :

- La station météorologique de la Meskiana gérée par l'office national de la météorologie, et dont la période d'observation va de 1987 à 2023 pour la station de Meskiana, a servi pour l'évaluation des facteurs du bilan. Cette station EST située selon les coordonnées suivantes :

Tableau 2: Les coordonnées de station météorologique de Meskiana.

Station	Coordonnée Lambert		altitude	Période d'observation
	X	Y		
MESKIANA	949,7	271	860	1987-2023

III. INDICE DE DE MARTONNE :

- Cet indice est fonction des températures et des précipitations (2022/2023) ; il est calculé par :
- La relation Suivante :

$$\mathbf{I}=\frac{\boldsymbol{P}}{\boldsymbol{T}+\mathbf{10}}$$

- **I :** indice d'aridité
- **P** : précipitations moyennes annuelles en mm.
- **T** : températures moyennes annuelles en °C
- Application :
- **P**= 28,99 mm
- **T** = 16,44 C°

Ce qui donne **:** **I= 1,10**

- Suivant les valeurs de (I), **De Martonne** a établi la classification suivante :
- I < 5 : climat hyperaride

- 5< I < 7,5 : climat désertique
- 7, 5 < I <10 : climat steppique
- 10 < I <20 : climat semi-aride

  20 <30 : climat tempéré.
- La station de Meskiana est caractérisée par un climat hyperaride.

IV. INDICE D'ARIDITE MENSUEL :

- L'indice d'aridité mensuel est défini par la relation suivante :

$$\mathbf{I}=\frac{\mathbf{12}.\boldsymbol{P}}{\boldsymbol{T}+\mathbf{10}}$$

- **I** : Indice d'aridité mensuel
- **P** : Précipitations moyennes mensuelles en mm
- **T°** : Température moyenne mensuelle en °C.
- L'application de la formule a permis de dresser le tableau :

Tableau 3: Indices d'aridité mensuels (I) à la station de Meskiana.

Mois	I	Etage bioclimatique
Septembre	14,05	Climat Semi-aride
Octobre	13,61	Climat Semi-aride
Novembre	18,28	Climat Semi-aride
Décembre	17,68	Climat Semi-aride
Janvier	20,91	Climat tempéré
Février	18,15	Climat Semi-aride
Mars	23,53	Climat tempéré
Avril	14,89	Climat Semi-aride
Mai	16,90	Climat Semi-aride
Juin	9,13	Climat Steppique
Juillet	3,22	Climat Hyperaride
Aout	9,01	Climat Steppique

- Selon la classification de De Martonne mentionnée précédemment, les mois de septembre, octobre, novembre, décembre, février, mars, avril et mai sont caractérisés par un climat semi-aride. En

revanche, les mois de juin et aout présentent un climat steppique, tandis que le mois de juillet est classé comme ayant un climat hyperaride, et les mois janvier, mars présentent un climat tempéré.

V. : ÉVOLUTION MENSUELLE DES PRECIPITATIONS A MESKIANA (1990/1991–2022/2023) :

A. Evolution mensuelle des précipitations

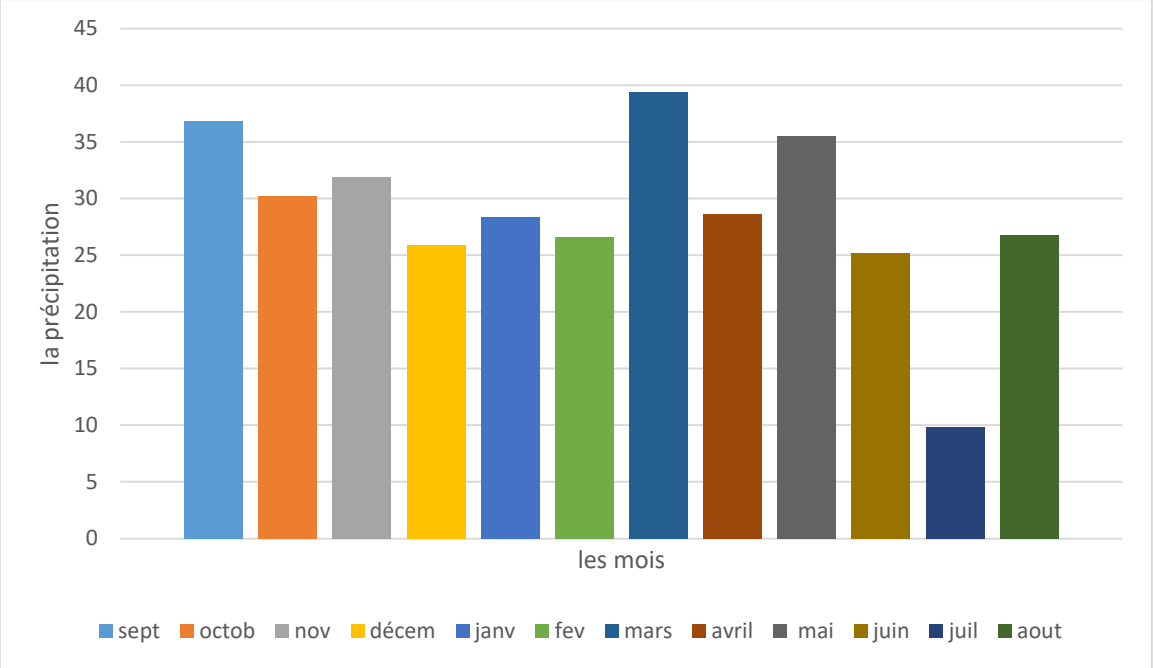


Figure 8: Évolution mensuelle des précipitations à Meskiana (1990/1991–2022/2023)

- Le graphique (figure III.09) illustre la répartition moyenne des précipitations par mois à Meskiana sur une période de plus de trois décennies. L'analyse de ces données met en évidence une **saisonnalité marquée** des précipitations, caractéristique des climats semi-arides.
- Les mois les plus arrosés sont **mars**, **septembre** et **mai**, avec des moyennes dépassant les 35 mm. Le mois de mars, en particulier, enregistre un pic notable avoisinant les 40 mm, ce qui reflète l'importance des précipitations printanières dans la recharge hydrique locale. De même, les mois de **novembre** et **mai** montrent également des valeurs élevées, suggérant une deuxième période humide en automne.
- En revanche, les **mois d'été**, notamment **juillet** et **juin**, se caractérisent par des niveaux de précipitations très faibles, avec un minimum enregistré en juillet (moins de 10 mm), ce qui confirme la prédominance d'une **saison sèche estivale**.

- Cette distribution inégale des précipitations à l'échelle mensuelle a des implications directes sur la gestion de l'eau, l'activité agricole et la recharge des nappes phréatiques. Elle met en évidence la nécessité d'adapter les pratiques d'irrigation et de stockage de l'eau en fonction des périodes les plus favorables en apports hydriques.

B. Évolution annuelle des précipitations à Meskiana (1990/1991–2022/2023) :

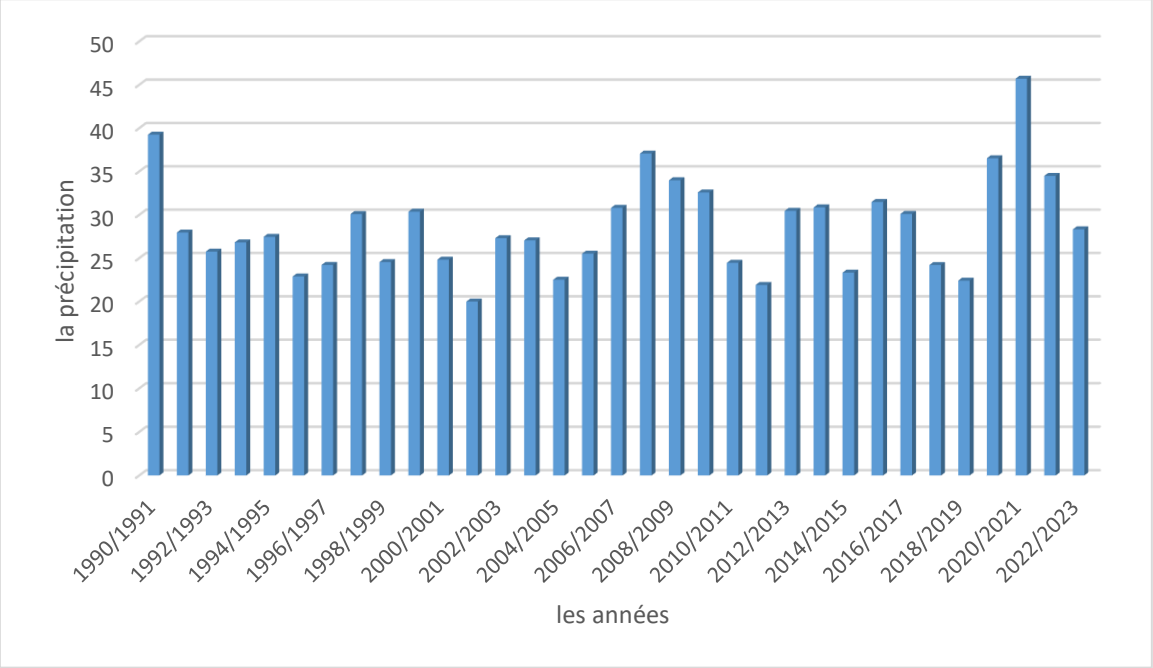


Figure 9: Évolution annuelle des précipitations à Meskiana (1990/1991–2022/2023)

- Le graphique (figure 8) illustre l'évolution annuelle des précipitations moyennes enregistrées dans la région de Meskiana entre 1990 et 2023. L'analyse quantitative et temporelle des données met en évidence une **variabilité importante des quantités de pluie** d'une année à l'autre, reflétant le caractère irrégulier du climat local, influencé par des facteurs naturels à l'échelle locale et régionale.
- Le maximum de précipitations est enregistré durant l'année 2020/2021 avec près de 45 mm, constituant un pic exceptionnel dans la série chronologique étudiée. D'autres années relativement humides, telles que 1990/1991 et 2007/2008, ont également été relevées. À l'inverse, des années comme 2012/2013 et 2018/2019 se distinguent par de faibles précipitations n'atteignant pas 25 mm,

indiquant des périodes de sécheresse marquée susceptibles d'impacter directement la recharge des nappes phréatiques ainsi que l'équilibre agro-écologique de la région.

C. Variations de la température moyenne mensuelle à Meskiana (1990/1991-2022/2023) :

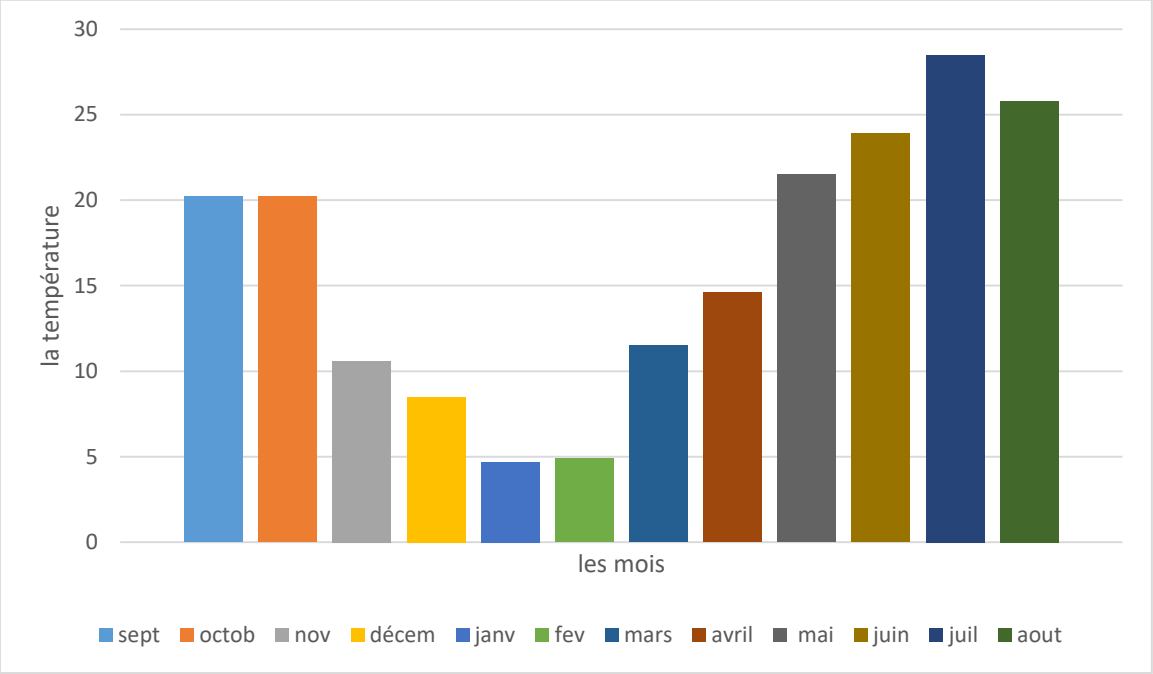


Figure 10: Variabilité de la température moyenne et des précipitations à Meskiana (1990/1991-2022/2023)

- Le graphique montre la variabilité mensuelle de la température moyenne à Meskiana sur la période 1990/1991–2022/2023. On observe une baisse progressive des températures de septembre à janvier, atteignant leur minimum en plein hiver (autour de 6–7 °C en janvier), puis une hausse continue jusqu'à un pic en juillet (environ 26 °C), suivi d'une légère baisse en août. Cette évolution reflète un climat de type semi-aride à saisonnalité marquée, avec des hivers froids et des étés chauds. Cette forte amplitude thermique entre les saisons a des implications importantes sur la demande en eau, la croissance des cultures et la dynamique des ressources hydriques souterraines dans la région.

D. Variations de la température moyenne annuelle à Meskiana (1990/1991-2022/2023) :

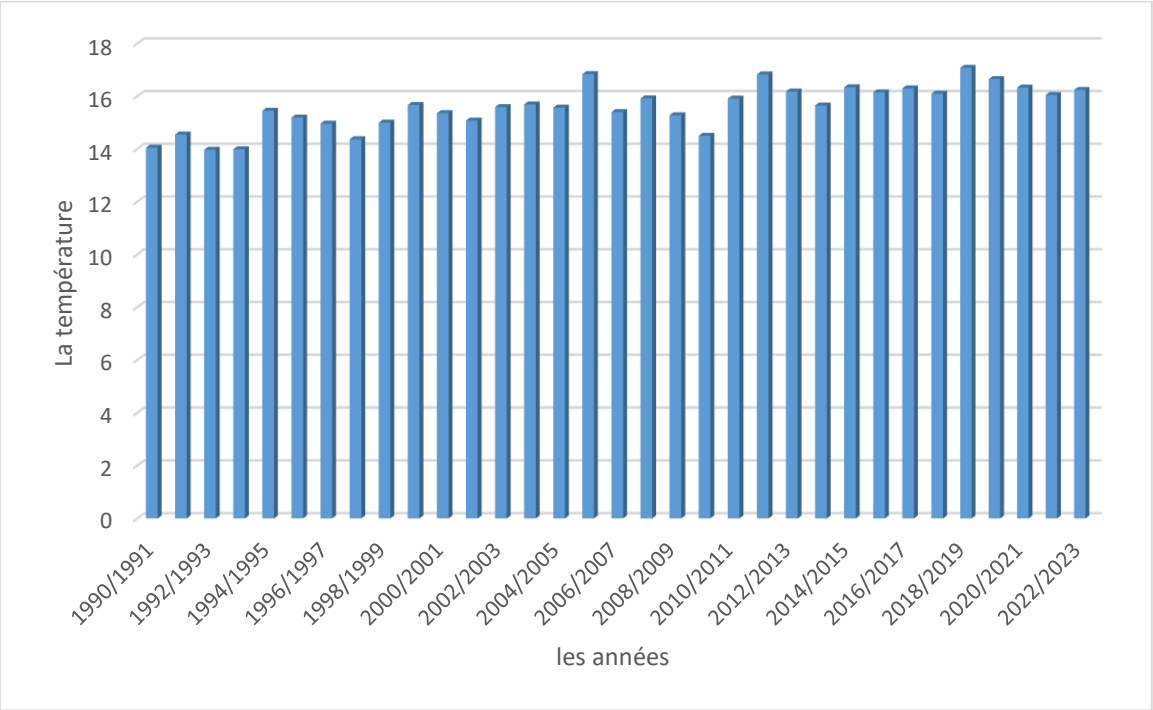
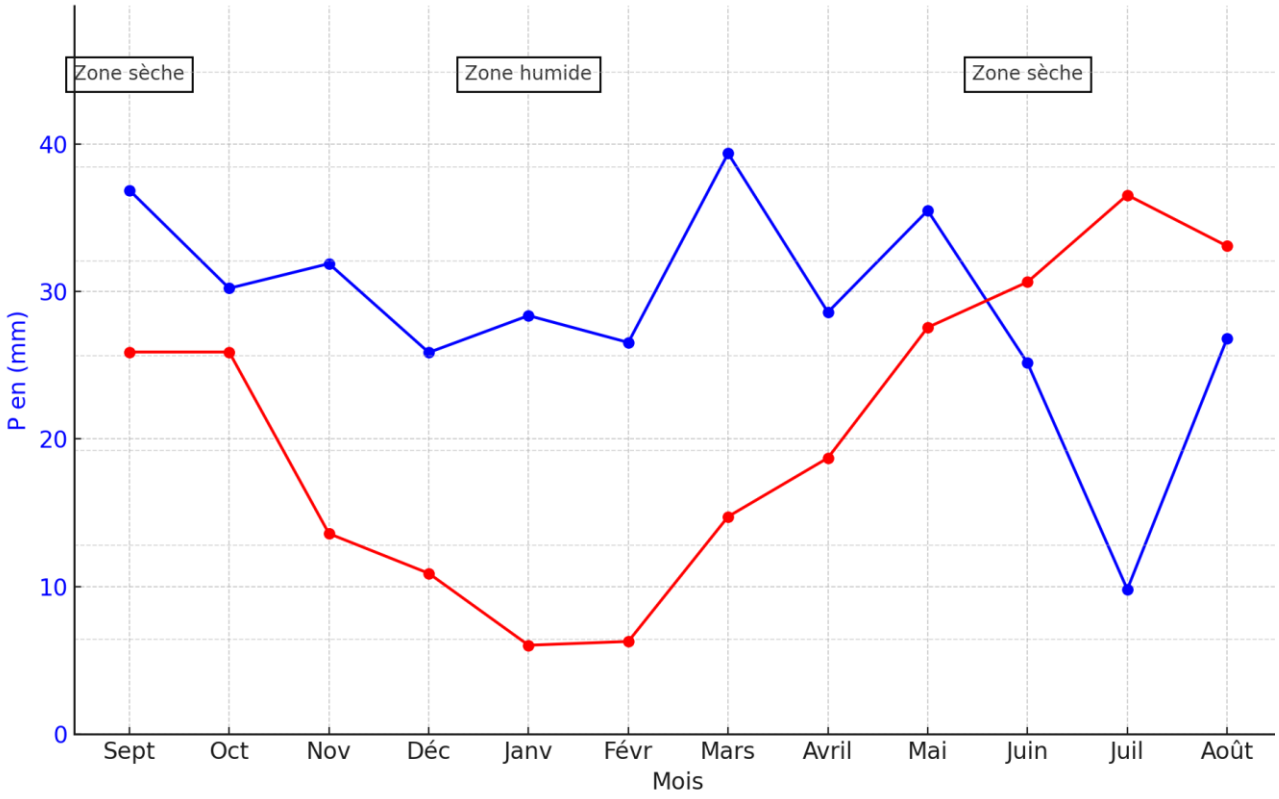


