



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي برج بوعرييرج

Université Mohammed El Bachir El Ibrahimi B.B.A

كلية علوم الطبيعة والحياة وعلوم الأرض والكون

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre et de l'Univers

قسم العلوم الفلاحية

Département des Sciences Agronomiques



## Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Domaine des Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences Agronomiques

Spécialité : Aménagement Hydro-Agricole

### Intitulé :

**Évaluation de la qualité physico-chimique des eaux souterraines à l'aide de l'indice de qualité des eaux (IQE) et d'un SIG – Cas de M'Sila**

Présenté par :

Alloune Chaima

Soutenu le 12/06/ 2023, Devant le Jury :

	Nom & Prénom	Grade	Affiliation / institution
<b>Président :</b>	Mme. CHOURGHAL Nacira	Pr	Faculté SNV-STU, Univ. de B.B.A.
<b>Encadrant :</b>	M. TIAIBA Mohammed	MCB	Faculté SNV-STU, Univ. de B.B.A.
<b>Examineur :</b>	Mme. SALAMANI Amel	MCB	Faculté SNV-STU, Univ. de B.B.A.

Année Universitaire 2023/2024

# Remerciements

*Je remercie en premier lieu et avant tout « Dieu » tout puissant, qui m'a aidé et donné le courage pour mener à bien ce modeste travail, et pour sa grâce tout au long de ma vie professionnelle et personnelle.*

*Nos sincères remerciements à notre encadrant, Mr. TIAIBA Mohammed., pour son aide et suivi constant et précieux et de bien vouloir accepter de nous diriger avec beaucoup de compréhension.*

*Nous remercions infiniment Mme. CHOURGHAL N., pour avoir accepté de présider notre jury, ainsi que Mme. SALAMANI A., pour avoir accepté d'évaluer notre travail.*

*Nous remercions également tous nos enseignants, nos collègues et les personnels de la faculté des sciences de la nature et de la vie et sciences de la terre et de l'univers.*

*A tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail, à tous ceux que nous aimons et qui nous aiment.*

*Alloune Chaima*

# Dédicace

Tout d'abord je remercie "ALLAH" le tout puissant pour m'avoir donnée la force nécessaire et le courage pour mener à bien ce travail, nous te prions de nous aider davantage à percer dans la recherche du savoir.

Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à ma **mère**...

A mon **père**, école de mon enfance, qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à me donner l'aide et à me protéger. Que dieu les garde et les protège.

## A mes très chers frères et sœurs

**Mossab, Omar, Yamna, Iman, Zina** que Dieu ait pitié d'elle, la rose du ciel et mon ange, et la douceur de la maison **Souha**, merci pour votre présence dans ma vie et de me soutenir chacun a votre manière.

A ma tante **Massouda** et sa fille mon amie de toujours **Aida**, je vous remercie toutes les deux pour l'amour sincère que vous m'avez donné et pour la sécurité et la chaleur que vous m'avez fait ressentir.

A mon âme à ma boussole que je trouvée après avoir perdu ma destination merci, je t'aime.

A mes amis avec qui ce beau voyage m'a rapproché, qui ont facilité les épreuves du chemin, merci pour tout ce que nous avons partagé entre les murs de cette université.

**Alloune Chaima**

# TABLE DES MATIERES

Introduction générale.....	01
----------------------------	----

## Chapitre I : Présentation de la zone d'étude

I.1. Introduction.....	02
I.2. Situation géographique .....	02
I.3. Le Relief.....	03
I.4. La géologie.....	03
I.5. Hydrographie .....	04
I.6. Données Climatiques .....	05
I.6.1. Température .....	05
I.6.2. Les précipitations .....	06
I.6.3. Le vent.....	07
I.6.4. L'humidité.....	07
I.7. Caractéristiques morphométriques et physiques du bassin versant d'étude .....	08
I.7.1. La surface .....	08
I.7.2. Le périmètre .....	09
I.7.3. La forme .....	09
I.7.4. Rectangle équivalent .....	11
I.7.5. Altimétrie et courbe hypsométrique .....	11
I.7.5.1. Hypsométrie du bassin.....	11
I.7.6. Les altitudes caractéristiques.....	12
I.7.6.1. Les altitudes maximale et minimale .....	12
I.7.6.2. Altitude moyenne ( $H_{moy}$ ) .....	13
I.7.6.3. Altitude médiane ( $H_{50\%}$ ) .....	14
I.7.6.4. Dénivelée simple (D).....	14
I.7.7. Indices de pente .....	14
I.7.7.1. L'indice de pente $I_p$ .....	14
I.7.7.2. Indice de pente globale ( $I_g$ ) .....	15
I.7.7.3. Dénivelée spécifique ( $D_s$ ).....	15
I.8. Caractéristiques du réseau hydrographique .....	16
I.8.1. Hiérarchisation du réseau .....	16
I.8.2. La longueur du cours d'eau principal.....	17
I.8.3. La densité de drainage.....	17
I.8.4. La densité hydrographique .....	18
I.8.5. Le rapport de confluence.....	19
I.8.6. Rapport des longueurs.....	19

I.8.7. Coefficient de torrentialité ( $C_T$ ) .....	20
I.8.9. Temps de concentration .....	20
I.8.10. Vitesse d'écoulement de l'eau ( $v_e$ ) .....	20
I.9. Conclusion .....	21

## **Chapitre II : Etude hydrochimique des eaux**

II.1. Introduction .....	22
II.2. Inventaire des points d'eau .....	22
II.2.1. Caractéristiques des points d'eau étudiés .....	22
II.3. Analyse de la balance ionique .....	24
II.4. Les principaux paramètres physico-chimiques.....	25
II.4.1. Etude des paramètres physiques .....	25
II.4.1.1. La température de l'eau .....	25
II.4.1.2. Le pH de l'eau .....	26
II.4.1.3. La conductivité électrique (CE) .....	27
II.4.1.4. La dureté de l'eau .....	28
II.4.2. Etude des paramètres chimiques .....	29
II.4.2.1. Le Calcium $Ca^{2+}$ .....	29
II.4.2.2. Le Magnésium $Mg^{2+}$ .....	30
II.4.2.3. Le Sodium $Na^+$ .....	31
II.4.2.4. Le Potassium $K^+$ .....	32
II.4.2.5. Les Chlorures $Cl^-$ .....	33
II.4.2.6. Les Nitrates $NO_3^-$ .....	34
II.4.2.7. Les Sulfates $SO_4^{2-}$ .....	35
II.5. Faciès chimique des eaux .....	36
II.5.1. Diagramme de Piper .....	37
II.6. Qualités des eaux .....	38
II.6.1. Qualité des eaux destinées à la consommation humaine .....	38
II.6.2. Calcul de l'indice de qualité de l'eau (IQE) .....	40
II.6.3. Résultats du calcul de l'indice IQE et évaluation de la qualité des eaux.....	41
II.6.4. Qualité des eaux destinées aux activités agricoles.....	43
II.7. Analyse en Composantes Principales (ACP).....	45
II.7.1. Etude des valeurs propres .....	46
II.8. Conclusion partielle.....	48
Conclusion générale.....	49

# Liste des tableaux

N°	Titre	Page
<b>Chapitre I</b>		
Tableau I.1	Caractéristique de la station météorologique de M'sila.	05
Tableau I.2	Les températures moyennes minimales et maximales (2006-2016).	06
Tableau I.3	La variation interannuelle des précipitations.	06
Tableau I.4	Dimensions du rectangle équivalent du bassin de M'sila.	11
Tableau I.5	Répartition des surfaces partielles par rapport aux altitudes.	12
Tableau I.6	Classification du relief (Ig).	15
Tableau I.7	Classification du relief (Ds).	16
Tableau I.8	Calcul de la densité Drainage.	18
Tableau I.9	Calcul de la densité hydrographique.	18
Tableau I.10	Calcul des rapports de confluence.	19
Tableau I.11	Calcul des rapports de la longueur.	20
<b>Chapitre II</b>		
Tableau II.1	Inventaire et caractéristiques piézométriques des points d'eau.	23
Tableau II.2	Résultats du calcul de la balance ionique des eaux souterraines de la zone d'étude.	25
Tableau II.3	Norme de potabilité de l'eau de point de vue physico-chimique et les résultats de la potabilité des eaux souterraines de la zone d'étude.	38
Tableau II.4	Classification et usage possible de l'eau selon l'IQE.	41
Tableau II.5	Valeur limite de la norme Algériennes de potabilisation.	41
Tableau II.6	Valeurs de l'indice IQE et classe de qualité des eaux souterraine de la région de M'Sila pendant la campagne de Février 2023.	42
Tableau II.7	Classification des eaux d'irrigation selon Richards.	43
Tableau II.8	statistiques descriptives des variables physicochimiques des eaux souterraines de la zone d'étude.	45
Tableau II.9	Matrice de corrélation des paramètres physicochimiques des eaux souterraines.	46

## Liste des figures

N°	Titre	Page
<b>Chapitre I</b>		
Figure I.1	Carte de situation de la zone d'étude.	02
Figure I.2	Carte géologique de la région de M'sila.	04
Figure I.3	Carte du réseau hydrographique de la plaine de M'Sila.	05
Figure I.4	Répartition mensuelles des températures moyennes au niveau de la région de M'Sila.	06
Figure I.5	Répartition mensuelles des précipitations au niveau de la région de M'Sila.	07
Figure I.6	Le bassin-versant du Hodna.	08
Figure I.7	Localisation du bassin versant de M'sila.	09
Figure I.8	aspect de l'hydrogramme observé en sortie de deux bassins de formes différentes soumis à des précipitations semblables.	10
Figure I.9	Variation de l'indice de Gravelius en fonction de la forme du bassin.	10
Figure I.10	Courbe hypsométrique du bassin versant de M'sila.	12
Figure I.11	Carte des tranches d'altitudes du bassin versant de M'sila.	13
Figure I.12	Hierarchisation du réseau hydrographique de BV de M'sila.	17
<b>Chapitre II</b>		
Figure II.1	Carte de positionnement des forages étudiés.	24
Figure II.2	Variabilité spatiale de la température des eaux souterraines dans la zone d'étude.	26
Figure II.3	Variabilité spatiale du pH des eaux souterraines dans la zone d'étude.	27
Figure II.4	Variabilité spatiale de la conductivité électrique des eaux souterraines dans la zone d'étude.	28
Figure II.5	Variabilité spatiale de la dureté des eaux souterraines dans la zone d'étude.	29
Figure II.6	Carte iso-teneurs du $Ca^{2+}$ .	30
Figure II.7	Carte iso-teneurs du $Mg^{2+}$ .	31
Figure II.8	Carte iso-teneurs du $Na^+$ .	32
Figure II.9	Carte iso-teneurs du $K^+$ .	33
Figure II.10	Carte iso-teneurs du $Cl^-$ .	34
Figure II.11	Carte iso-teneurs du $NO_3^-$ .	35
Figure II.12	Carte iso-teneurs du $SO_4^{2-}$ .	36
Figure II.13	Diagramme de Piper.	37
Figure II.14	pourcentage de qualité des eaux souterraine de la région d'étude.	42
Figure II.15	Présentation de l'aptitude des eaux de la zone d'étude à l'irrigation d'après le diagramme de Richard.	44
Figure II.15	Cercle de corrélation des différentes variables selon le plan factoriel (F1-F2).	47
Figure II.16	Répartition des stations dans le plan factoriel (F1-F2).	47

## Liste d'abréviation

<b>ACP</b>	Analyse en Composantes Principales
<b>ADE</b>	Algérienne Des Eaux
<b>BI</b>	Balance Ionique
<b>BV</b>	Bassin Versant
<b>CE</b>	Conductivité Electrique
<b>CMA</b>	Concentration Maximale Admissible
<b>C<sub>v</sub></b>	Coefficient de Variation
<b>DRE</b>	Direction des Ressources en Eau
<b>DSA</b>	Direction des Services Agricoles
<b>F</b>	Forage
<b>K<sub>G</sub></b>	Indice de forme de Gravelius
<b>MNT</b>	Modèles Numériques de Terrain
<b>NTU</b>	Nephelometric Turbidity Unit
<b>OMS</b>	Organisation Mondial de la Santé
<b>PAWM</b>	Plans d'Aménagement de la Wilaya de M'sila
<b>SAR</b>	Sodium Adsorption Ratio
<b>T</b>	Température
<b>TAC</b>	Titre Alcalimétrique Complet
<b>TH</b>	Titre Hydrométrique
<b>USGS</b>	United States Geological Survey

# Introduction générale

## **Introduction générale**

L'eau souterraine, souvent qualifiée de partie invisible du cycle hydrologique, joue un rôle vital dans la fourniture d'eau pour une multitude d'usages, de la consommation humaine à l'irrigation agricole en passant par l'industrie et les écosystèmes aquatiques. Sa qualité est généralement excellente, en grande partie due à sa protection contre la contamination grâce à son stockage dans des couches souterraines, parfois à des profondeurs considérables (**Custodio, 2002**).