Figure 11: Variabilité de la température moyenne et des précipitations à Meskiana (1990/1991-2022/2023)

- Le graphique présenté illustre l'évolution de la température moyenne annuelle à Meskiana sur la période allant de 1990 à 2023. L'observation des données met en évidence une tendance générale à la hausse des températures au fil des années, traduisant des signes manifestes de changement climatique à l'échelle locale.
- Au début des années 1990, les températures moyennes annuelles oscillaient entre 14 et 15 °C. Cependant, une augmentation progressive est observée au cours des décennies suivantes, atteignant et dépassant les 16 à 17 °C dans certaines années comme 2006/2007, 2013/2014 et 2018/2019. Cette évolution témoigne d'un réchauffement climatique progressif, bien que ponctué de fluctuations interannuelles modérées.
- Cette élévation des températures annuelles pourrait entraîner une augmentation de l'évaporation, une intensification des périodes de sécheresse, ainsi qu'une pressionAccrue sur l'équilibre hydrologique régional. Elle a également des conséquences directes sur la gestion des ressources en eau, les pratiques agricoles et la durabilité des écosystèmes locaux. Face à cette dynamique, il devient indispensable d'adopter des stratégies d'adaptation adaptées aux nouvelles conditions climatiques.

VI. DIAGRAMME OMBROTHERMIQUE :

- Selon la définition proposée par Bagnouls et Gaussen (1953, 1957), un mois est considéré comme sec lorsque la pluviométrie mensuelle moyenne (exprimée en millimètres) est inférieure ou égale au double de la température moyenne mensuelle ($P \leq 2T°$). Sur cette base, la saison sèche se caractérise par une



- succession de plusieurs mois secs consécutifs. Le diagramme ombrothermique de Gaussen (figure 13) permet de distinguer clairement une saison humide s'étendant de novembre à mai, suivie d'une saison sèche allant de juin à octobre.

Figure 12: diagramme Ombrothermique de la station de Meskiana.

VII. **BILAN HYDROLOGIQUE :**

Tableau 4: Bilan hydrologique moyen (1990/1991-2022/2023) à la station de Meskiana, par la méthode de Thornthwaite

	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total
P(mm)	36.8	30.2	31.8	25.8	28.3	26.5	39.3	28.5	35.4	25.1	9.8	26.8	344.9
ETP(mm)	99.1	61.3	26.8	14.9	10.9	14.5	28.3	46	88.7	132	167	150	839.5
P-ETP	- 62.3	- 31.1	+ 05.0	+ 10.9	+ 17.4	+ 12.0	+ 11.0	- 17.5	- 53.3	-106.9	-157.2	-123.2	
RFU_{26}(mm)	00	00	5.0	15.09	26	26	26	8.5	00	00	00	00	
ETR(mm)	36.8	30.2	26.8	14.9	10.9	14.5	28.3	46	43.9	25.1	9.8	26.8	314
EX(mm)	00	00	00	00	07.3	12.0	11.0	00	00	00	00	00	30.3
DA(mm)	62.3	31.1	00	00	00	00	00	00	44.9	106.9	157.2	123.2	525.6

- P = ETR +EX P = 344,3
- ETP = ETR + Da
- ETP= 839,6

● **Interprétation du bilan hydrique :**

- Le rapport $\frac{ETR}{P}$
- = 0.91 mm
- Alors 88% des précipitations seront évaporées.
- Le rapport $\frac{Da}{P}$
- = 1.52 mm
- Alors le déficit agricole égal 62% des précipitations.
- Le rapport $\frac{ETR}{ETP}$
- = 0.37 mm

- Alors les réserves d'eau insuffisante que 61% de la demande en eau (évapotranspiration potentielle).
- ϖ Les 3 mois sur 12 mois sont excédentaires
- ϖ Les 9 mois sur 12 sont déficitaires
-

• Calcul du ruissellement :

- L'application de la formule de Tixeron-Berkaloff pour une année moyenne donne le Résultat suivant :
- $R=\frac{P^3}{3ETP^2}$
- **R** : Ruissellement (m).
- **P** : Précipitations moyennes mensuelles (m).
- **ETP** : Evapotranspiration potentielle (m).
- L'application numérique donne : **R** = 19,40 mm
- L'infiltration (I):
- I=EX-R
- I= 30, 3-19.40
- I=10, 9

VIII. CONCLUSION :

- En se basant sur les données climatiques et hydrologiques relatives à la plaine de Meskiana, il ressort que la région est soumise à un climat méditerranéen de type semi-aride, marqué par une forte variabilité saisonnière. Les précipitations hivernales limitées, combinées à des températures estivales élevées, influencent directement la disponibilité et la dynamique des ressources en eau, qu'elles soient superficielles ou souterraines.
- Les résultats de l'étude montrent qu'une grande partie des précipitations est évaporée ou transpirée par la végétation, réduisant ainsi la part d'eau pouvant être stockée ou exploitée, que ce soit par ruissellement ou infiltration. La faible contribution du ruissellement et la faible efficacité de l'infiltration confirment la limitation de la recharge directe des nappes, suggérant que l'alimentation principale provient plutôt des affleurements calcaires fissurés entourant la plaine.
- Ainsi, une gestion durable des ressources hydriques dans la plaine de Meskiana nécessite une compréhension approfondie des facteurs climatiques et géographiques qui influencent le cycle de l'eau. Elle requiert également le renforcement des dispositifs de suivi sur le terrain afin de mieux

évaluer le bilan hydrique et d'optimiser l'exploitation d'une ressource précieuse, mais vulnérable, dans un contexte de pression croissante sur l'eau.

CHAPITRE IV : HYDROGEOLOGIE

I. INTRODUCTION :

- L'hydrogéologie constitue un outil fondamental pour l'analyse et la compréhension des différents facteurs permettant de définir les caractéristiques d'un aquifère. Dans ce cadre, ce chapitre vise à identifier et à délimiter le système aquifère formé par les dépôts alluviaux qui remplissent le bassin.
- L'étude porte principalement sur le comportement de la nappe alluviale de Meskiana, en analysant l'impact des variations climatiques au cours du temps, ainsi que celui des hétérogénéités lithologiques dans l'espace, sur la dynamique hydrodynamique de la nappe.
- Dans un premier temps, l'accent est mis sur la détermination de la direction générale de l'écoulement de la nappe, ainsi que sur l'analyse du mécanisme d'évolution du niveau piézométrique, aussi bien dans le temps que dans l'espace.

II. GEOMETRIE DE L'AQUIFERE :

- L'analyse des données géophysiques (CGG, 1974) a permis de caractériser la répartition des matériaux constituant le remplissage alluvial de la nappe de Meskiana. Il en ressort que la région de Dalâa constitue une véritable dépression alluviale, où l'épaisseur des dépôts peut atteindre jusqu'à 155 mètres. En revanche, dans la zone de Zebar, située entre Dalâa et Meskiana, l'épaisseur du remplissage alluvial ne dépasse pas 100 mètres. Il convient de noter que l'ensemble de ces dépôts repose sur un substratum marneux, qui affleure au nord de la plaine.

III. ETUDES PIEZOMETRIQUES :

- La surface piézométrique des nappes est déterminée par les caractéristiques de leur écoulement, lesquelles, dans les conditions naturelles de gisement des eaux souterraines, dépendent d'un ensemble de facteurs. Parmi ces facteurs, on distingue :

- Les conditions géomorphologiques et structurales à l'échelle régionale ;
- Le niveau et la pression piézométrique ;
- Le type de nappe (libre, captive, etc.) et son profil de dépression ;
- Les propriétés de l'aquifère, telles que la lithologie, la perméabilité, la section de l'aquifère et la nature du substratum ;
- Les modalités d'alimentation et de drainage de la nappe.

- Les cartes en courbes isopièzes jouent un rôle essentiel dans l'analyse hydrogéologique, en permettant notamment :
- Le calcul de la profondeur de la surface piézométrique ;
- Le tracé des lignes de courant afin de déterminer la direction de l'écoulement ainsi que les zones d'alimentation ;
- L'évaluation du gradient hydraulique.

A. Piézométrie :

- Les cartes piézométriques, élaborées à partir des mesures des niveaux piézométriques, illustrent la répartition spatiale des charges et des potentiels hydrauliques à un instant donné. Elles constituent un outil fondamental pour l'analyse et la modélisation des fonctions capacitives et conductrices du réservoir, ainsi que pour l'interprétation du comportement hydrodynamique de l'aquifère. Il s'agit de la synthèse la plus significative dans toute étude hydrogéologique.

B. Interprétation des cartes piézométriques :

1. Carte de mars 2022 :

- La carte piézométrique de la nappe phréatique de Meskiana pour le mois de mars 2022 constitue un outil fondamental pour l'analyse de la dynamique des eaux souterraines dans la région. Elle met en évidence les lignes isopièzes ainsi que la direction générale de l'écoulement, orientée vers le sud-est, suggérant ainsi des zones de recharge au nord-ouest et de décharge au sud-est. Le resserrement des lignes piézométriques indique un gradient hydraulique marqué, possiblement lié à une exploitation intensive des ressources ou à des structures géologiques telles que des failles ou des discontinuités. La carte révèle également une hétérogénéité dans la couverture de surface, reflétant probablement des variations de perméabilité influençant le mouvement de l'eau souterraine. En somme, cette carte constitue une base scientifique essentielle pour le suivi du comportement de la nappe et pour l'élaboration de stratégies de gestion durable de la ressource en eau dans la région.

2. Carte de juillet 2022 :

- La carte piézométrique de la nappe de Meskiana pour le mois de juillet 2022 met en évidence une configuration hydrodynamique globalement similaire à celle observée en mars de la même année, avec un écoulement principal orienté du nord-ouest vers le sud-est, comme en témoignent les flèches bleues indiquant la direction de l'écoulement souterrain. Toutefois, l'absence de lignes isopièzes sur cette carte rend difficile l'évaluation précise du gradient hydraulique et des variations de charge piézométrique. On note également la répartition des points de mesure (en rouge) qui restent concentrés dans la partie centrale de la nappe, suggérant une surveillance constante de cette zone stratégique. Le contexte géologique représenté par des textures et couleurs variées reste inchangé, indiquant que les conditions structurales et lithologiques n'ont pas subi de modifications notables entre mars et juillet. Ainsi, bien que cette carte fournisse des informations sur la direction d'écoulement et la distribution des unités géologiques, l'absence de courbes piézométriques empêche toute analyse fine des fluctuations saisonnières du niveau de la nappe, ce qui limite l'interprétation hydrogéologique complète de la situation estivale.

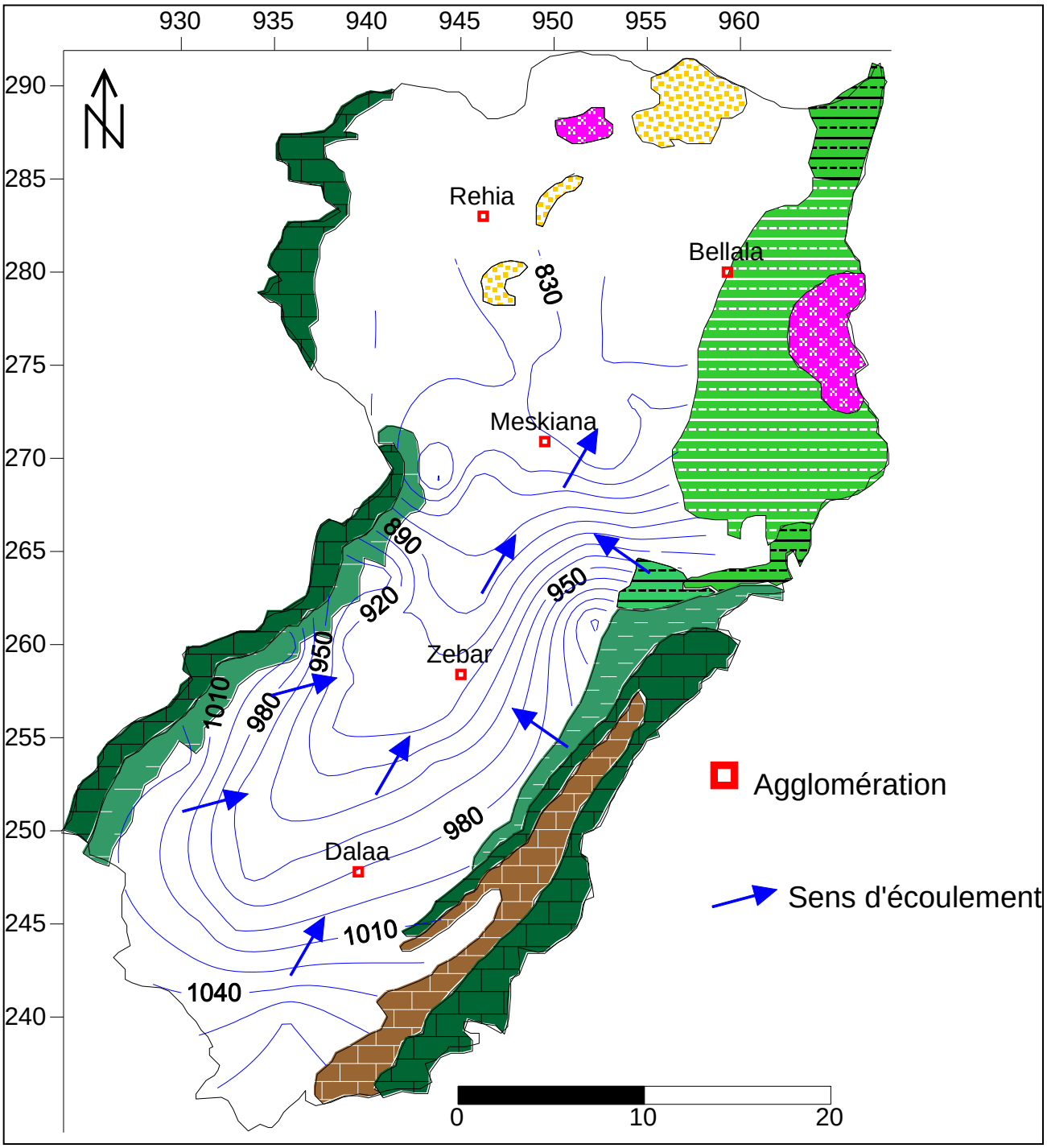


Figure 13: Carte piézométrique de la nappe de Meskiana mars 2022.

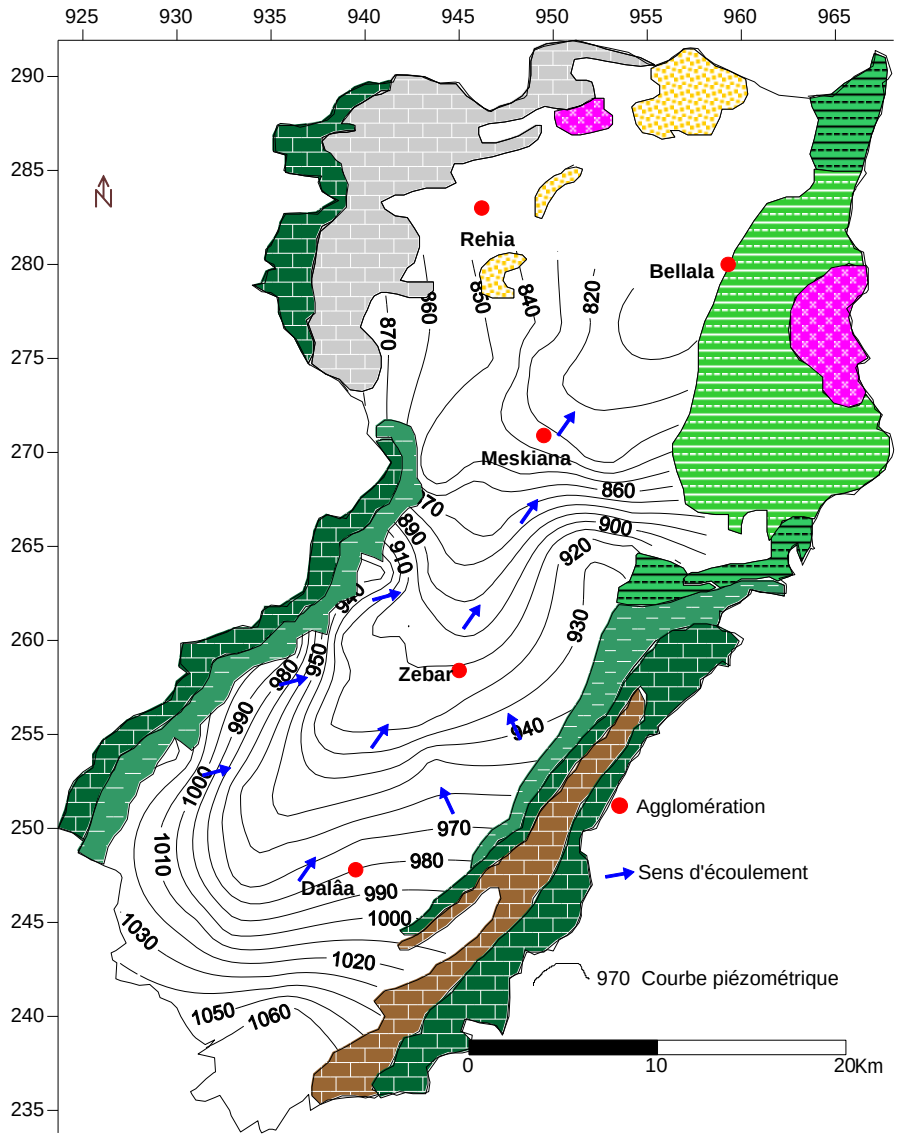


Figure 14: Carte piézométrique de la nappe de Meskiana, juillet 2022.

IV. ALIMENTATION ET RECHARGE DE LA NAPPE :

- La nappe alluviale de Meskiana est principalement alimentée par les eaux météoriques de type vadose, qui s'infiltrent à travers l'ensemble de l'impluvium. Une contribution supplémentaire importante à la recharge provient de l'écoulement de l'Oued Meskiana, dont les eaux s'infiltrent principalement au niveau des cônes de déjection durant les périodes de hautes eaux. Cette infiltration est facilitée par la forte perméabilité des formations alluviales, constituées majoritairement d'éléments grossiers issus de ces cônes (Mémoire de Omar, 2015).
- Dans la partie centrale de la plaine, les dépôts deviennent progressivement plus fins et riches en argile, ce qui se manifeste par une réduction notable du gradient hydraulique entre l'amont et l'aval.

- Une alimentation latérale est également observée à partir des affleurements calcaires, en particulier dans la zone d'Ain Dalla, où les courbes isopièzes présentent une orientation subparallèle aux formations affleurantes. La source d'Ain Dalla, émergeant de ces mêmes formations calcaires, constitue ainsi un apport significatif à la recharge de la nappe.
- En revanche, dans la région nord-est, les isopièzes sont orientées de manière sub-perpendiculaire aux affleurements, indiquant une absence d'alimentation à partir de ces derniers.
- Ainsi, les zones situées en amont de la plaine de Meskiana apparaissent comme les secteurs préférentiels de recharge de la nappe.

V. LES CONDITIONS AUX LIMITES :

- Afin de mieux comprendre le fonctionnement hydraulique de la nappe, une carte des conditions aux limites de la nappe aquifère de Meskiana a été réalisée (figure 15). Cette carte a été établie en prenant en compte les caractéristiques lithologiques des formations géologiques, leurs propriétés géophysiques ainsi que les mesures piézométriques.
- La limite orientale, constituée principalement de calcaires fracturés du Maestrichtien dans la région de Dj Guerigueur, représente une zone perméable, alimentant latéralement la nappe alluviale. De même, la limite occidentale de Dj Bou Tokhma et Dj Guern Ahmar, formée de calcaires perméables également du Maestrichtien, constitue une frontière avec un flux entrant. En revanche, les marnes cénomaniennes, qui affleurent au nord-est de la plaine, forment une barrière étanche.
- Le substrat imperméable est constitué des marnes et argiles Emscheriennes, empêchant ainsi l'infiltration des eaux en profondeur. Ces eaux s'écoulent gravitairement vers les
- Zones plus basses. Dans la partie nord, ce substrat imperméable refait surface, rendant la majeure partie de cette zone imperméable, avec une zone centrale où l'eau s'écoule en flux imposé sortant.
- L'Oued Meskiana, quant à lui, draine la nappe alluviale en période de basses eaux, tout en étant capable de l'alimenter pendant les hautes eaux. Il représente ainsi une limite à potentiel imposé. Par ailleurs, les précipitations efficaces dans la région sont quasiment nulles, comme l'a montré l'analyse du bilan hydrologique.

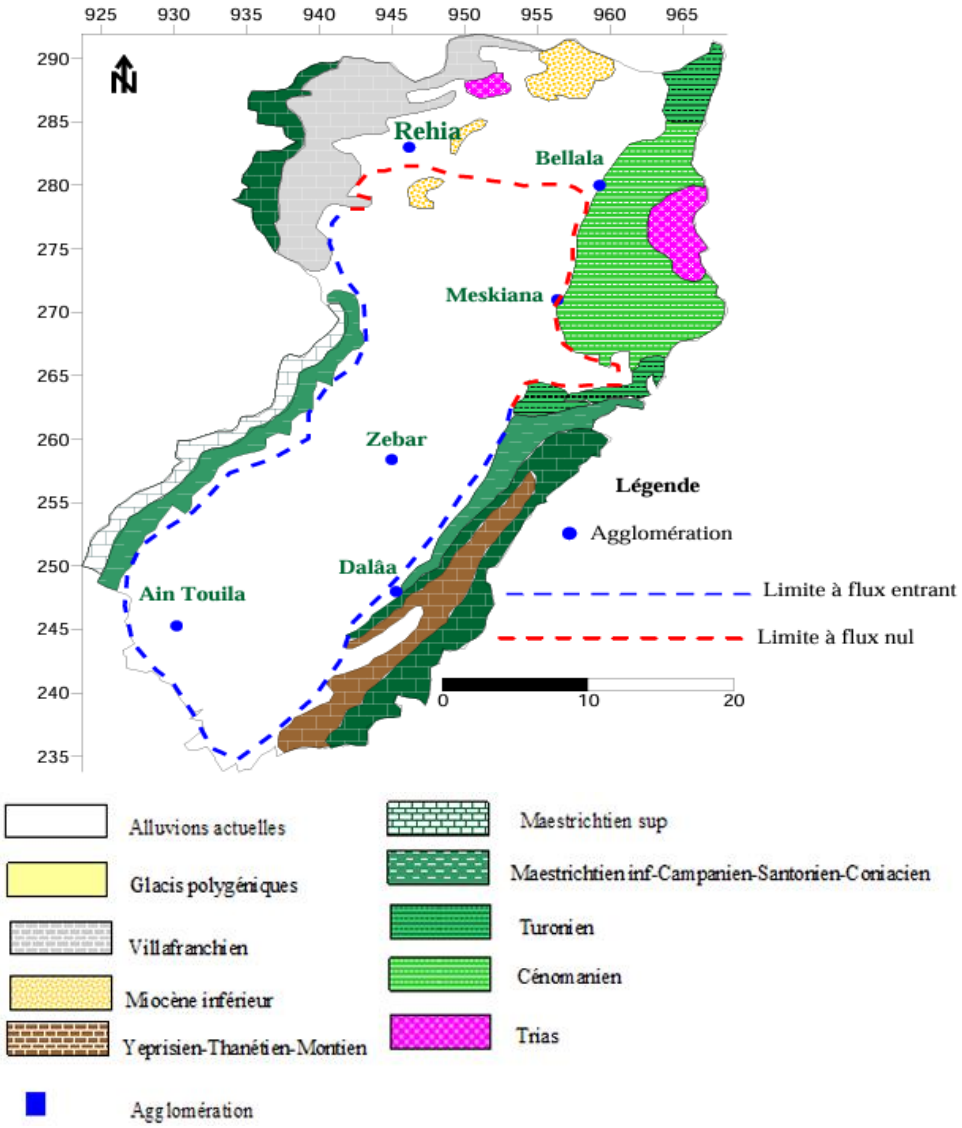


Figure 15: Carte des conditions aux limites dans la nappe de Meskiana, Mars (Gouaidia 2008)

VI. **CONCLUSION :**

- L’étude de la piézométrie révèle que l’écoulement général de la nappe de Meskiana présente des vitesses variables selon les zones. Il est relativement rapide en amont, où le gradient hydraulique est élevé, puis ralentit dans la zone centrale, avant de s’intensifier de nouveau en aval.
- L’analyse piézométrique a également permis d’identifier les principales zones d’alimentation de la nappe. Cette recharge peut s’effectuer:

- Par infiltration des eaux météoriques, lorsque la granulométrie des formations alluviales en surface le permet ;
- Par infiltration des eaux de ruissellement de l’Oued Meskiana, notamment au niveau des cônes de déjection ;
- Par apport en provenance des affleurements calcaires, sous forme d’alimentation latérale ou ascendante, particulièrement marquée dans la zone sud-est.

CHAPITRE V : HYDROGCHIMIE

1 INTRODUCTION :

- L'analyse hydro chimique représente une étape fondamentale pour évaluer les potentialités d'utilisation des eaux dans divers domaines.

  Il est bien établi que la composition chimique des eaux souterraines dépend principalement de la nature lithologique des formations géologiques traversées, ainsi que du temps de résidence des eaux dans le sous-sol. Cette interaction entre l'eau et les roches influence significativement la concentration des éléments majeurs tels que : Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}, Cl^{-}, SO_4^{2-} et HCO_3^{-}.
- Les concentrations de ces éléments naturels sont régies par plusieurs facteurs, notamment :
- les conditions climatiques,
- l'impact des activités anthropiques,
- les échanges entre aquifères,
- et les interactions avec les eaux de surface.
- Parmi ces facteurs, les activités humaines jouent un rôle non négligeable dans la modification de la qualité physico-chimique des eaux souterraines. Deux sources principales d'influence peuvent être distinguées:
- **Les pratiques agricoles**, qui contribuent à l'enrichissement des eaux en K^{+}, Ca^{2+}, NO_3^{-}, SO_4^{2-}, NH_4^{+} et PO_4^{3-} ;
- **Les rejets d'eaux usées**, responsables d'apports en Na^{+}, K^{+}, NO_3^{-}, Cl^{-} ainsi que certains métaux lourds.
- Dans le cadre de ce travail, une étude hydro chimique approfondie a été réalisée , en utilisant lesanalyses chimiques du doctorant Bahloul Issam, sur un total de 39 puits répartis dans la plaine de Meskiana. Cette campagne d'échantillonnage a permis de mesurer divers paramètres **physico-chimiques, notamment le pH, la conductivité électrique** (CE), ainsi que les concentrations en principaux ions dissous (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}, Cl^{-}, SO_4^{2-}, HCO_3^{-}, NO_3^{-}). L'interprétation de ces données permet d'identifier les faciès chimiques dominants, de détecter d'éventuelles anomalies, et surtout d'évaluer l'aptitude des eaux à l'irrigation à l'aide de diagrammes et de critères agronomiques tels que ceux de Wilcox et autre diagrammes.
- Cette analyse vise à contribuer à une meilleure gestion des ressources en eau souterraine de la région, en fournissant des bases scientifiques solides pour orienter les pratiques agricoles vers une utilisation rationnelle et durable de l'eau.

II. CYCLE DE L'EAU ET MINERALISATION :

- Le cycle hydrologique désigne l'ensemble des phénomènes par lesquels l'eau traverse différentes étapes depuis son état gazeux sous forme de vapeur dans l'atmosphère, jusqu'à son retour à ce même état, en passant par les états liquide et solide sous forme de précipitations. L'eau se déplace alors à la surface ou sous terre, finissant son parcours dans les océans, avant de regagner l'atmosphère sous forme de vapeur à travers les processus d'évaporation et de transpiration.
- Au cours de ce cycle, l'eau interagit avec les différents réservoirs géologiques, biologiques et atmosphériques, ce qui influence sa minéralisation. Ce processus naturel est également modifié par les activités humaines, dont les impacts se font sentir sur la qualité de l'eau tout au long de son parcours.

A. Minéralisation :

- La minéralisation représente un paramètre physique essentiel permettant d'évaluer la teneur de l'eau en sels minéraux dissous ainsi qu'en matières en suspension, qu'elles soient d'origine organique ou minérale. Elle s'exprime généralement en milligrammes par litre (mg/l).
- Les valeurs les plus faibles ont été enregistrées au niveau du puits P1, situé à l'amont de la nappe, avec une concentration de 483 mg/l. En revanche, les concentrations les plus élevées sont observées à l'aval, notamment au niveau du puits P38, où la minéralisation atteint 3372 mg/l.
- Il convient de souligner l'existence d'une forte corrélation entre la minéralisation et la conductivité électrique, avec un coefficient de corrélation R = 0,91, ce qui confirme que l'augmentation de la teneur en ions dissous se traduit par une élévation de la conductivité de l'eau.

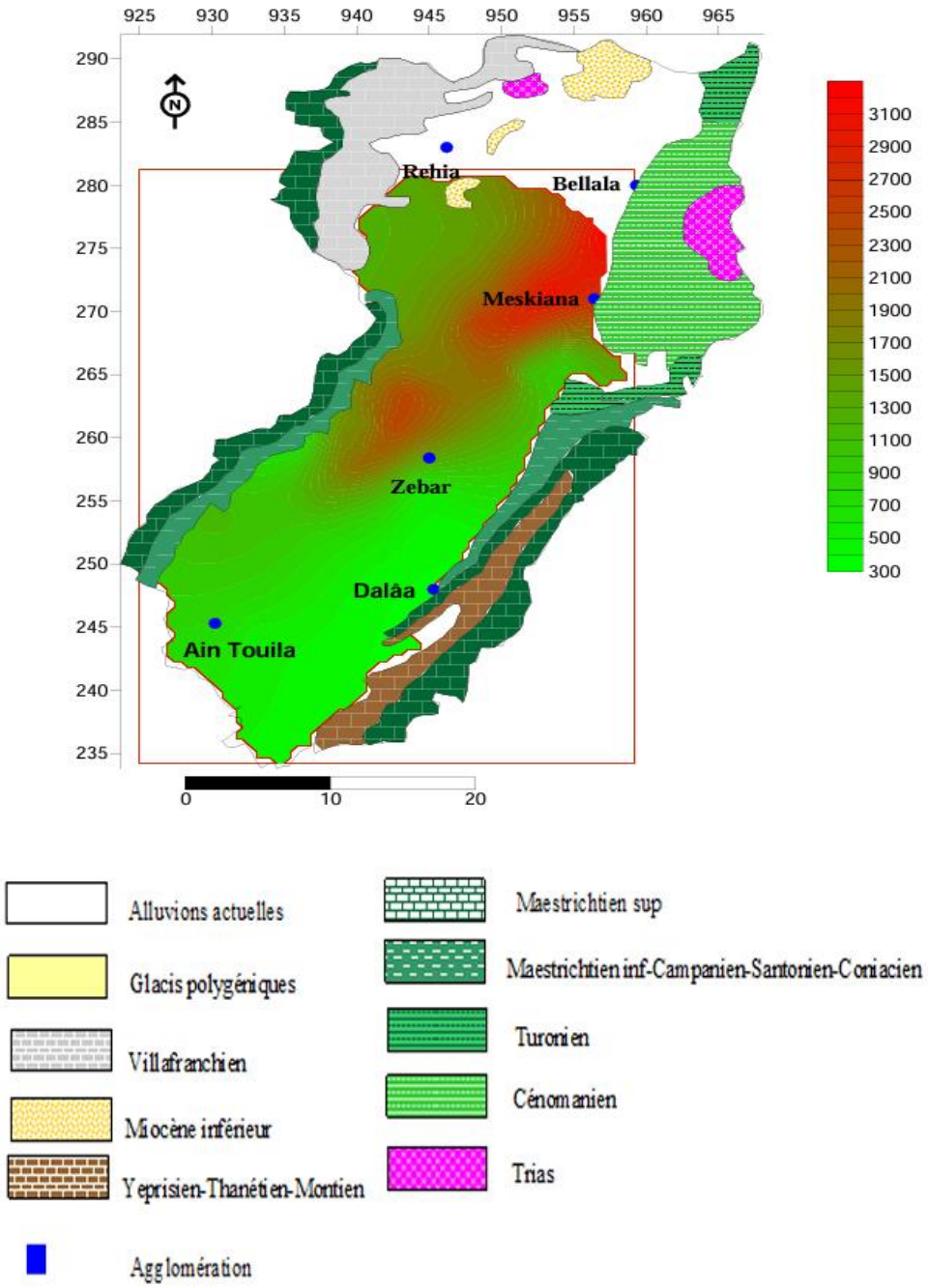


Figure 16: Carte de la minéralisation dans la nappe de Meskiana, mars 2022

III. DESCRIPTION SOMMAIRE DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES :

A. Les résultats d'analyse physico-chimique des eaux de la nappe de Meskiana, pendant la période d'observation, ont été consignés dans le tableau 05 :

Tableau 5: Variation des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines (mars, juillet 2022)

		Période des hautes eaux				Période des basse eaux			
Eléments	**Norme OMS**	**Max**	**Min**	**Moy**	**Ecart-type**	**Max**	**Min**	**Moy**	**Ecart-type**
HCO_3^-(mg/l)	250	248	102	183,56	40,51	231	95	171.64	37,99
SO_4^{2-}(mg/l)	250	1091	78	462,02	272.28	1135	96	484,12	275,84
CL^-(mg/l)	250	925	47	438,66	260,53	947	54	460,79	262,48
Ca^{2+}(mg/l)	100	797	85	265,30	154,56	823	72	284,02	160,24
Mg^{2+}(Mg/l)	50	67	12	33,15	18,33	61	9	28,10	16,11
Na^+(mg/l)	150	409	25	230,51	116	506	37	254	127,34
K^+(mg/l)	12	17	7	11,82	3,02	19	9	13,94	2,87
Cond ($\mu S.cm^{-1}$)	2500	4995	868	2559,69	1133,52	5190	870	2670,84	1164,61

IV. REPRESENTATION GRAPHIQUE DES FACIES HYDROCHIMIQUES :

Afin de caractériser de manière précise les faciès hydrochimiques et d'évaluer la qualité des eaux souterraines, l'utilisation de représentations graphiques des résultats d'analyses s'avère indispensable. Dans cette optique, les diagrammes de Piper et de Schoeller-Berkaloff ont été mobilisés. Leur élaboration a été réalisée à l'aide du logiciel **Diagrammes**, développé en 2004 par Roland Simler au sein du Laboratoire d'Hydrogéologie de l'Université d'Avignon.