La composition chimique et la concentration des eaux souterraines dépendent en partie des propriétés des eaux de surface et des précipitations, ainsi que des processus physicochimiques dans l'aquifère. Ces processus peuvent augmenter ou diminuer la concentration des substances dissoutes au cours de leur cheminement souterrain (**Todd et Mays, 2005**).

La qualité physicochimique des eaux souterraines est influencée par plusieurs facteurs, notamment les concentrations de polluants dans les eaux usées, la nature des sols, la lithologie, la perméabilité de l'aquifère exploité, la profondeur de la nappe et les variations saisonnières (**Freeze et Cherry, 1979**). De plus, les activités humaines ont un impact significatif sur cette qualité, soulignant ainsi l'importance de l'évaluation continue de la qualité des eaux souterraines.

L'évaluation de la qualité physicochimique des eaux souterraines est essentielle pour assurer leur utilisation durable pour les générations futures. Pour ce faire, il est crucial de surveiller en permanence la qualité des eaux souterraines, de comprendre les facteurs qui l'influencent, et de mettre en place des mesures de prévention et de remédiation adaptées. Ce mémoire examine en détail ces aspects, ainsi que les impacts de la qualité des eaux souterraines sur la santé humaine, l'environnement et le développement durable.

Cette étude a pour objectif principal l'étude de données physicochimiques acquises en 2023 des eaux souterraines de la région de M'sila, avec pour intention une meilleure compréhension de la qualité de ces eaux selon leurs faciès chimiques, et les phénomènes qui se produisent dans les systèmes aquifères. Cette étude est structurée en deux chapitres principaux :

- Le chapitre I donne une présentation de la région d'étude.
- Le deuxième chapitre sera consacré à l'étude hydrochimique des eaux souterraines par le calcul de l'indice de qualité des eaux (IQE) et l'utilisation des diagrammes (Piper, Riverside...) et l'application d'une méthode statistique en utilisant le logiciel XLSTAT, telle que, l'Analyse en Composantes Principales (ACP) pour une visualisation plus complète des résultats d'analyses.

En fin, nous terminerons ce travail par une conclusion générale résumant les principaux résultats obtenus et quelques recommandations utiles pour les travaux futurs.

# Chapitre I

## Présentation de la zone d'étude

## Chapitre I: Présentation de la zone d'étude

### I.1. Introduction

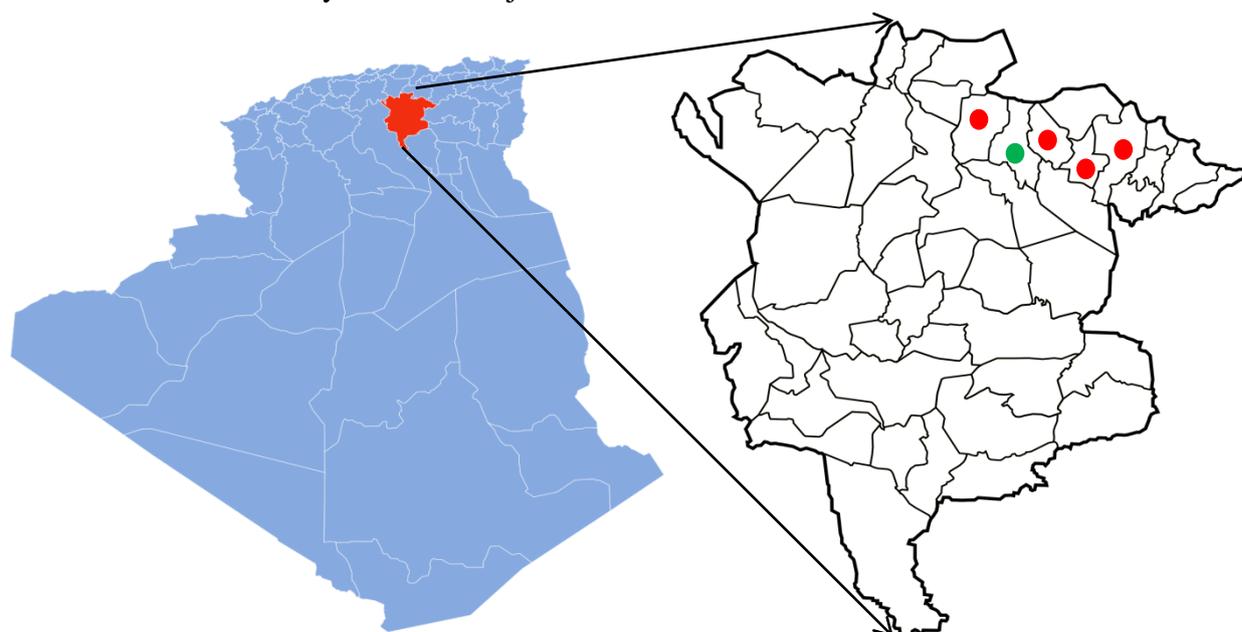
Ce chapitre est une synthèse des caractéristiques géographiques, hydrographiques, climatiques, géologiques et morphométrique de la région de M'sila.

### I.2. Situation géographique

La wilaya du M'sila fait partie du bassin versant du Hodna, elle est située au Sud- Est d'Alger à 248 Km de la mer (Golfe de Bejaia) derrière l'écran montagneux des chaines de l'Atlas tellien (Djurdjura, Bibans, Babors) et les crêtes des monts du Hodna (**Hadjab, 1998**).