A. Diagramme de PIPER

- Le diagramme de Piper constitue un outil graphique permettant la représentation simultanée de plusieurs échantillons d'eau. Il se compose de deux triangles distincts : l'un dédié aux cations, l'autre aux anions, ainsi que d'un losange central qui synthétise la composition chimique globale de l'eau.
- La concentration des nuages de points dans certaines zones du diagramme traduit la prédominance de certains types d'ions (cationiques et anioniques) dans les différents échantillons analysés.
- Ce diagramme s'avère particulièrement pertinent pour l'analyse de l'évolution des faciès hydrochimiques en fonction de la minéralisation croissante des eaux, ou pour comparer différents groupes d'échantillons entre eux, en identifiant les ions majoritaires.
- L'interprétation des résultats des analyses hydrochimiques effectuées au cours des différentes périodes d'observation a permis de caractériser les faciès chimiques des eaux souterraines de la nappe alluviale de Meskiana, de suivre leur évolution temporelle, et de mieux comprendre les conditions naturelles qui président à la formation de ces faciès.

1. Période de mars 2022 :

- D'après le diagramme de Piper de la région de Meskiana (mars 2022), on observe que, dans la zone amont de la nappe, les nuages de points ne présentent pas une dominance claire en cations ou en anions. Toutefois, un faciès chloruré-calcique relativement dominant est identifié, accompagné par un faible pourcentage (environ 15 %) de faciès bicarbonaté-calcique, attribuable à l'alimentation latérale de la nappe. La présence de certains cations sodiques s'explique par la nature marneuse et gypsifère du substratum, constitué de formations émschériennes. À ce niveau, les ions n'ont pas encore atteint un état de stabilité chimique, en raison des conditions hydrodynamiques particulières, ce qui favorise leur concentration progressive.
- En aval, la situation est différente : les anions chlorures et sulfates deviennent majoritaires, tandis que les cations calciques dominent dans tous les échantillons, suivis par les cations sodiques. Cela met en évidence trois faciès hydrochimiques principaux : chloruré-calcique, chloruré-sodique et sulfaté-calcique, avec une absence du faciès bicarbonaté-calcique. Le diagramme global confirme cette répartition des faciès. Les conditions climatiques

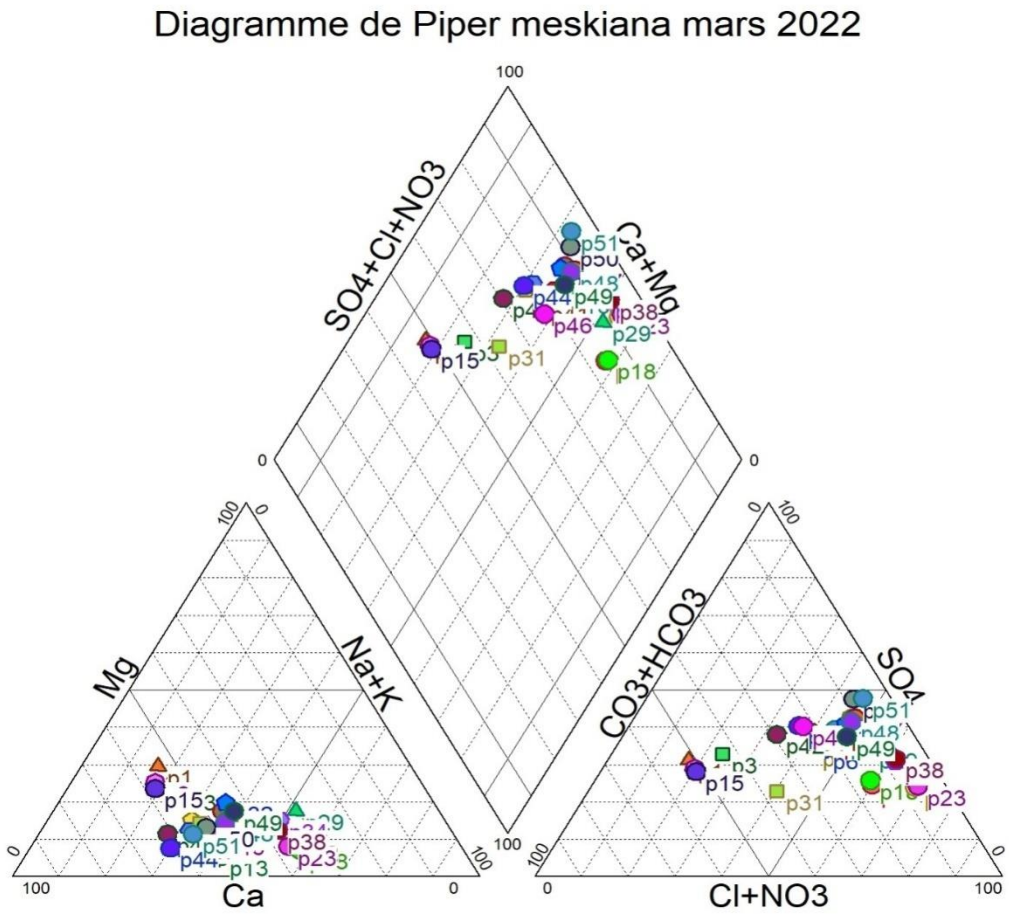
(précipitations), la lithologie traversée, ainsi que la dynamique d'écoulement de la nappe ont favorisé le lessivage des couches géologiques, ce qui explique l'apparition de ces types d'eaux.

2 : Période de juillet 2022 :

- Selon le diagramme de Piper de la région de Meskiana (juillet 2022), les résultats montrent qu'en amont de la nappe, la répartition des ions ne met pas en évidence une domination marquée des cations ou des anions. Néanmoins, un faciès chloruré-calcique reste globalement prédominant, tandis qu'un pourcentage réduit d'échantillons présente un faciès bicarbonaté-calcique, résultat probable d'une alimentation latérale de la nappe. La présence de cations sodiques dans certains points d'eau peut être attribuée à la composition géologique du substratum, formé essentiellement de marnes gypseuses d'âge émschérien.à ce stade, les ions semblent ne pas encore avoir atteint un équilibre chimique stable, en raison des conditions hydrodynamiques locales, ce qui favorise leur concentration progressive.en aval, le comportement hydrochimique évolue : les anions sulfates et chlorures deviennent dominants, alors que les cations calciques restent largement présents dans l'ensemble des échantillons, accompagnés des cations sodiques. Ce constat met en évidence trois types de faciès : chloruré-calcique, sulfaté-calcique et chloruré-sodique, avec une absence totale du faciès bicarbonaté-calcique.

- Ainsi, les conditions climatiques, la nature lithologique du terrain et la dynamique d'écoulement de la nappe ont favorisé le lessivage des formations traversées, conduisant à la mise en place de ces faciès hydrochimiques caractéristiques.

Figure 17: Diagramme de Piper, nappe de Meskiana, mars 2022



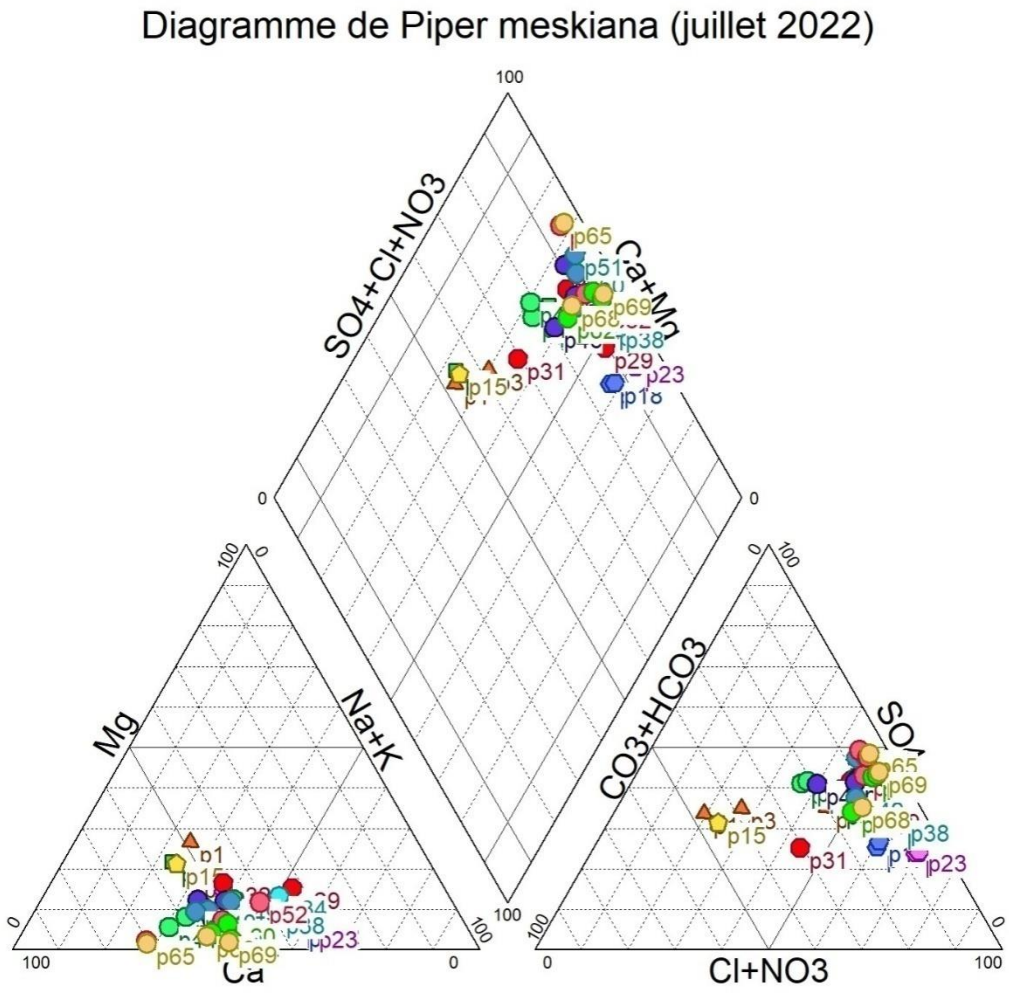


Figure 18: Diagramme de Piper, nappe de Meskiana, juillet 2022

B. Diagramme de SHOLLER

- Le diagramme de Schoeler- Berkaloff permet de représenter le faciès chimique de plusieurs échantillons d'eaux. Chaque échantillon est représenté par une ligne brisée. La concentration de chaque élément chimique est figurée par une ligne verticale en échelle logarithmique. La ligne brisée est formée en reliant tous les points qui représentent les différents éléments chimiques. Un groupe d'eau de minéralisation variable mais dont les proportions sont les mêmes pour les éléments dissous, donnera une famille de lignes brisées parallèles entre elles. Lorsque les lignes se croisent, un changement de faciès chimique est mis en évidence.

1. Période de mars 2022 :

- Le diagramme de Schoeller-Berkaloff pour le site de Meskiana (mars 2022) illustre les caractéristiques hydrochimiques des eaux souterraines à travers l'analyse de plusieurs échantillons. La majorité des courbes montre une dominance nette du calcium (Ca^{2+}), ce qui reflète un faciès calcique prédominant. Les concentrations en magnésium (Mg^{2+}) sont relativement faibles, renforçant cette tendance calcique. On observe également des teneurs variables mais parfois significatives en sodium et potassium (Na^{+} + K^{+}), traduisant possiblement une influence des formations évaporitiques ou des activités anthropiques.
- Du côté des anions, les concentrations en chlorures (Cl^{-}) et en sulfates (SO_4^{2-}) sont généralement élevées, mettant en évidence un double faciès chloruré-calcique et sulfaté-calcique. À l'inverse, les teneurs en bicarbonates (HCO_3^{-} + CO_3^{2-}) restent modestes, ce qui confirme l'absence globale d'un faciès bicarbonaté-calcique dans la zone. Enfin, les nitrates (NO_3^{-}) affichent des niveaux variables entre les puits, pouvant signaler une contamination diffuse liée aux pratiques agricoles.
- Ainsi, le diagramme met en évidence une diversité chimique des eaux souterraines avec des tendances dominantes bien marquées, reflétant à la fois l'influence du contexte géologique, des apports latéraux et des conditions hydrodynamiques locales

2. Période de juillet 2022 :

- L'interprétation des résultats chimiques des eaux souterraines de la région de Meskiana (juillet 2022) met en évidence la dominance du faciès chloruré calcique, résultant des fortes concentrations en ions Cl^{-} et Ca^{2+} observées dans la majorité des échantillons. Ce faciès est

suivi par les faciès sulfaté calcique et chloruré sodique, traduisant une minéralisation avancée, notamment dans les zones de drainage. Le faciès bicarbonaté calcique, quant à lui, n'apparaît que dans les zones amont de la nappe, où les formations calcaires périphériques alimentent les eaux souterraines. Toutefois, ce faciès reste spatialement limité en raison de la faible teneur en bicarbonates, comme l'indiquent les données du diagramme. Dans les zones centrales et nord de la nappe, la faible profondeur de la surface piézométrique favorise l'évaporation, tandis que la lenteur de l'écoulement permet une interaction prolongée entre les eaux et les formations aquifères. Ces conditions hydrogéologiques particulières entraînent une augmentation notable des concentrations ioniques par rapport aux zones amont. Ainsi, l'évolution spatiale des faciès chimiques reflète l'influence conjointe du contexte géologique et des processus hydrodynamiques, traduisant une dégradation progressive de la qualité des eaux souterraines le long de la nappe.

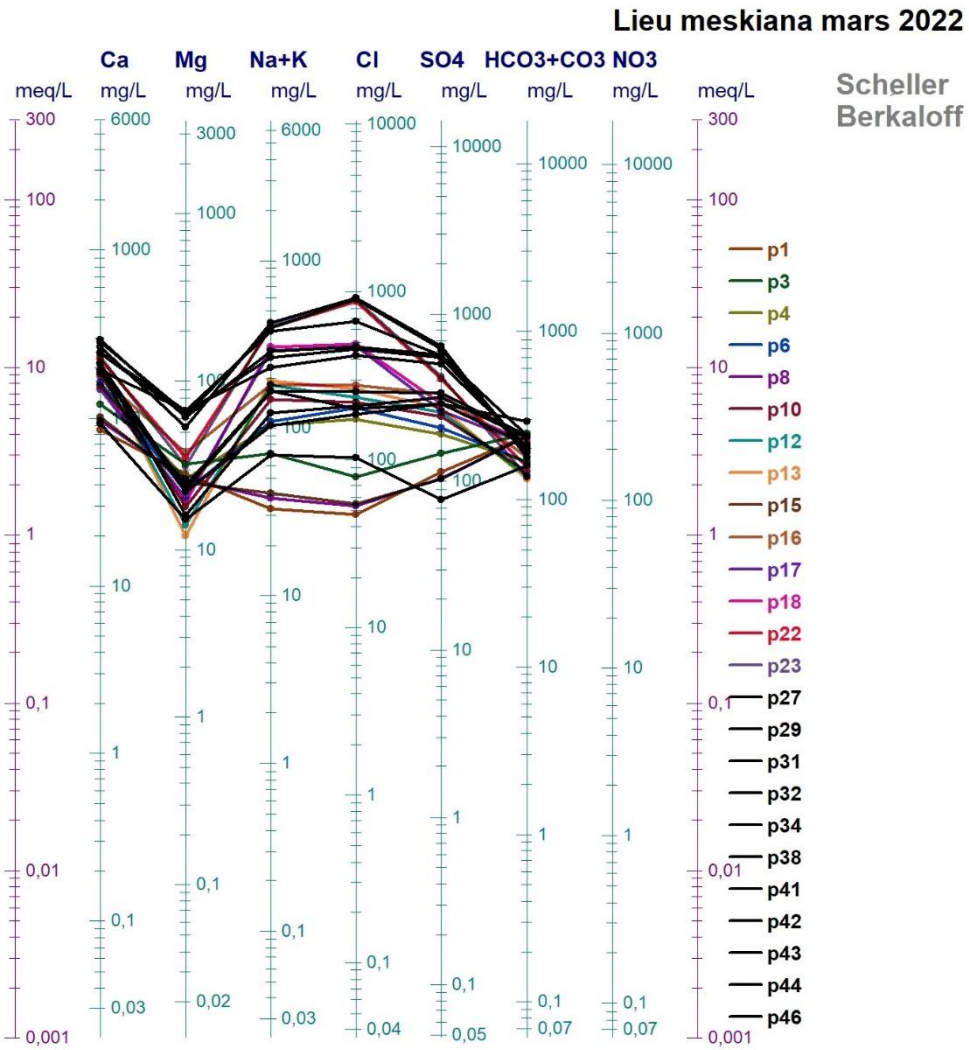


Figure 19: Diagramme de Scheller des eaux souterraines nappe de Meskiana mars 2022

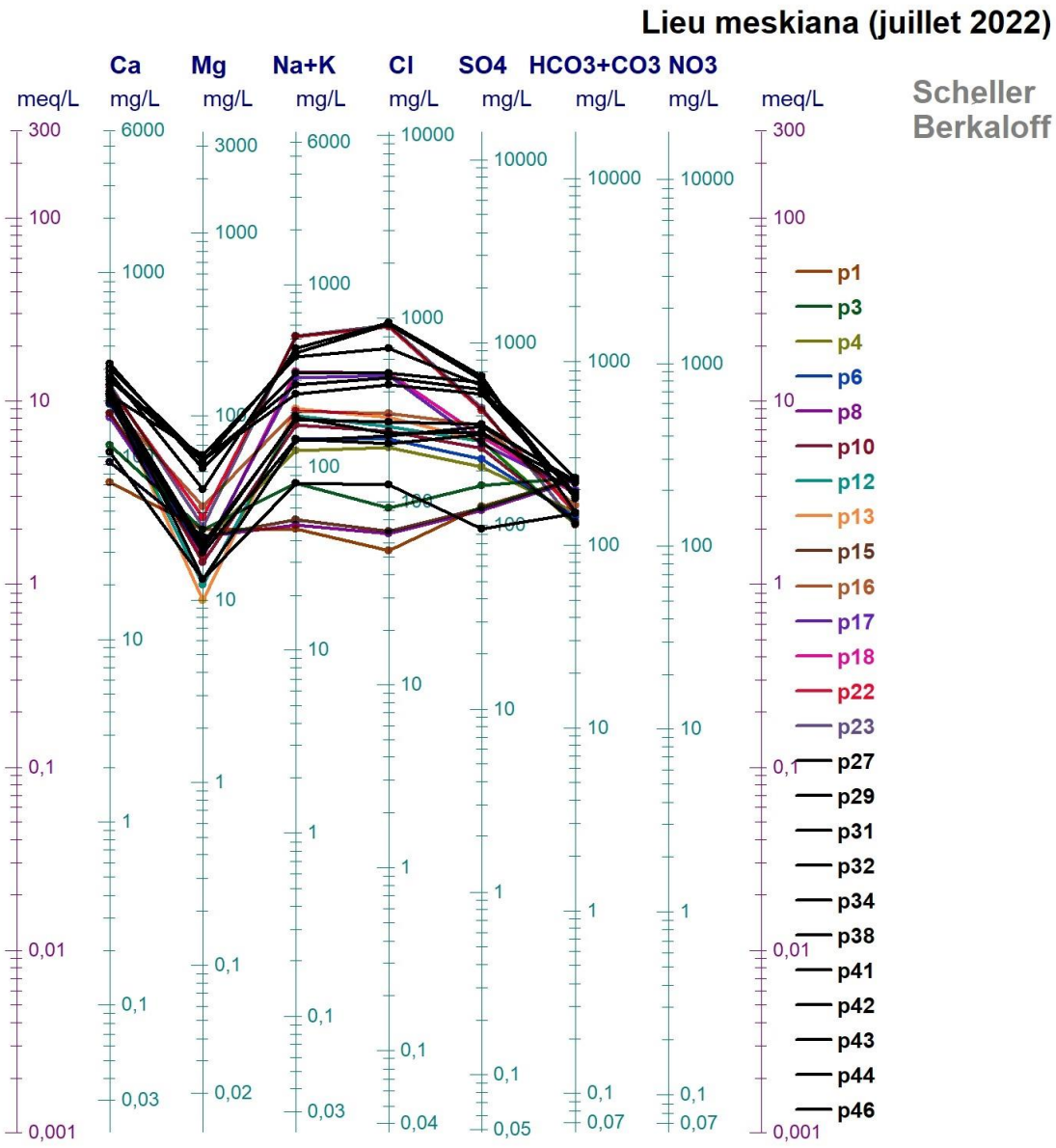


Figure 20:

Diagramme de Scheller des eaux souteraines nappe de Meskiana juillet 2022

C. Classification de Stabler :

- Dans cette méthode de classification, les concentrations exprimées en milliéquivalents par litre (meq/L) sont converties en quantités en pourcentage de réaction (%). Ces pourcentages permettent ensuite de représenter la composition chimique de l'eau de manière simplifiée à travers une formule ionique caractéristique. Cette formule est obtenue en classant les ions, de gauche à droite, selon leurs pourcentages décroissants, en mettant en évidence l'anion prédominant, ce qui permet de caractériser le faciès chimique de l'eau de façon synthétique et comparative.

D. Période de mars et juillet 2022 :

- L'analyse hydrochimique des eaux souterraines de la région étudiée pour les mois de mars et de juillet révèle des différences significatives liées aux variations saisonnières. Dans les deux campagnes, on observe une prédominance marquée du **faciès chloruré sodique (Na^+ - Cl^-)**, indiquant une forte minéralisation des eaux en lien avec l'évaporation intense et une circulation lente. Ce faciès est davantage accentué en **juillet**, période caractérisée par des températures élevées et une recharge quasi inexistante, ce qui favorise l'accumulation des sels dissous. En revanche, durant le mois de **mars**, certaines eaux présentent un **faciès bicarbonaté calcique (Ca^{2+} - HCO_3^-)**, en particulier dans les zones de recharge en amont, traduisant l'influence des apports récents d'eaux de pluie et l'interaction avec les roches carbonatées. Le **faciès sulfaté calcique (Ca^{2+} - SO_4^{2-})** demeure présent dans les deux périodes, soulignant l'influence géochimique stable des formations gypseuses et anhydrites. Ainsi, les eaux de mars apparaissent moins minéralisées, tandis que celles de juillet montrent un vieillissement chimique plus marqué. Ces résultats mettent en évidence l'effet des facteurs climatiques, notamment la température et la recharge, sur l'évolution spatio-temporelle des faciès chimiques dans l'aquifère.

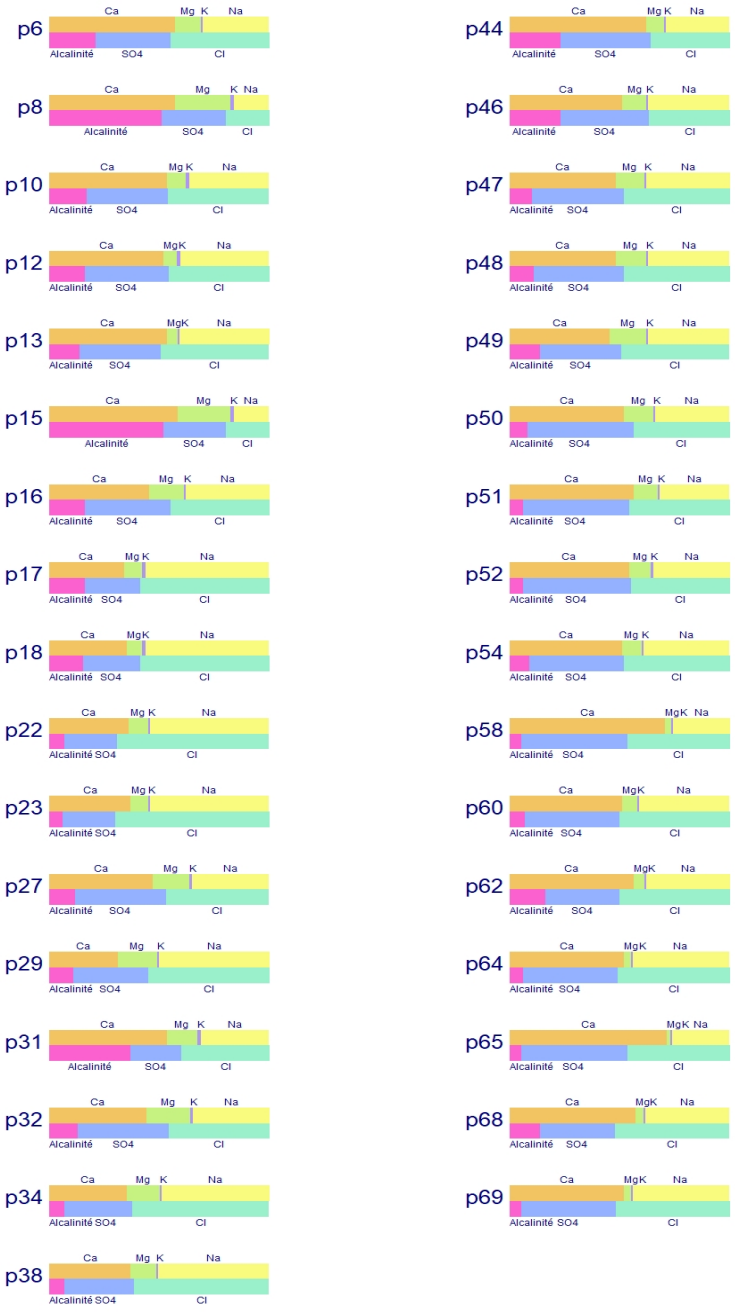


Figure 21: Diagramme de Stabler des eaux souterraines nappe de Meskiana mars, juillet 2022

- Cartographie des faciès :

L'examen de la carte de répartition des faciès des eaux souterraines de la nappe de Meskiana montre l'influence de la lithologie des formations sur les types de faciès (figure 22). En effet, les formations carbonatées du Crétacé bordant la nappe sont à l'origine du faciès bicarbonaté-calcique. Le faciès chloruré calcique tire son origine des formations détritiques constituant le matériel du

remplissage alluvionnaire. Le faciès chloruré sodique, qui se développe au centre de la nappe, provient des marnes gypsifères d'âge Emschérien.

Quant au faciès sulfaté calcique, qui se développe au Nord-Est de la plaine, il provient des formations évaporitiques de Djebel Belkfif.

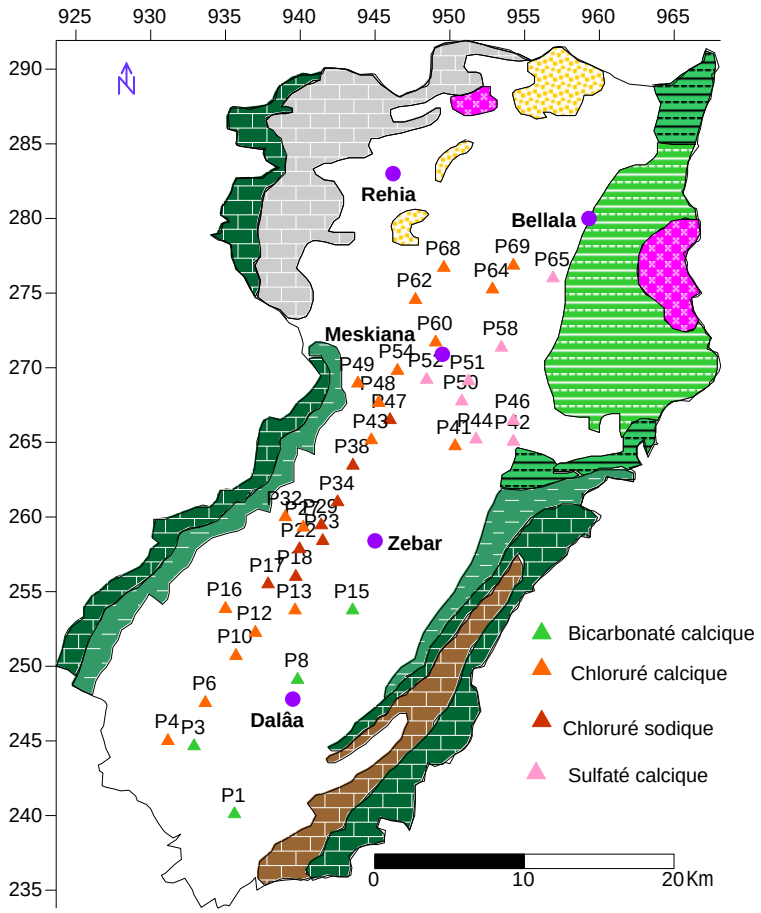


Figure 22: Carte des facies chimique, Meskiana 2022 (mg/l).

V. CARTOGRAPHIE HYDROCHIMIQUE :

- Les eaux souterraines contiennent en permanence des sels dissous, reflétant les caractéristiques du milieu géologique dont elles proviennent. Ces sels peuvent également résulter de phénomènes exogènes ayant modifié la composition chimique du milieu, notamment l'évaporation et le lessivage.

- Afin d'analyser la répartition spatiale des éléments chimiques, une cartographie hydrochimique a été réalisée. La distribution des concentrations dépend de plusieurs facteurs, tels que la lithologie (nature et composition des roches), l'état hydrodynamique de la nappe (profondeur de la surface piézométrique, vitesse d'écoulement), ainsi que les conditions climatiques, où les températures élevées favorisent l'évaporation, tandis que les précipitations contribuent au lessivage et à la dissolution des roches.
- Dans le cadre de la présente étude, l'accent a été mis sur la cartographie des principaux éléments chimiques caractérisant les faciès hydrochimiques dominants, qui influencent la qualité des eaux souterraines et montrent une évolution significative au cours de la période d'observation.
- Les campagnes de prélèvement effectuées en mars et juillet 2022 ont été retenues, car elles ont présenté les concentrations maximales en sels dissous. Ces deux périodes ont donc été choisies à titre illustratif pour représenter la variation spatiale des éléments chimiques.
- La cartographie hydrochimique a été élaborée par interpolation triangulaire à l'aide du logiciel Surfer 8 (Golden Software, 2002).

A. Carte des Bicarbonates : (figure 24)

- La carte de répartition des bicarbonates (HCO_3^-) dans les eaux souterraines révèle une variation significative des concentrations à travers la zone d'étude, avec des valeurs élevées observées dans le sud-ouest et le centre, notamment autour de Dalaâ et Zebar, ce qui suggère une interaction prolongée entre l'eau et des formations géologiques riches en minéraux carbonatés ainsi qu'un temps de résidence plus long dans l'aquifère. En revanche, des concentrations plus faibles sont enregistrées au nord et à l'est, notamment à Rehia et Belala, traduisant probablement une recharge récente ou la présence de roches moins solubles. Cette répartition spatiale résulte de l'influence combinée de la lithologie, de l'état hydrodynamique de la nappe et des conditions climatiques, ce qui fait de la carte des bicarbonates un outil pertinent pour l'évaluation de la qualité des eaux souterraines et la compréhension de la dynamique hydrochimique régionale.

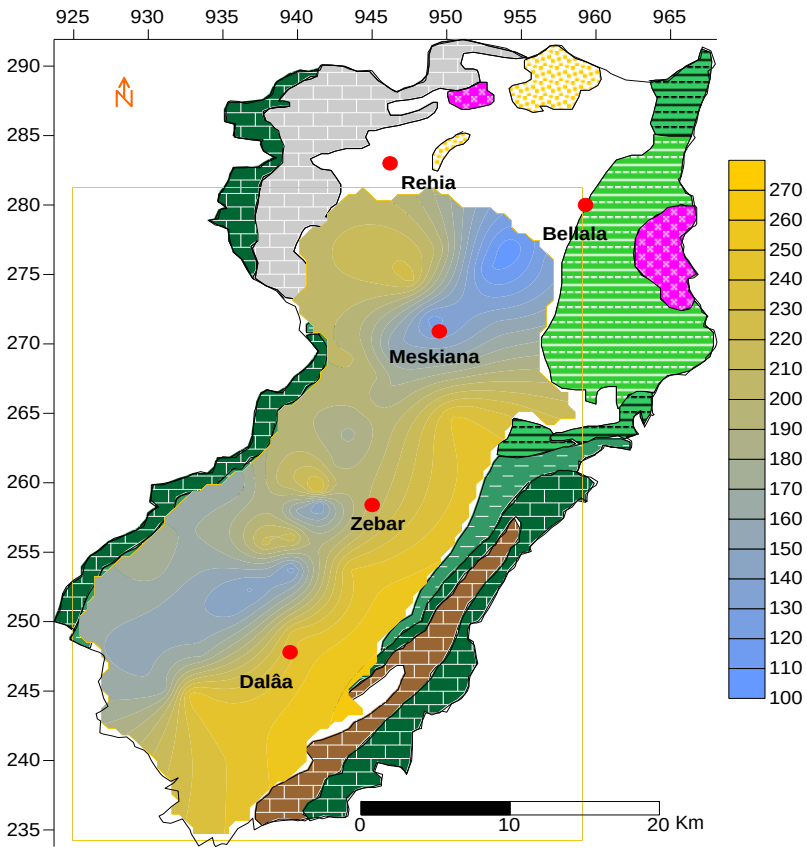


Figure 23: Carte des bicarbonates, nappe de Meskiana, juillet 2022 (mg/l).

B. Cartes des chlorures : (figure 25)

- La carte de répartition des chlorures (Cl^-) met en évidence une variabilité spatiale marquée des concentrations dans les eaux souterraines. Les valeurs les plus élevées, dépassant 950 mg/L, sont localisées principalement dans la région de Zebar et ses environs, ce qui peut indiquer une stagnation prolongée des eaux, une évaporation accrue ou une influence anthropique (comme l'agriculture intensive ou les rejets). À l'inverse, les concentrations les

plus faibles (inférieures à 500 mg/L) sont observées dans le sud, notamment vers Dalaâ, et dans certaines parties du nord-ouest. Ce contraste suggère l'existence de zones de recharge active ou la présence de formations géologiques moins solubles. La distribution des chlorures est fortement influencée par la dynamique hydrogéologique, les conditions climatiques ainsi que la nature lithologique du substratum, ce qui en fait un indicateur clé pour l'évaluation de la salinité et la qualité chimique des eaux souterraines de la région.

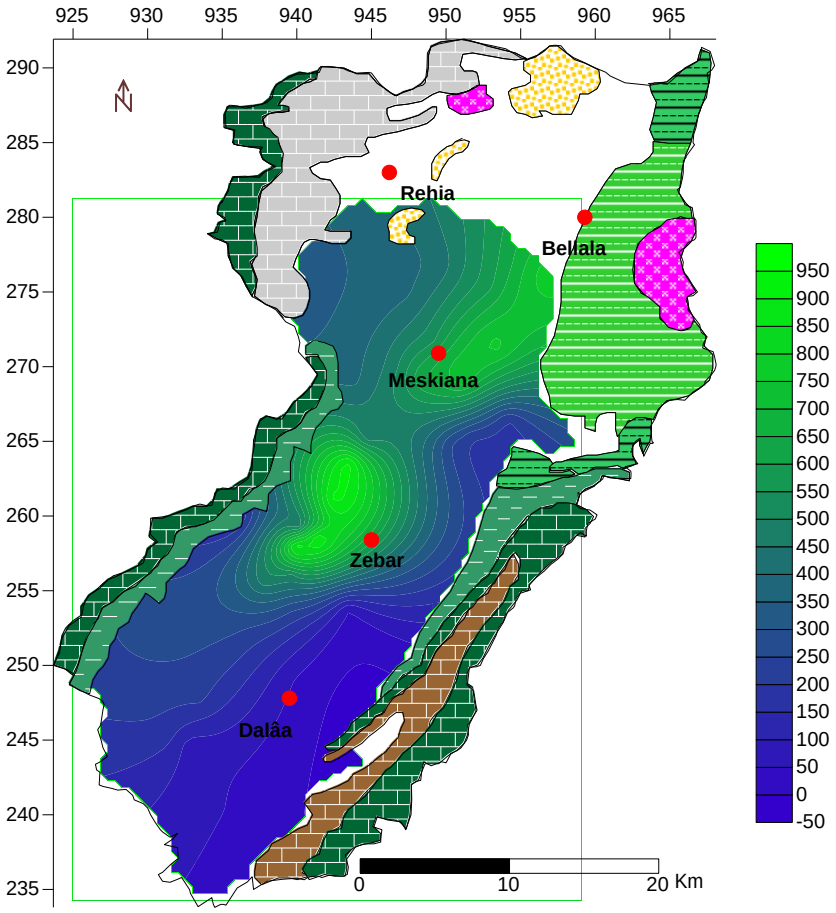


Figure 24: Carte des chlorures dans la plain de Meskiana, juillet 2022 (mg/l).