La wilaya de M'sila, dans ses limites actuelles, occupe une position privilégiée dans la partie centrale de Nord Algérien. Elle fait partie de la région des Hauts Plateaux du centre et s'étend sur une superficie de 18 175 km<sup>2</sup>. Elle compte aujourd'hui 47 communes, regroupées en 15 daïra (Carte 1), comptant une population d'environ 1, 210,925 habitants. (D.S.A M'sila, 2023). Elle est limitée par :

- \*Au Nord Est: les wilayas de Bordj Bou-Argeridj et Sétif
- \*Au Nord Ouest : les wilayas de Médéa et Brouira
- \*A l'est : la wilaya de Batna
- \*A l'ouest : la wilaya de Djelfa
- \* Au Sud Est : la wilaya de Ouled Djellal



#### Légende

- Wilaya de M'Sila
- Commune de M'Sila
- Zone d'étude

Figure I.1 : Carte de situation de la zone d'étude

### **I.3. Le Relief**

La plaine du Hodna est située dans une dépression à une altitude moyenne de 400 m. Les hautes plaines se trouvant à partir de 500 m d'altitude, occupent près de 65% de la superficie de la wilaya. Au sud de l'Atlas tellien, l'ensemble des Hautes plaines offre un paysage de steppes unique; à l'Ouest ces steppes s'étirent sur près de 500 Km sur une largeur de 100 Km à 200 Km; et à l'Est, elles s'étendent sur près de 200 Km, et en raison d'un relief plus élevé (800 m à 1000 m) on parle plutôt de Hauts plateaux. C'est une région de transition où l'élevage des ovins y est la principale activité (**Kabache et Rahabi, 2023**).

### **I.4. La géologie**

La géologie des terrains influe non seulement sur l'écoulement de l'eau souterraine, mais également sur le ruissellement des surface à travers l'étude de la perméabilité des formation lithologique. Celle-ci intervient sur la vitesse de montée des crues, sur leur volume, ainsi que sur l'aggravation du phénomène d'inondation et par conséquent l'érosion et le transport des sédiments. Les caractères géologique principaux à considérer sont la lithologique et la structure tectpnique (**Bebba, 2018**).

Le bâti géologique de Hodna comporte essentiellement des formations d'âges secondaires, tertiaires, et quartenaires (**P.A.W.M, 2010**). Et selon Le Houerou et Selon Claudin, 1972. La plain alluvial du hodna couvre une superficie de 4500 Km<sup>2</sup> dans le bassin endoréique Hodnien, entre les piémonts de l'atlas saharien au sud et à l'ouest, de l'atlas tellien de Nord, et ce des Aurès à l'Est les études géologiques et géophysiques indiquant que la ville de M'sila est caractérisés par la présence d'un remplissage détritique très hétérogènes, date du Moi-piloquartenaire, constitue de sable, gravier et galets dans une matrice argilo-limoneuse. La géologie d'EL Hodna se caractérise par :

Le secondaire

- a. Trias : présente une lithologie composée de marnes et sels
- b. Jurassique : n'affleure qu'à la faveur d'accidents majeurs dans la partie orientale des monts des Hodna, Il est caractérisé par la présence de calcaire.
- c. Crétacé : il forme par des bains de marnes et de grés avec interaction de calcaire.

Le traitre

- a. Eocène : les formations paléogènes affleurent en bandes plus ou moins parallèle sur le plan méridional des mots du hodna.il est présente par des grés rouges, des arilles varices, des calcaires et des conglomérats.

b. Oligocène continentale : il est formé par des conglomérats, des grès fins friables et des marnes rougeâtres.

c. Miocène : il est constitué d'une alternance de marnes gypseuses avec des grès et calcaire.

Le quaternaire

Est présent par d'anciennes alluvions et des sédiments fins. Nos sites font partie du quaternaire voir figure (I.2)