C. <u>Cartes des sulfates : (figure 26)</u>

- La carte des concentrations en sulfates (SO_4^{2-}) dans les eaux souterraines montre une répartition hétérogène à travers la zone d'étude, avec des valeurs variant de moins de 200 mg/L (en bleu clair) à plus de 1100 mg/L (en rouge foncé). Les teneurs les plus élevées sont localisées principalement dans la région de Meskiana et ses environs, ce qui peut être attribué à la présence de formations évaporitique (comme le gypse ou l'anhydrite), ou à des apports

anthropiques (engrais, eaux usées). En revanche, des concentrations plus faibles sont observées dans le sud, notamment autour de Dalaâ, ce qui suggère une influence plus marquée des zones de recharge ou un substrat moins soluble en sulfates. Cette distribution témoigne de l'influence combinée de la lithologie, des conditions hydrodynamiques et des activités humaines sur la composition chimique des eaux Souterraines, et souligne l'importance du suivi des sulfates en tant qu'indicateur de la qualité et de l'évolution chimique de la nappe phréatique.

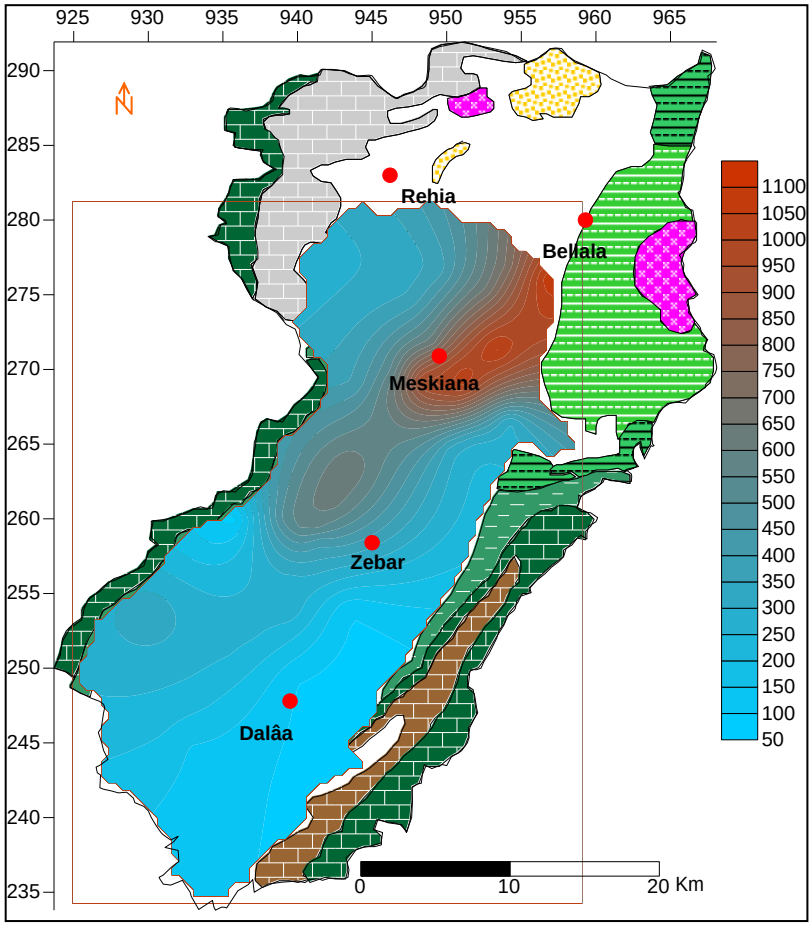


Figure 25: Carte des sulfates dans la nappe de Meskiana, juillet 2022 (mg/l).

D. Cartes du calcium : (figure 27)

- La carte de répartition du calcium (Ca^{2+}) montre une concentration marquée dans la partie nord-est de la zone d'étude, en particulier autour de Meskiana et en direction de Belala, o**ù les valeurs dépassent 800 mg/l**, indiquées par les teintes bleu foncé à violettes. Cette accumulation élevée peut être liée à la dissolution intensive des roches carbonatées et évaporitique riches en calcite ou en gypse, accentuée par des conditions climatiques favorables à l'évaporation. En revanche, les zones du sud et du sud-ouest, notamment vers Dalaâ et Zebar, présentent des concentrations plus faibles (inférieures à 300 mg/L), ce qui suggère un renouvellement plus actif de la nappe ou une moindre interaction avec les formations riches en calcium. La variabilité spatiale de ce paramètre est donc le reflet direct de la lithologie, de la circulation des eaux souterraines et des conditions climatiques, faisant du calcium un

indicateur essentiel de l'évolution hydrochimique et de la qualité des eaux souterraines dans la région.

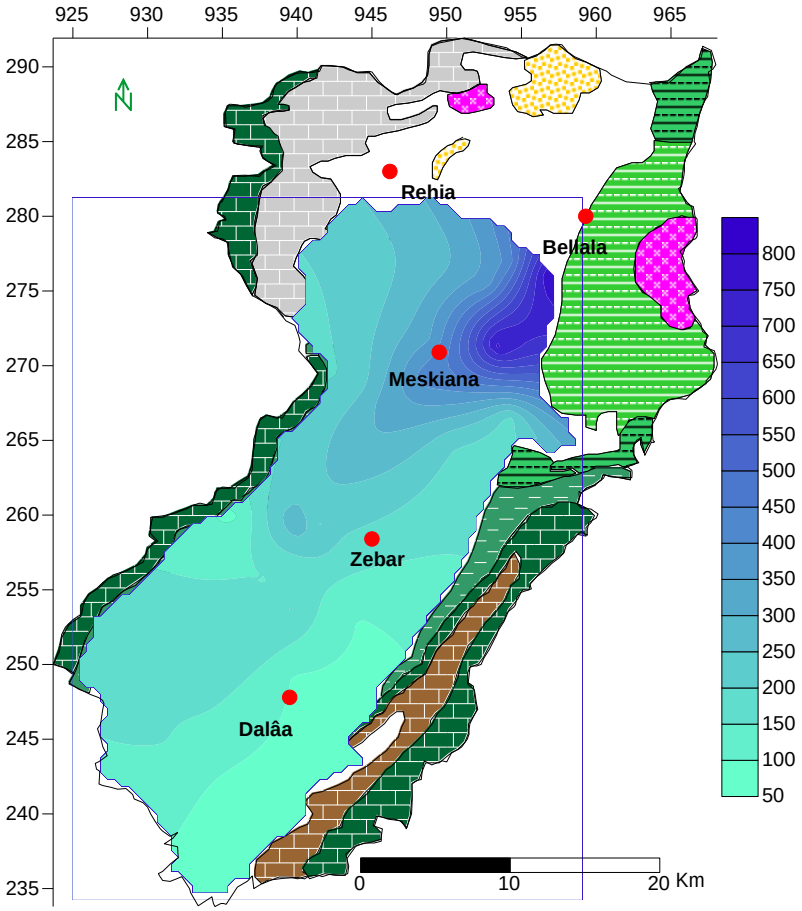


Figure 26: Carte du calcium dans la nappe de Meskiana, juillet 2022 (mg/l).

E. Cartes du sodium : (figure 28)

- La carte de répartition du sodium (Na^+) met en évidence une concentration élevée dans la partie centrale et nord de la zone étudiée, notamment autour des localités de Meskiana et Zebar, où les valeurs atteignent et dépassent les 400 mg/L (zones en rouge foncé). Cette forte teneur en sodium peut être le résultat de processus de dissolution de minéraux évaporitique comme l'halite (NaCl), ou encore d'un échange ionique entre le sodium et le calcium/magnésium des argiles. À l'inverse, les zones méridionales et sud-occidentales, notamment autour de Dalaâ, présentent des concentrations plus faibles (inférieures à 100 mg/L), indiquées par des teintes vertes, suggérant une moindre minéralisation et un meilleur renouvellement des eaux. La

distribution du sodium révèle donc une hétérogénéité hydrochimique significative, reflétant à la fois les conditions géologiques, la stagnation relative des eaux souterraines dans certaines zones et les interactions eau-roche spécifiques à la région.

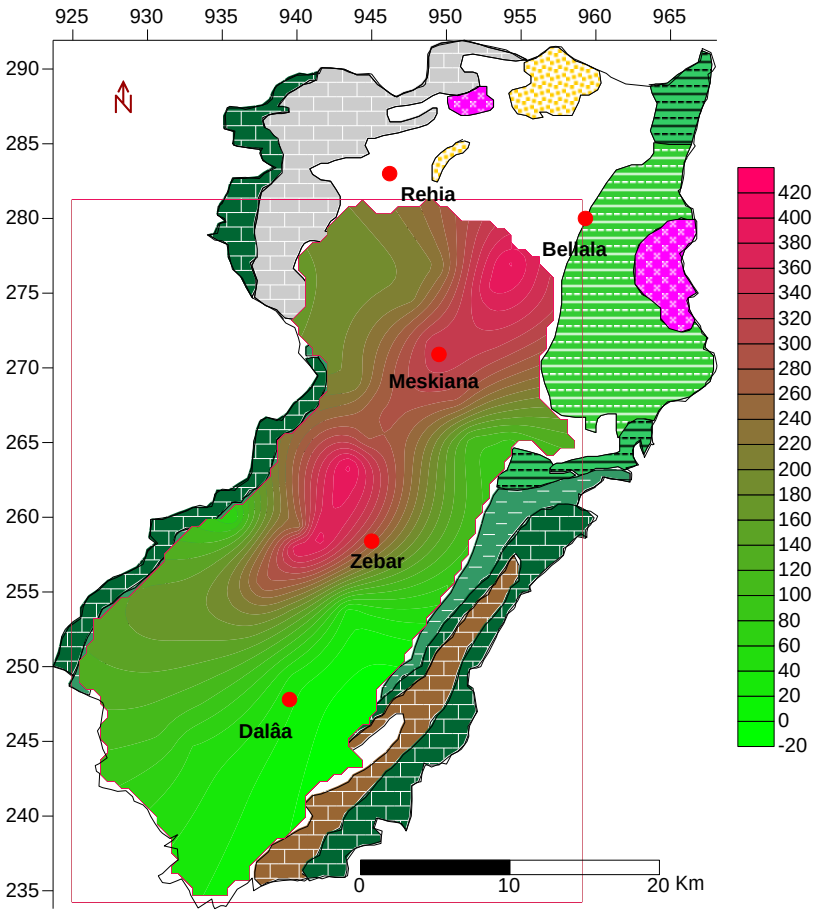


Figure 27: Carte du sodium dans la nappe de Meskiana, juillet 2022 (mg/l).

F. Cartes du magnésium : (figure 29)

- La carte de répartition du magnésium (Mg^{2+}) révèle une concentration globalement modérée à faible sur l'ensemble de la zone étudiée, avec des valeurs variant principalement entre 10 et 70 mg/L. Les zones de fortes concentrations (indiquées en vert foncé) se situent localement au centre de la région, notamment autour de Meskiana et légèrement au sud-ouest de Zebar, ce qui pourrait être lié à la dissolution des dolomies ou autres roches carbonatées magnésiennes présentes dans le substratum. À l'inverse, les régions périphériques, notamment Dalaâ, présentent des valeurs plus faibles (teintes jaunes), traduisant une minéralisation réduite du magnésium, probablement en lien avec une alimentation en eaux plus récentes ou moins

minéralisées. Cette distribution met en évidence l'influence des facteurs géologiques locaux, notamment la nature lithologique, ainsi que les processus hydrogéochimiques tels que les échanges ioniques ou la précipitation des carbonates, dans le contrôle de la teneur en magnésium des eaux souterraines.

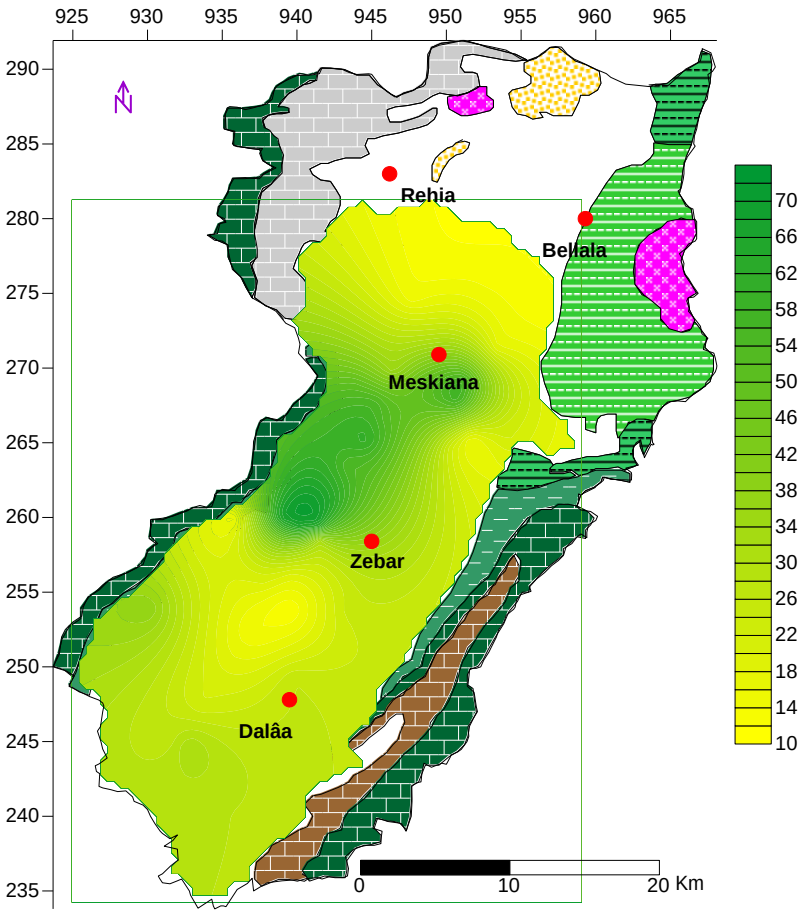


Figure 28: Carte du magnésium, du plain de Meskiana, juillet 2022 (mg/l).

VI. CLASSIFICATION DES EAUX D'IRRIGATION SELON LE %NA :

A. . Analyse des résultats de la classification de 39 puits selon le pourcentage de sodium (Na%) : (Mars 2022) :

- La classification de 39 puits, effectuée sur la base du pourcentage de sodium (Na%) dans les eaux d'irrigation, a permis de distinguer 3 classes principales :

Tableau 6: classification des eaux d'irrigation selon le NA% (mars 2022)

Indice	Classe1 Très bonne	Classe 2 bonne	Classe 3 admissible	Classe 4 médiocre	Classe 5 mauvaise
Na%	<20	20-40	40-60	60-80	>80
puits	/	P1-p3-p4-p6-p8-p10-12-p13-p15-p16-p31-p41-p42-p44-p46	/	P17-p18-p27-p32-p43-p48-p47-p49-p54-p62-p68	P22-p23-p29-p34-p38-p50-p51-p52-p58-p60-p64-p69

- Classe 2 – Eau de bonne qualité (Na% entre 20 et 40) :
  Cette catégorie comprend 15 puits, soit environ 39,5 % de l'ensemble des forages analysés. Elle indique une concentration modérée en sodium, ce qui rend ces eaux adaptées à l'irrigation avec un risque faible d'altération des propriétés physiques des sols. Cette proportion met en évidence une part significative des ressources en eau utilisables sans mesures correctives majeures, ce qui est favorable pour la durabilité des pratiques agricoles locales.
- Classe 4 – Eau de qualité médiocre (Na% entre 60 et 80) :
  Cette classe regroupe 11 puits, représentant environ 28,9 % des échantillons étudiés. Ces eaux soulèvent des préoccupations importantes quant à leur usage prolongé en irrigation, en raison de la possible dégradation de la perméabilité des sols et de déséquilibres ioniques susceptibles de compromettre la santé des cultures. Leur utilisation nécessite une gestion prudente, notamment à travers un suivi régulier et des techniques d'amélioration du sol.
- ● Classe 5 – Eau de mauvaise qualité (Na% > 80) :
  Elle regroupe 12 puits, soit environ 31,6 % des forages analysés, ce qui témoigne d'une présence marquée d'eaux à très forte teneur en sodium. L'irrigation avec ce type d'eau n'est

pas recommandée, sauf en recourant à des stratégies spécifiques telles que l'amendement des sols, l'amélioration du drainage, ou l'utilisation de cultures tolérantes au sel. En l'absence de telles mesures, ces eaux peuvent entraîner la salinisation progressive et le colmatage des sols, mettant en péril la productivité agricole à long terme.