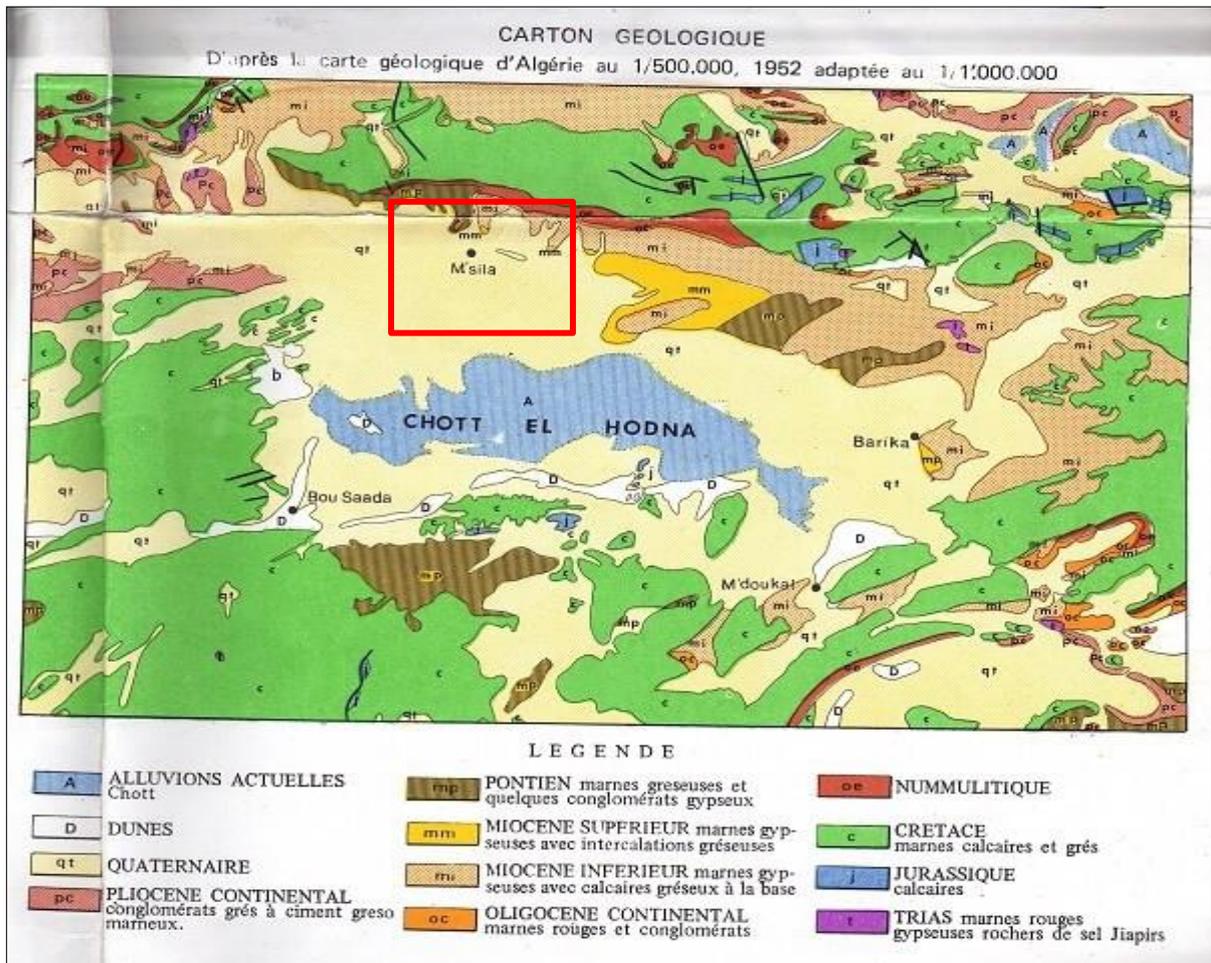
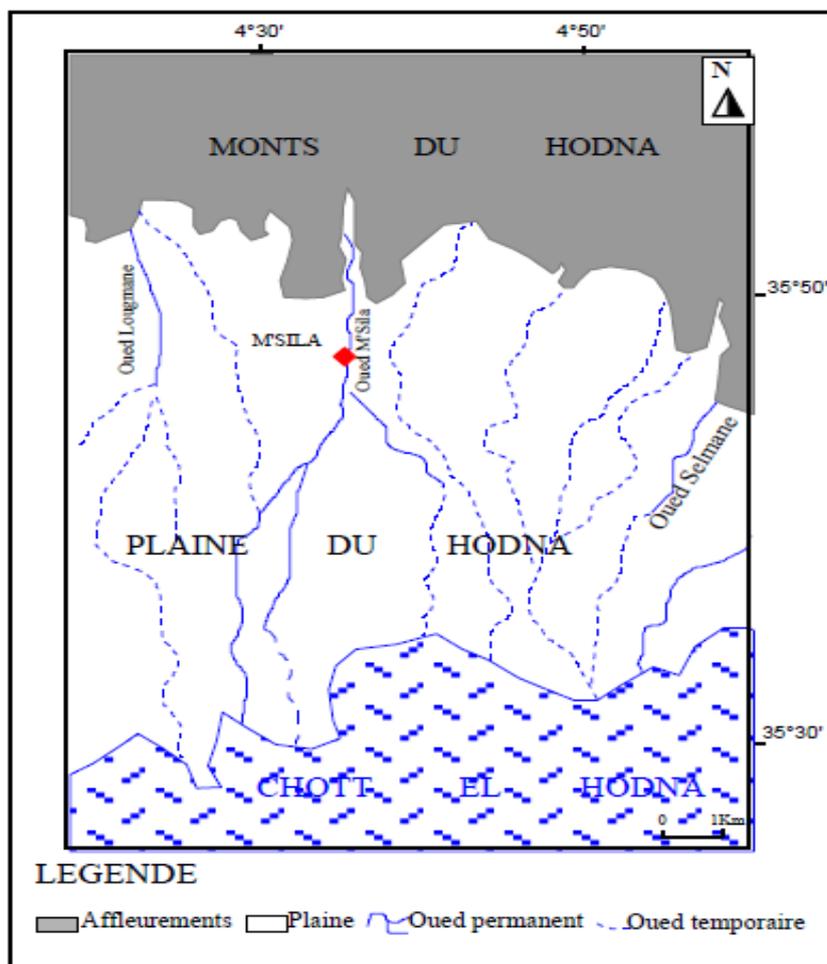


Figure I.2 : Carte géologique de la région de M'sila (Le Houerou et Claudin, 1972)

## I.5. Hydrographie

Le réseau hydrographique est diversifié, mais il se distingue par sa dégradation. Les principaux cours d'eau dans ce bassin endoréique, sont ceux issus des massifs montagneux telliens : le K'Sob, M'Sila qui sont d'ailleurs les seuls oueds pérennes (Figure I.3). Chaque oued draine une aire plus ou moins étendue. Les autres cours d'eau (Lougmane, Selmane,...) nombreux mais drainant une superficie réduite, ne coulent qu'après les fortes pluies, pour se tarir totalement les journées, voir les heures qui suivent.



**Figure I.3 :** Carte du réseau hydrographique de la plaine de M'Sila (Amroune, 2018)

## I.6. Le Climat

La station Météorologique de Ghzel est située à environ 9 Km au sud du centre de la ville de M'sila, sur la rive droite d'Oued M'sila. Les coordonnées géographiques de la station sont indiquées au tableau suivant :

**Tableau I.1 :** Caractéristique de la station météorologique de M'sila

Nom	Latitude	Longitude	Altitude(m)
Ghzel	35°40'N	04°30'E	441m

Les principaux paramètres climatiques de la ville de M'sila ont été déterminés à partir de l'exploitation des données enregistrées au niveau de la station météorologique de M'sila.

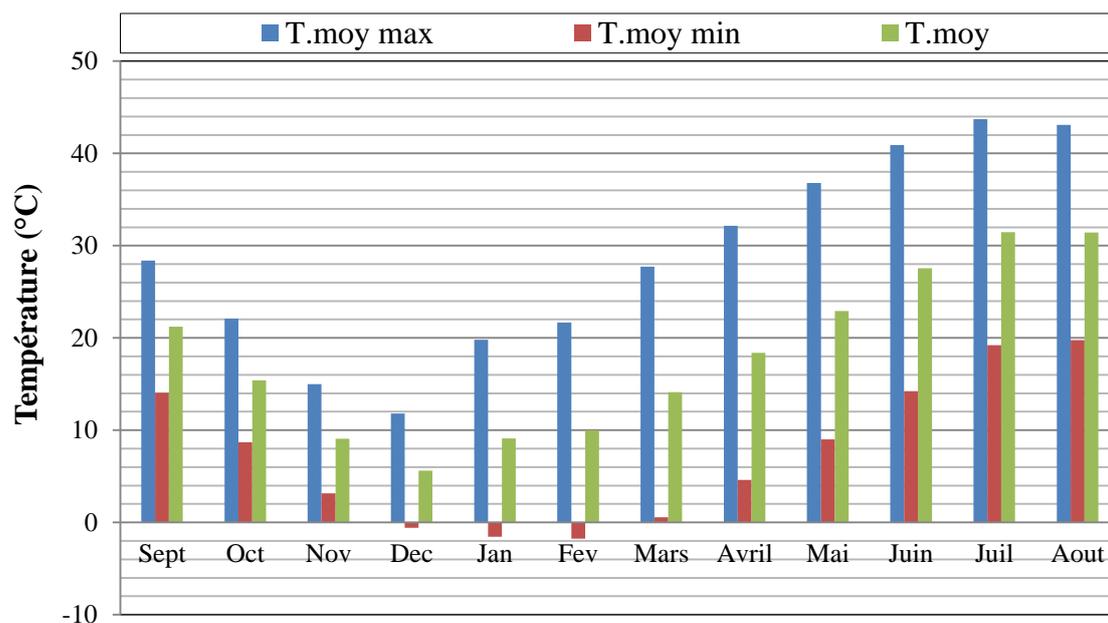
### I.6.1. Température

La température est un facteur écologique limitant de première importance car elle intervient, d'une part, dans l'étude hydro-climatique d'une région et d'autre part, elle contrôle l'ensemble

des phénomènes métaboliques et conditionne, de ce fait, la répartition des espèces animales et végétales (Ramade, 1984).