VII. CLASSIFICATION SELON DES EAUX D'IRRIGATION SELON LE SAR :

A. Analyse des résultats de la classification de 39 puits selon le SAR (juillet 2022) :

Tableau 7: classification des eaux d'irrigation selon le SAR (juillet 2022)

Point d'eau	SAR	Résultats	Point d'eau	SAR	Résultats
P1	0 ,96	Eau bonne	P41	2,93	Eau bonne
P3	1,54	Eau bonne	P42	2,32	Eau bonne
P4	2,11	Eau bonne	P43	4,25	Eau mauvaise
P6	2,43	Eau bonne	P44	2,15	Eau bonne
P8	0,94	Eau bonne	P46	3,04	Eau bonne
P10	2,88	Eau bonne	P47	3,06	Eau mauvaise
P12	3,25	Eau bonne	P48	3,98	Eau mauvaise
P13	3,50	Eau bonne	P49	3,74	Eau médiocre
P15	1,01	Eau bonne	P50	3,96	Eau mauvaise
P16	3,30	Eau bonne	P51	3,80	Eau mauvaise
P17	5,83	Eau médiocre	P52	3,87	Eau mauvaise
P18	6,13	Eau médiocre	P54	4,27	Eau mauvaise
P22	8,11	Eau mauvaise	P58	3,34	Eau mauvaise
P23	8,17	Eau mauvaise	P60	4,71	Eau mauvaise
P27	3,70	Eau mauvaise	P62	3,67	Eau médiocre
P29	6,03	Eau mauvaise	P64	5,35	Eau mauvaise
P31	1,78	Eau bonne	P65	3,49	Eau mauvaise
P32	3,45	Eau médiocre	P68	3,67	Eau médiocre
P34	5,90	Eau mauvaise	P69	5,51	Eau mauvaise

P38	6,26	Eau mauvaise			

B. Analyse des résultats de la classification de 39 forages selon le SAR (juillet 2022) :

Tableau 8: classification des eaux d'irrigation selon le SAR (mars 2022)

Point d'eau	SAR	Résultats	Point d'eau	SAR	Résultats
P1	0,59	Eau bonne	P41	2,70	Eau bonne
P3	1,27	Eau bonne	P42	1,72	Eau bonne
P4	1,87	Eau bonne	P43	3,81	Eau médiocre
P6	1,97	Eau bonne	P44	2,00	Eau bonne
P8	0,71	Eau bonne	P46	2,84	Eau bonne
P10	2,63	Eau bonne	P47	3,91	Eau médiocre
P12	3,15	Eau bonne	P48	3,74	Eau médiocre
P13	3,31	Eau bonne	P49	3,27	Eau médiocre
P15	0,75	Eau bonne	P50	3,55	Eau mauvaise
P16	3,09	Eau bonne	P51	3,53	Eau mauvaise
P17	5,67	Eau médiocre	P52	3,86	Eau mauvaise
P18	5,84	Eau médiocre	P54	3,96	Eau médiocre
P22	6,26	Eau mauvaise	P58	3,11	Eau mauvaise
P23	6,36	Eau mauvaise	P60	4,52	Eau mauvaise
P27	3,45	Eau médiocre	P62	3,36	Eau médiocre
P29	5,80	Eau mauvaise	P64	5,14	Eau mauvaise
P31	1,55	Eau bonne	P65	3,27	Eau mauvaise
P32	3,24	Eau médiocre	P68	3,53	Eau médiocre
P34	5,66	Eau mauvaise	P69	5,28	Eau mauvaise
P38	5,96	Eau mauvaise			

- . Le SAR est défini par la relation suivante :
- $SAR=\frac{(Na^{+}+K^{+})}{\sqrt{Ca^{2+}+Mg^{2+}/2}}$
- -Tous les ions sont exprimés en méq/l.

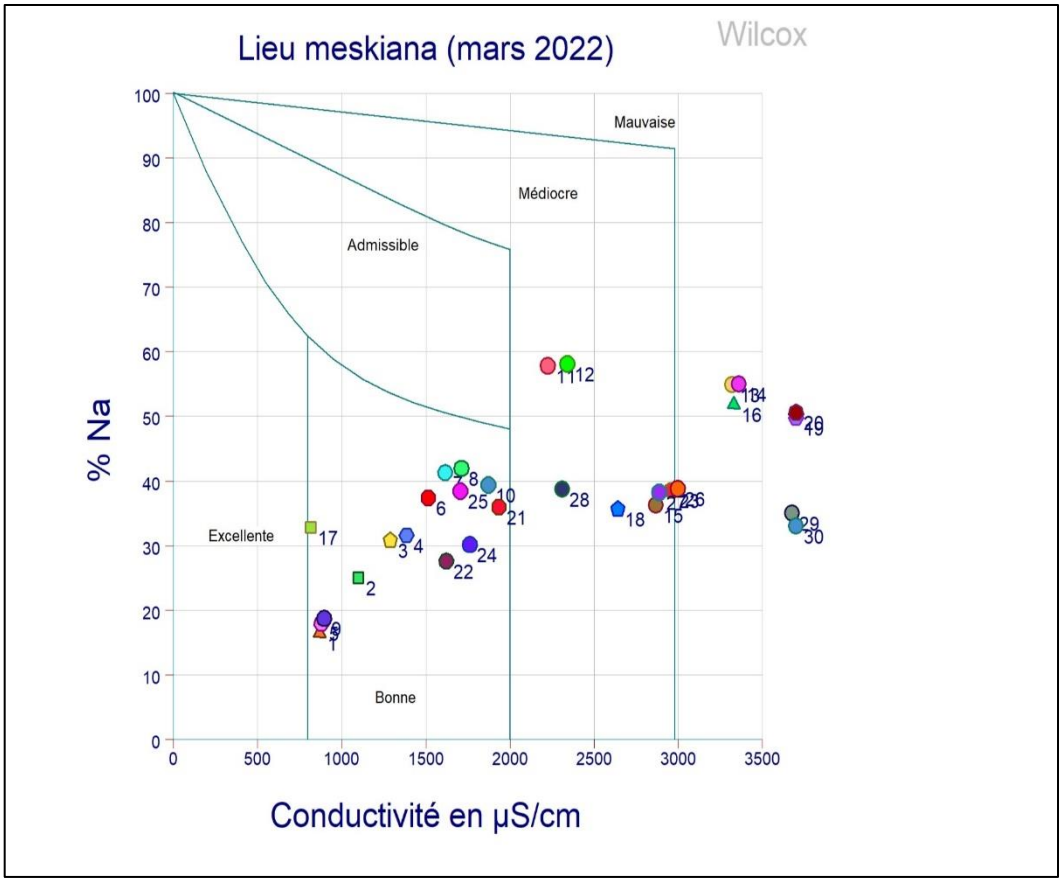
- **Comparaison SAR (Sodium Absorption Ratio) :**

  Les valeurs du SAR varient entre 3,2 et 7,8. En juillet, 40 % des échantillons dépassent le seuil de 6, indiquant un risque modéré à élevé de sodisation des sols, surtout les sols argileux. Une gestion contrôlée de l'irrigation est nécessaire dans ces zones.

VIII. CLASSIFICATION SELON DES EAUX D'IRRIGATION SELON LE WILCOX :

- Pour la classification des eaux d'irrigation on a utilisé le diagramme de Wilcox, ce diagramme est basé sur les valeurs du rapport d'absorption en sodium (SAR) et de la conductivité électrique des ions contenus dans l'eau. L'objectif était de représenter les échantillons sur le diagramme de Wilcox afin de faciliter la caractérisation des eaux souterraines sur leur aptitude à l'irrigation.

Figure 29 : Diagramme de Wilcox des eaux souterraines de Meskiana mars 2022



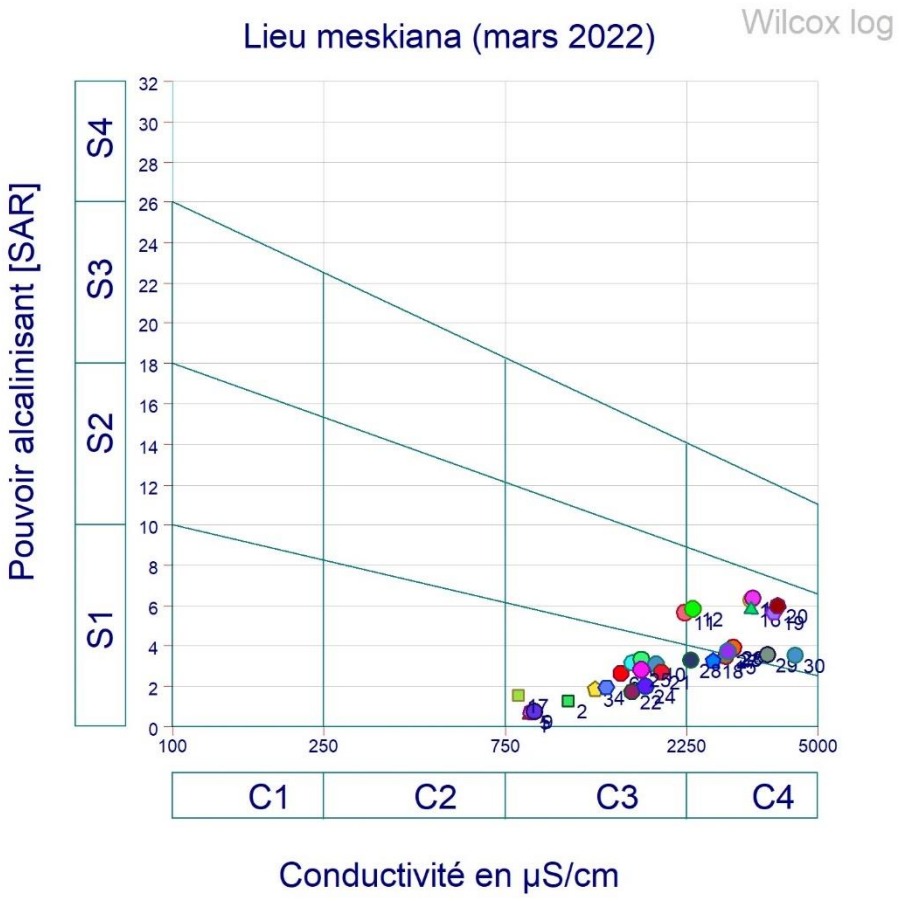


Figure 30: Diagrammes de Richards (Meskiana mars 2022)

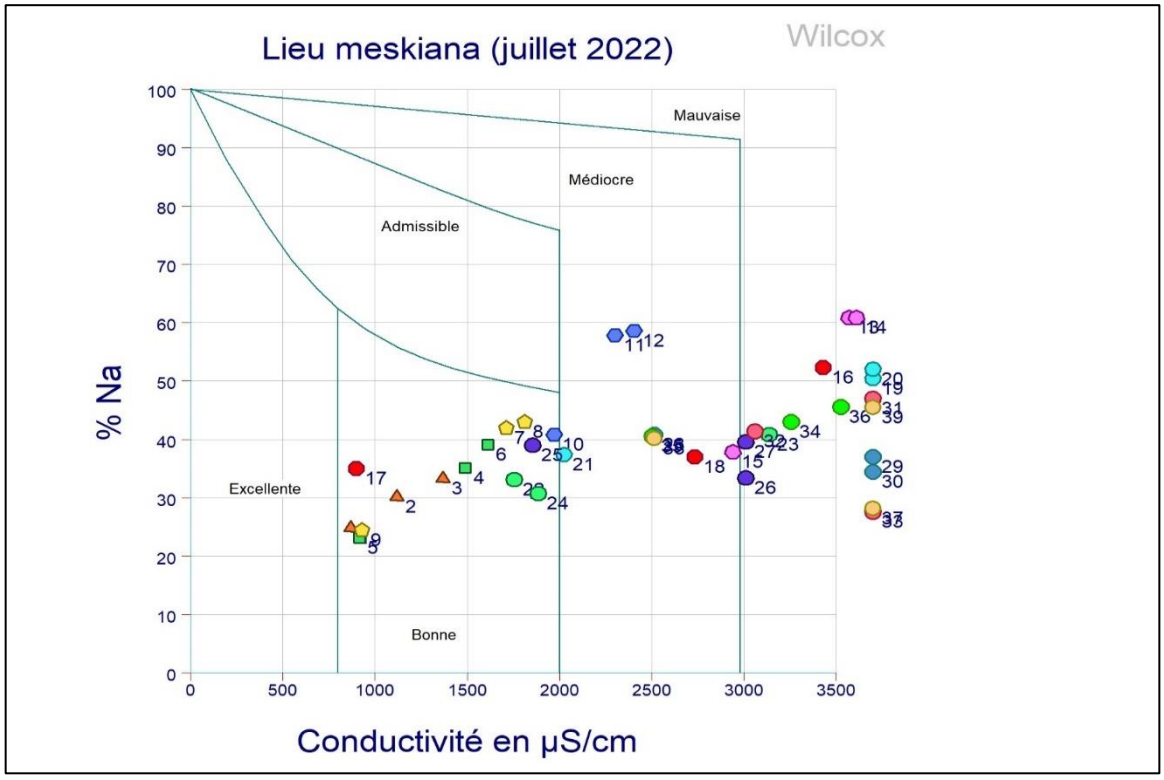


Figure 31: Diagramme de Wilcox des eaux souterraines de Meskiana juillet 2022

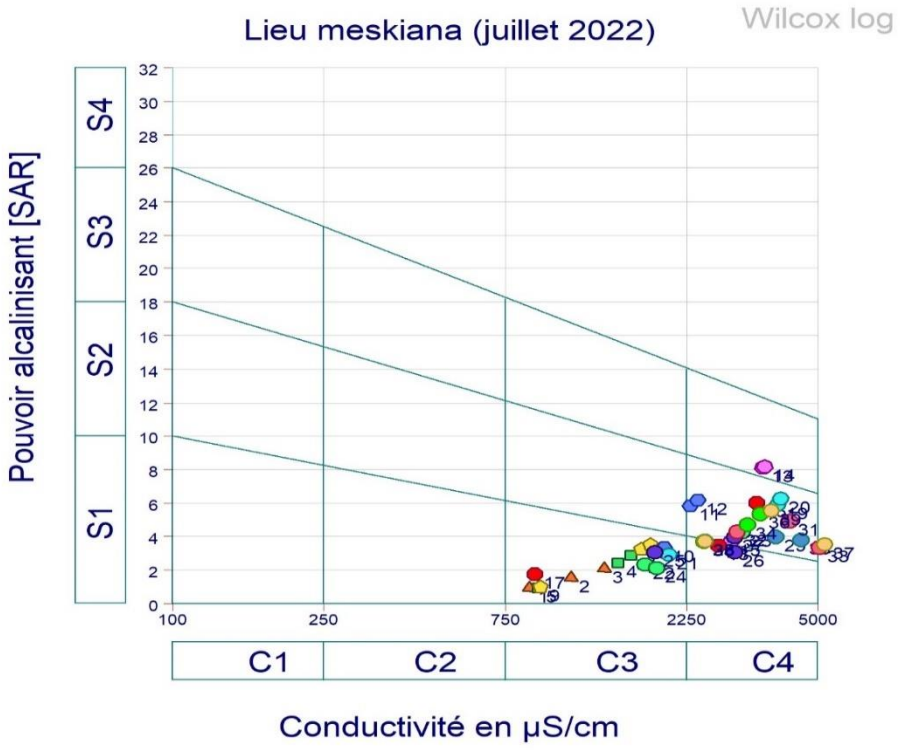


Figure 32: Diagrammes de Richards (Meskiana juillet 2022)

A. Classification de Richards mars 2022 :

Tableau 9: Classification de Richards (mars 2022)

Ordre	Qualité	Classe	L'état d'utilisation	Points d'eau
1	Excellente	C1 – S2	Eau utilisable sans danger pour l'irrigation de la plupart des cultures, sur la plupart du sol.	
2	Bonne	C2 – S1 C2 – S2	En général, eau pouvant être utilisée sans contrôle particulier pour l'irrigation de plantes moyennement tolérantes au sel sur sols ayant une bonne perméabilité.	
3	Admissible	C3 – S1 C3 – S2 C2 – S3	En général, eau convenant à l'irrigation de cultures tolérantes au sel sur des sols bien drainés, l'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée.	P1-p3-p4-p6-p8-p10-p12-p13-p15-p16-p31-p41-p42-p44-p46
4	Médiocre	C4 – S1 C4 – S2 C2 – S3	En général, eau fortement minéralisée pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes au sel et sur des sols biens drainés et lessivés.	P18-p22-p23-p27-p29-p34-p32-p38-p43-p47-p48-p49-p50-p51-p52-p54-p58-p60-62-p64-p65-p68-p69-
5	Mauvaise	C3 – S4 C4 – S3 C4 – S4	Eau ne convenant généralement pas à l'irrigation mais pouvant être utilisé sous certaines condition : sol très perméable, bon lessivage et plantes tolérantes très bien au sel.	

B. Classification de Richards juillet 2022 :

Tableau 10: Classification de Richards (juillet 2022)

Ordre	Qualité	Classe	L'état d'utilisation	Points d'eau
1	Excellente	C1 – S2	Eau utilisable sans danger pour l'irrigation de la plupart des cultures, sur la plupart du sol.	
2	Bonne	C2 – S1 C2 – S2	En général, eau pouvant être utilisée sans contrôle particulier pour l'irrigation de plantes moyennement tolérantes au sel sur sols ayant une bonne perméabilité.	
3	Admissible	C3 – S1 C3 – S2 C2 – S3	En général, eau convenant à l'irrigation de cultures tolérantes au sel sur des sols bien drainés, l'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée.	P1-p3-p4-p6-p8-p10-p12-p13-p15-p16-p31-p41-p42-p44-p46
4	Médiocre	C4 – S1 C4 – S2 C2 – S3	En général, eau fortement minéralisée pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes au sel et sur des sols biens drainés et lessivés.	P17-p18-p27-p29-p32-p34-p38-p43-p47-p48-p49-p50-p52-p54-p58-p60-p62-p64-p65-p68-p69
5	Mauvaise	C3 – S4 C4 – S3 C4 – S4	Eau ne convenant généralement pas à l'irrigation mais pouvant être utilisé sous certaines condition : sol très perméable, bon lessivage et plantes tolérantes très bien au sel.	P22-p23

IX. RATIO D'ABSORPTION DE MAGNESIUM :

- Le calcul du rapport d'obsorption de magnésium (MR) permet d'évaluer l'impact de l'équilibre entre le calcium et le magnésium dans l'eau d'irrigation sur la structure du sol. Une valeur élevée peut entrainer une détérioration de la perméabilité du sol et nuire à la croissance des plantes.
- Le MR est défini par l'équation suivante :

$$\mathbf{MR}=\frac{Mg^{2+}}{(Ca^{2+}+Mg^{2+})}\times 100$$

A. Calcul du MR pour le mois de mars :

Tableau 11: Classification de MR (mars 2022)

MR %	Puits	Commentaire
< 50%	Tous les puits (39)	Pas de danger
>50%	/	Danger potentiel

B. Calcul du MR pour le mois de juillet :

Tableau 12: Classification de MR (juillet 2022)

MR %	Puits	Commentaire
< 50%	Tous les puits (39)	Pas de danger
>50%	/	Danger potentiel

● Commentaire générale pour les deux mois (mars, juillet) :

Les résultats du calcul du rapport d'obsorption de magnésium (MR) montrent que toutes les valeurs sont inférieures à 50 %, ce qui indique que l'eau d'irrigation ne présente aucun risque lié au magnésium sur la structure du sol, et qu'elle est donc appropriée pour un agricole.

X. BICARBONATE DE SODIUM RESIDUEL (RSBC) :

Le calcul du bicarbonate résiduel de sodium (RSBC) permet d'évaluer l'impact des bicarbonates sur l'équilibre du calcium dans l'eau d'irrigation. Des valeurs élevées peuvent entrainer la précipitation du calcium et augmenter le sodium échangeable, ce qui nuit à la structure et à la fertilité du sol.

Le RSBC est défini par l'équation suivante :

$$\mathbf{RSBC= HCO3^{-} - Ca^{2+}}$$

A. Calcul du RSBC pour le mois de mars :

Tableau 13: Qualité des eaux pour l'irrigation à partir de l'évolution du RSBC (mars 2022)

RSBC (meq/l)	Pourcentage	Qualité d'eau
<5	100 %	Satisfaisante
5 – 10	0 %	Marginale
>10	0 %	Insatisfaisante

- Les valeurs de RSBC de la zone d'étude varient de (-0.29 /-37,65) meq/l, avec une moyenne de -10,25 meq/l. Toutes les valeurs de RSBC des eaux souterraines sont inférieurs à 5 ; indiquant des eaux de bonne qualité pour l'agriculture (tab V.24)

B. <u>Calcul du RSBC pour le mois de juillet :</u>

Tableau 14: Qualité des eaux pour l'irrigation à partir de l'évolution du RSBC (juillet 2022)

RSBC (meq/l)	Pourcentage	Qualité d'eau
<5	100 %	Satisfaisante
5 – 10	0 %	Marginale
>10	0 %	Insatisfaisante

- Les valeurs de RSBC de la zone d'étude varient de (0,13 /-39.13) meq/l, avec une moyenne de -11.38 meq/l. Toutes les valeurs de RSBC des eaux souterraines sont inférieurs à 5 ; indiquant des eaux de bonne qualité pour l'agriculture (tab V.11)
- Commentaire générale pour les deux mois (mars, juillet) :
- Les valeurs négatives du RSBC indiquent une absence d'effet néfaste des bicarbonates sur l'équilibre du calcium, ce qui reflète une bonne qualité de l'eau d'irrigation à cet égard. En juillet, le RSBC dépasse 2,5 meq/l dans plusieurs sites, ce qui favorise la dispersion des sols et réduit leur perméabilité.

XI. <u>RISQUE DE SALINITE :</u>

- La salinité pose un problème dès l'instant ou l'accumulation de sel dans la zone racinaire atteint une concentration qui provoque une baisse de rendement et ralentit la croissance des végétaux,(Perrot, Derville et al. 2009)), il faut d'abord rappeler que sur les plantes spontanées ou cultivées la salinité à deux actions bien distinctes qui peuvent très souvent se produire simultanément. L'excès de teneur en sel est l'un des soucis principaux avec l'eau utilisée pour l'irrigation. Une concentration élevé en sel dans l'eau ou dans les sols affectera négativement le rendement des récoltes, provoquera une dégradation des sols et une pollution des eaux souterraines.

A. Classification de l'eau pour risque de salinité (mars 2022) :

Tableau 15: Classification de l'eau pour risque de salinité (Adapté des données de FAO) (mars 2022)

Puit	Classe d'eau	Conductivité de l'eau (µs/cm)	Qualité d'eau
/	1	<250	Très faible salinité
/	2	250 – 750	Faible salinité
P1-p3-p4-p6-p8-p10-p12-p13-p15-p16-p31-p41-p42-p44-p46	3	750 – 2000	Salinité modérée
P17-p18-p27-p32-p43-p47-p48-p49-p54-p62-p68	4	2000 – 3000	Salinité élevée
P22-p23-p29-p34-p38-p50-p51-p52-p58-p60-p64-p65-p69	5	>3000	Très forte salinité

B. Classification de l'eau pour risque de salinité (juillet 2022) :

Tableau 16: Classification de l'eau pour risque de salinité (Adapté des données de FAO) (juillet 2022)

Puits	Classe d'eau	Conductivité de l'eau (µs/cm)	Qualité d'eau
/	1	<250	Très faible salinité
/	2	250 – 750	Faible salinité
P1-p3-p4-p6-p8-p10-p12-p13-p15-p16-p31-p42-p44-p46	3	750 – 2000	Salinité modérée
P17-p18-p27-p32-p41-p49-p62-p68	4	2000 – 3000	Salinité élevée
P22-p23-p29-p34-p38-p43-p47-p48-p50-p51-p52-p54-p58-p60-p64-p65-p69	5	>3000	Très forte salinité

XII. . INDICE DE KELLY :

- Selon l'indice de Kelly (KI), les eaux sont classées à des fins d'irrigation. Le sodium mesuré par rapport au calcium et au magnésium est pris en compte pour le calcul de ce paramètre (Nag, 2014). Un rapport de Kelley (KR) de plus d'un indique un niveau excessif de sodium dans les eaux (Deshpande et Aher, 2012).
- Le KR est défini par l'équation suivante : (Deshpande et Aher, 2012)

$$\mathbf{KR}=\frac{Na^{+}}{Ca^{+}+Mg^{+}}$$

A. Classification de l'eau pour risque de salinité (juillet 2022) :

Tableau 17: Classification de l'eau pour risque de salinité (Adapté des données de FAO) (juillet 2022)

Puits	Classe d'eau	Conductivité de l'eau (µs/cm)	Qualité d'eau
/	1	<250	Très faible salinité
/	2	250 – 750	Faible salinité
P1-p3-p4-p6-p8-p10-p12-p13-p15-p16-p31-p42-p44-p46	3	750 – 2000	Salinité modérée
P17-p18-p27-p32-p41-p49-p62-p68	4	2000 – 3000	Salinité élevée
P22-p23-p29-p34-p38-p43-p47-p48-p50-p51-p52-p54-p58-p60-p64-p65-p69	5	>3000	Très forte salinité

Tableau 18: Qualité de l'eau pour le ratio de Kelley (Kelley, Brown et al. 1940) (juillet 2022)

Puits	Class d'eau	Kelley's ratio	Qualité de l'eau	Caractéristique
P1-p3-p6-p8-p10-p12-p13-p15-p16-p27-p31-p32-34-p38-p41-p42-p43-p44-p46-p47-p48-p49-p50-p51-p52-p54-p58-p60-p62-p64-p65-p68-p69	1	<1	Approprié pour l'irrigation	
P17-p18-p22-p23-p29	2	$1 \leq KR \geq 2$	Marginal	Très peu de sodium sera absorbé
	3	>2	Inapproprié	L'absorption de sodium tend à augmenter proportionnellement

- **Comparaison de Kelly Ratio (KR) :**

  La moyenne de KR passe de 0,8 (mars) à 1,1 (juillet), indiquant une eau non recommandée selon Kelley dans certains secteurs.

XIII. . INDICE DE PERMEABILITE :

- L'indice de perméabilité est donné par la formule suivante :

$$\mathbf{IP= \left(\frac{Na^{+}+\sqrt{HCO3^{-}}}{Ca+Mg^{2+}+Na^{+}}\right)\times 100}$$

Tableau 19: classification des eaux souterraines basée sur le IP (mars 2022)

Classe d'eau	Indice de perméabilité	puit	Qualité d'eau
1	>75 %	P17-p18-p22-p23-p29-p31-p34-p38	Excellente
2	25 – 50 %	P1-p3-p4-p6-p8-p10-p12-p13-p15-p16-p27-p32-p41-p42-p43-p44-p46-p47-p48-p49-p50-p51-p52-p54-p58-p60-p62-p64-p65-p68-p69	Bonne
3	<25 %	/	Inappropriée

Tableau 20: classification des eaux souterraines basée sur le IP (juillet 2022)

Classe d'eau	Indice de perméabilité	puit	Qualité d'eau
1	>75 %	P17-p18-p22-p23-p29-p34-p38	Excellente
2	25 – 50 %	P1-p3-p4-p6-p8-p10-p12-p13-p15-p16-p27-p31-p32-p41-p42-p43-p44-p46-p47-p48-p49-p50-p51-p52-p54-p58-p60-p62-p64-p65-p68-p69	Bonne
3	<25 %	/	Inappropriée

Tableau 21: Évaluation globale de la qualité des eaux pour l'irrigation :

Paramètre	**Mars 2022**	**Juillet 2022**	**Interprétation**
CE (µS/cm)	1520	1780	Minéralisation élevée
NO_3^- (mg/l)	45	65	Pollution possible
SAR	4.5	5.6	Risque moyen
RSBC (meq/l)	1.3	2.5+	Risque de dispersion
KR	0.8	1.1	Limite de tolérance

A. <u>Recommandations agronomiques :</u>

- ● Zones avec SAR > 6 : utiliser des eaux de meilleure qualité en alternance, ou appliquer du gypse pour réduire la sodisation.

  ● Sites avec NO_3^- > 50 mg/l : éviter les cultures sensibles (salades, carottes) pour prévenir l'accumulation de nitrates.

  ● Sol argileux + RSBC élevé : prévoir un système de drainage pour éviter la compaction.

  ●Suivre l'évolution saisonnière pour adapter les cultures selon la qualité.

XIV. **CONCLUSION :**

- L’analyse chimique des eaux souterraines de Meskiana révèle une variabilité spatiale et saisonnière importante. Si la majorité des eaux sont classées comme utilisables avec restrictions, des indices comme le SAR, le KR et le RSBC alertent sur des risques potentiels de dégradation des sols en cas d’usage prolongé sans contrôle. La mise en place d’un système de surveillance hydrochimique, associé à une gestion rationnelle de l’irrigation, apparaît indispensable pour préserver la durabilité des ressources en eau et la productivité agricole de la région.

Conclusion Générale :

- À travers cette étude hydrogéologique approfondie de la plaine de Meskiana, il ressort que cette dernière constitue un exemple représentatif d'un bassin hydrique en zone semi-aride, caractérisé par une complexité géologique et une variabilité hydroclimatique marquée, influençant directement la dynamique et la qualité des eaux souterraines. Les analyses géologiques et géophysiques ont mis en évidence un système aquifère hétérogène, contrôlé par des formations géologiques superposées aux propriétés hydrauliques contrastées, notamment les calcaires, les marnes ainsi que les structures tectoniques et diapiriques.
- Sur le plan hydrochimique, les résultats ont révélé une détérioration relative de la qualité des eaux, en particulier dans les zones aval, où prédominent des faciès chlorurés-calciques et sulfatés, accompagnés d'une minéralisation croissante et d'une conductivité électrique élevée, ce qui représente un risque potentiel pour les sols et l'agriculture locale.
- Les données climatiques et hydrologiques ont quant à elles confirmé la faible recharge naturelle de la nappe, due à la rareté des précipitations et à une évapotranspiration intense, entraînant un déséquilibre du bilan hydrique et une baisse progressive du niveau piézométrique.
- Sur la base de ces constats, nous proposons un ensemble de recommandations scientifiques et techniques visant à améliorer la gestion de la ressource et à renforcer la résilience du système hydrogéologique local :

- Réaliser une modélisation hydrogéologique numérique afin de simuler le comportement de la nappe face aux pressions climatiques et anthropiques, et d'en prévoir l'évolution future.
- Renforcer le réseau de suivi qualitatif et quantitatif des eaux souterraines à travers l'installation de stations de mesure régulières des paramètres physico-chimiques (pH, CE, Na^+, Cl^-, etc.).
- Étendre les campagnes de prospection géophysique (ERT, VLF...) pour mieux définir l'extension et la profondeur des formations aquifères, notamment dans les zones encore mal connues.
- Mettre en place des techniques de gestion durable des eaux, telles que la collecte des eaux pluviales et la recharge artificielle des nappes au niveau des zones d'infiltration naturelles.

- Promouvoir la recherche appliquée sur les interactions eau-roche, afin de mieux comprendre les mécanismes de minéralisation et l'évolution chimique des eaux souterraines.
- Sensibiliser et former les agriculteurs et les acteurs locaux à l'importance de la préservation des ressources en eau, à travers des pratiques agricoles adaptées aux contraintes hydrogéologiques du milieu.
- En conclusion, cette étude souligne l'urgence de développer une stratégie intégrée et interdisciplinaire impliquant chercheurs, institutions publiques et acteurs locaux pour préserver et valoriser durablement les ressources en eau souterraine de la plaine de Meskiana, face aux défis croissants du changement climatique et de la pression anthropique.

Bibliographie :

Reference :

ANONYME, (1973-1975) : Fiche technique des forages : A3, AL5, B10, B8, CD7 D1, E2, E5, K5, MK2, MK4, MK5.

DUROZOY G. (1956) : Carte géologique au 1/50 000 de Tébessa feuille 206, et sa notice Explicative

Référence pour une thèse :

GOUAIDIA L et al. (2004) : Application des méthodes statistiques pour expliquer le Chimisme de la nappe alluvionnaire de Meskiana. Colloque international Terre et Eau. Université d'Annaba 04,05& 06décembre 2004.

Gouaidia, L., 2008 : Influence de la lithologie et des conditions climatiques sur la variation des paramètres physico-chimiques des eaux d'une nappe en zone semi -aride, cas de la nappe de Meskiana Nord-est Algérien. Thèse de Doctorat Uni Annaba.

Référence pour un article de revue :

GOUAIDIA L.1, GUEFAIFIA O. 1, BOUDOUKHA A. 2 & HEMIL., 2013. Evaluation de la salinité des eaux souterraines utilisées en irrigation et risques de dégradation des sols : Exemple de la plaine de Meskiana, nord-est algérien. Géo-Eco-Trop n°37.page82

A.B.H, (2001) : Les cahiers de l'agence des bassins hydrographiques « A.B.H » ; « Le bassin versant Medjerda Mellague », N° 6. 24p.

Farhat, B., Ben mammou, A., 2001. Evolution récente de la Sebkhet Bou Zid (Nord Est du Cap Bon). IVème Congrès Maghrébin des Sciences de la Mer. Tunisie.

Halimi, A. (1981) : L'atlas blidéen "climat et étages végétaux", OPU, Alger, 623p.

Journal officiel, (1983) : Journal officiel de la République Algérienne du 08/02/1983. Loi n°83- 03 du 5 février 1983, relative à la protection de l'environnement.

Maneglier, H., (1991), Histoire de l'eau, du mythe à la pollution, Paris.

Perthuisot, J.P, 1995. La Sebkha El Melah de Zarzis. Genèse et évolution d'un bassin salin paralique. Trav. Lab. Géol. Ec. Norm. Supér, Paris 9, 252 p.

STUMM W., MORGAN J.J. (1981). Aquatic chemistry: an introduction emphazing chemical equilibra en natural waters, a Wiley-ineterscience publication, 780p.

Tricart, J., 1954. Une forme de relief climatique : Les Sebkhas, Rev. Géomorph .Dynam, 3 : 19 Vincent, V., Cours sur les eaux thermales, Université d'avignon LHA, France, 2006.

Yves, H., (2003), Cours de sédimentologie, 1re année licence Science de la Terre, Université Paul Sabatier, Toulouse. **Yves, L., (2010),** L'eau dans le monde : les batailles pour la vie, LAROUSSE, France.

Référence pour un mémoire :

RAHAL, Omar., juin 2015, Mise en évidence de l'origine de la salinité des eaux souterraines de la nappe de MESKIANA Nord Est algérien. Mémoire de fin d'étude (Magter 2 hydrogéologie).Uni Tébessa.

HAMAD OMAR, YOUSFI RABIAA ; 2004, Apport des applications statistiques sur l'explication du chimisme de la nappe alluviale de la plaine de Meskiana, Nord-Est Algérien. Mémoire de fin d'étude (Magter 2 hydrogéologie).Uni Tébessa.

CHOUGAR RIHAB LAZREG RADIA, juin 2019, L'état de minéralisation des eaux souterraines de la nappe de Meskiana et leur aptitude à l'irrigation. (Magter 2 hydrogéologie). Univ Tébessa.

Référence pour un livre :

CASTANY, G. (1967) : Traité pratique des eaux souterraines, Ed. Dunod, 551 p.

CASTANY, G. (1968) : Prospection et exploitation des eaux souterraines, Ed. Dunod, 683 p.
CASTANY, G. (1982) : Principes et méthodes de l'hydrogéologie, Ed. Dunod, 263 p.

CASTANY, G. et MARGAT, J. (1977) : Dictionnaire français d'hydrogéologie. Ed. BRGM, Orléans, 250 p.

Webo graphie:

http://fr.wikipedia.org

http:/www.Aureschaouia.free.fr

http:/www.articque.com

http:/www.CGM.com

http:/www.cig.ensmp.fr

http:/www.eleves.ens.fr

http:/www.hydrogéologie.com

http:/www.Scholar.google.com

http://www.u-picardie.fr

http://www.ifen.fr

https://www.climateengine.org/