**Tableau I.2 :** Les températures moyennes minimales et maximales (2006-2016)

Température	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Moy
T.moy max (°C)	28,4	22,1	15	11,8	19,79	21,68	27,72	32,16	36,8	40,91	43,7	43,08	28,6
T.moy min (°C)	14,05	8,71	3,17	-0,59	-1,55	-1,76	0,55	4,6	9,01	14,22	19,21	19,77	7,4
T.moy (°C)	21,22	15,40	9,08	5,60	9,12	9,96	14,13	18,38	22,90	27,56	31,45	31,42	18,0



**Figure I.4 :** Répartition mensuelles des températures moyennes au niveau de la région de M'Sila (2006-2016)

D'après la figure, on constate que le mois de Février est le plus froid avec un minimum de -1,76 °C, alors que le mois le plus chaud est le mois de juillet, avec un maximum de moyen de 43,7 °C.

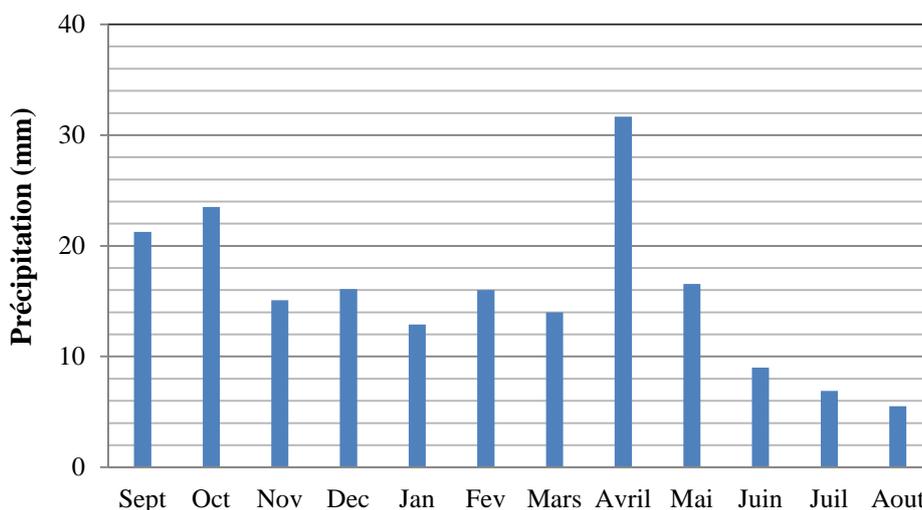
### 1.6.2. Les précipitations

La précipitation est la totalité de la lame d'eau quantifiée par un pluviomètre ou un pluviographe, elle englobe l'ensemble des eaux météorologiques : pluie, grêle ...etc.

Les précipitations pour la station météorologique de M'sila s'étale sur la période allant de 2006 à 2016.

**Tableau I.3 :** La variation interannuelle des précipitations (2006-2016)

Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Totale
P (mm)	21,27	23,5	15,1	16,11	12,9	16	14	31,67	16,55	9	6,89	5,5	188,5



**Figure I.5 :** Répartition mensuelles des précipitations au niveau de la région de M'Sila

D'après le tableau nous notons que le mois d'Avril a les précipitations les plus élevées 31,67 mm, par contre la moyenne mensuelle la plus faible est enregistrée pendant le mois d'Aout 5,5 mm.

### ***1.6.3. Le vent***

Le vent est un phénomène continuels au désert ou il joue un rôle considérable en provoquant une érosion intense grâce à la particule sableuse qu'il transporte (**Ramade, 2003**). Les vents dominants qui soufflent dans la région de M'sila sont :

Le vent d'ouest, dit dhahraoui est pluvieux, il est fréquent en automne, en hiver et au printemps. Le vent du Nord (N) ; est dit Bahri est moins fréquent, il est froid et sec. Les vents à directions variable (Var), qui souffle surtout pendant les saisons sèches. Le siroco : vent chaud et sec, souffle général du sud, il entrave le développement des cultures il constitue la cause du faible tapis végétal dans la wilaya de m'sila pour ce que les vents chauds et secs accentuent le dessèchement des substrats et limite l'installation de la végétation (**Ramade, 2003**).

Les vents du Nord sont fréquents pendant l'hiver, alors que ceux du Nord - est bien repartis toute l'année accèdent facilement dans la cuvette du Hodna par la vallée de l'oued Barika. Ceux du sud n'atteignent le Hodna qu'en été, période durant laquelle ils soufflent avec des rafales brûlantes. Les vents soufflent à leurs maximums pendant le mois d'octobre avec 3,69 m/s. le Sirocco qui sévit à partir du printemps accroît le déficit hydrique des cultures (**Benselama, 2023**).

### ***1.6.4. L'humidité***

L'humidité relative moyenne mensuelle prend une valeur de 35 % au mois de juillet qui est considéré comme le mois le plus sec alors que le plus humide est décembre avec une valeur de 75,62 % (**Benselama, 2023**).

## I.7. Caractéristiques morphométriques et physiques du bassin versant d'étude

Notre zone d'étude est une partie du sous bassin (10) du grand bassin versant "Hodna" (05) (Figure I.6).



**Figure I.6 :** Le bassin-versant du Hodna

L'étude ou l'analyse morphométrique du bassin versant sont présentés dans la partie suivante. La méthodologie de calcul inclut les caractéristiques importantes du bassin versant, la superficie, le périmètre, le coefficient de forme, l'ordre des cours d'eau, la densité du drainage, la pente moyenne du bassin versant, la pente du lit principal, etc.

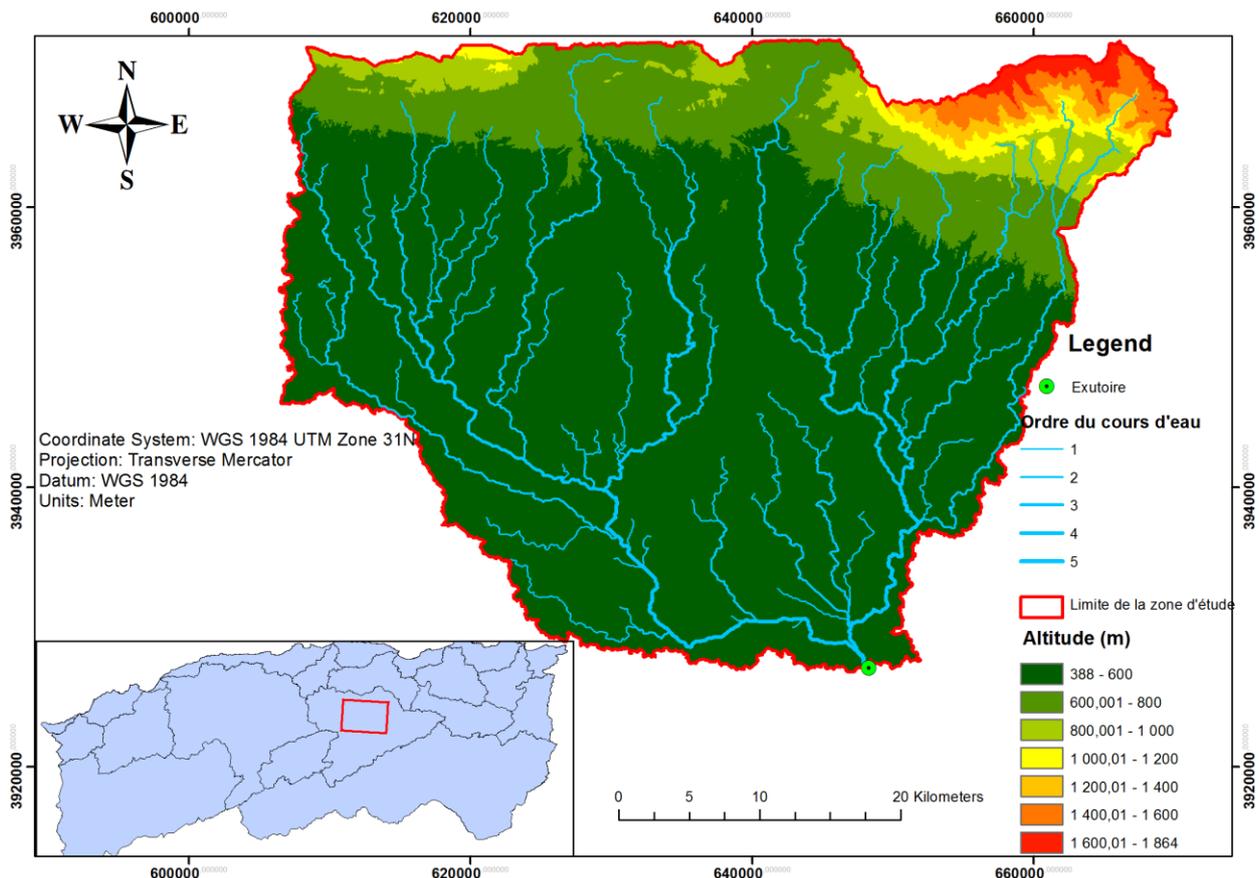
Les différents paramètres sont mesurés à l'aide du logiciel ArcGis, utilisé dans les systèmes d'informations géographiques, et aussi à l'aide des modèles numériques de terrain MNT (avec une résolution de 30 mètres) établis par l'Institut d'études géologiques des États-Unis (USGS).

### I.7.1. La surface

Le bassin versant (BV) est l'aire de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau. Les débits vont donc être en partie reliés à sa surface, correspondant à l'aire délimitée par l'ensemble des points les plus hauts qui constituent la ligne de partage des eaux. Sa surface (A) exprimée en km<sup>2</sup>, peut être déterminée à l'aide d'un planimètre ou par les techniques de digitalisation (Global Mapper – Map Info, Arc Gis...). La surface du bassin versant étudié a été mesurée grâce au logiciel ArcGis. Elle est de l'ordre **2030,5 km<sup>2</sup>**.

### 1.7.2. Le périmètre

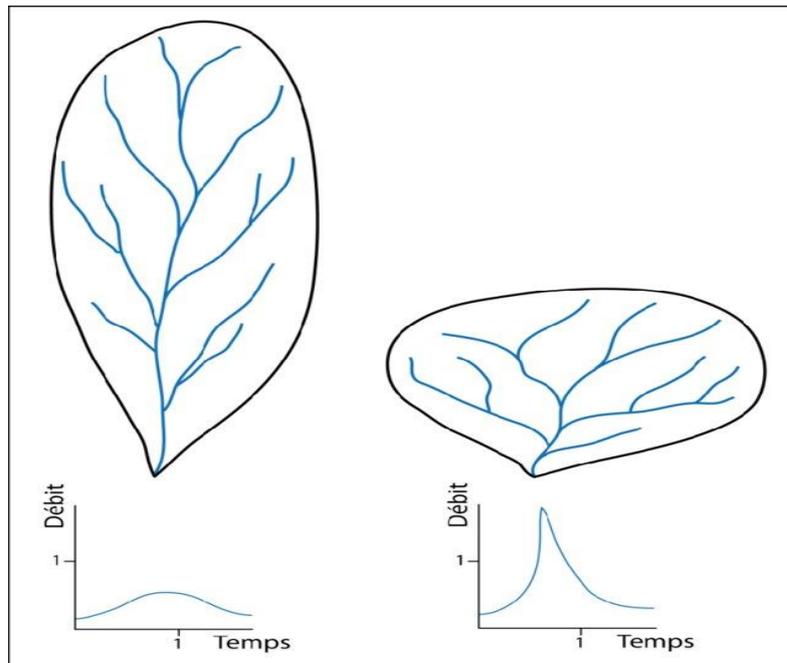
Le périmètre représente toutes les irrégularités du contour ou de la limite du bassin versant. Il est exprimé en km. Le contour du bassin est constitué par une ligne joignant tous les points les plus élevés. Il n'influence pas l'état d'écoulement du cours d'eau au niveau du bassin versant. Le périmètre peut être mesuré à l'aide d'un curvimètre ou automatiquement par des logiciels cités précédemment. Le périmètre mesuré par ArcGis est de **270,3 km**.



**Figure I.7 :** Localisation du bassin versant de M'sila

### 1.7.3. La forme

La forme d'un bassin versant influe sur la réponse hydrologique, notamment sur la forme de l'hydrogramme produit à l'exutoire du bassin. Sur un bassin allongé, l'eau ruissellera sur des chemins plus longs et donc aura besoin de plus de temps pour arriver à la sortie du bassin que si le bassin versant à forme ramassée. Inversement, un bassin versant en forme compact a un temps de concentration plus rapide, ce qui entraîne un temps de concentration des eaux plus court et un débit de pointe plus élevé (Sassolas-Serrayet *et al.*, 2018).



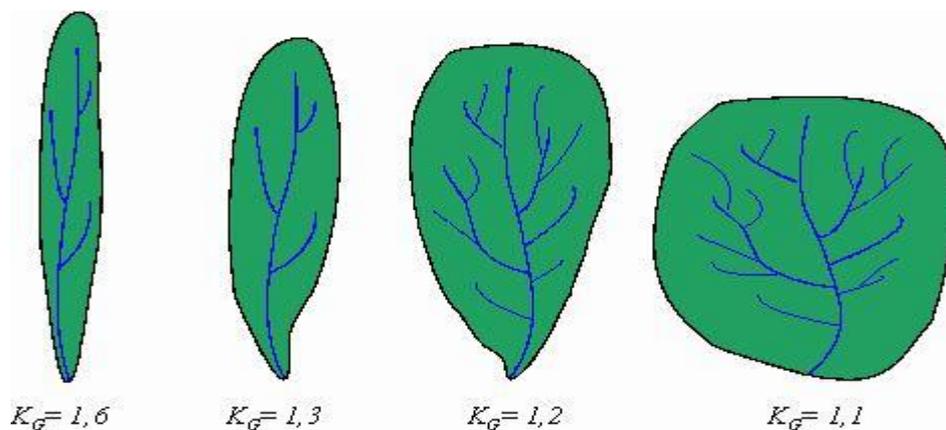
**Figure I.8 :** aspect de l'hydrogramme observé en sortie de deux bassins de formes différentes soumis à des précipitations semblables (Musy *et al.*, 2009)

Divers indices morphologiques peuvent être utilisés pour caractériser les débits et comparer différents bassins versants. L'indice de forme de (Gravelius, 1914),  $K_C$ , compare le périmètre d'un bassin versant au périmètre d'un cercle de même surface. Il est exprimé par l'équation suivante :

$$K_C = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \cong 0,28 \times \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Où  $K_C$  est l'indice de forme de Gravelius,  $A$  est la superficie du bassin versant [ $\text{km}^2$ ], et  $P$  est le périmètre du bassin versant [ $\text{km}$ ].

L'indice est proche de 1 pour un bassin versant de forme circulaire et supérieure à 1 pour un bassin versant de forme allongée (figure I.9)



**Figure I.9 :** Variation de l'indice de Gravelius en fonction de la forme du bassin

Pour notre cas, le  $K_C = 1,68 \rightarrow$  le bassin versant est de forme allongée.

### 1.7.4. Rectangle équivalent

C'est le rectangle de longueur  $L_r$  et de largeur  $l_r$  qui a la même surface et le même périmètre que le bassin versant. Le bassin versant rectangulaire résulte d'une transformation géométrique du bassin réel dans laquelle on conserve la même superficie, le même périmètre (ou le même coefficient de compacité), et donc par conséquent la même répartition hypsométrique. Les courbes de niveau deviennent des droites parallèles au petit côté du rectangle. La climatologie, la répartition des sols, la couverture végétale et la densité de drainage restent inchangées entre les courbes de niveau. En 1963, Roche a établi deux relations relatives aux dimensions du rectangle équivalent, dont les dimensions sont données par les relations suivantes :

$$L_r = \frac{K_c \sqrt{S}}{1,12} \left\{ 1 + \sqrt{1 - \left\{ \frac{1,12}{K_c} \right\}^2} \right\}$$

$$l_r = \frac{K_c \sqrt{S}}{1,12} \left\{ 1 - \sqrt{1 - \left\{ \frac{1,12}{K_c} \right\}^2} \right\}$$

Pour notre cas, nous obtenons :

$$L_r = 117,97 \text{ km} \quad l_r = 17,21 \text{ km}$$

**Tableau I.4 :** Dimensions du rectangle équivalent du bassin de M'sila

Surface partielles (Xi) (km <sup>2</sup> )	Longueurs partielles Li (km)	Largeur lr (km)	Longueur L <sub>r</sub> (km)
1529,16	88,842	17,212	117,972
304,68	17,702		
91,46	5,314		
31,01	1,802		
23,39	1,359		
32,32	1,878		
18,51	1,075		

### 1.7.5. Altimétrie et courbe hypsométrique

#### 1.7.5.1. Hypsométrie du bassin

Les caractéristiques du système altimétrique jouent un rôle important dans la description d'un bassin versant et la compréhension de son comportement hydrologique, car la principale force qui affecte l'écoulement de surface est la gravité. Et, de ce fait, plusieurs processus hydrologiques dépendent directement des caractéristiques altimétriques. De même, les conditions climatiques locales sont influencées par la variabilité altimétrique et de l'écoulement résultant d'un événement pluvieux (Musy et Higy, 2004).

Tableau I.5 : Répartition des surfaces partielles par rapport aux altitudes

Classes d'altitudes (m)	surface (Km <sup>2</sup> )	% Surface	Surface cumulée %	(%) au-dessus de la limite inférieure	Altitude (m)
388 - 600	1529,16	75,31	75,31	100,00	388
600 - 800	304,68	15,01	90,31	24,69	600
800 - 1000	91,46	4,50	94,82	9,69	800
1000 - 1200	31,01	1,53	96,34	5,18	1000
1200 - 1400	23,39	1,15	97,50	3,66	1200
1400 - 1600	32,32	1,59	99,09	2,50	1400
1600 - 1864	18,51	0,91	100,00	0,91	1600
total	2030,53	100,00		0,00	1887

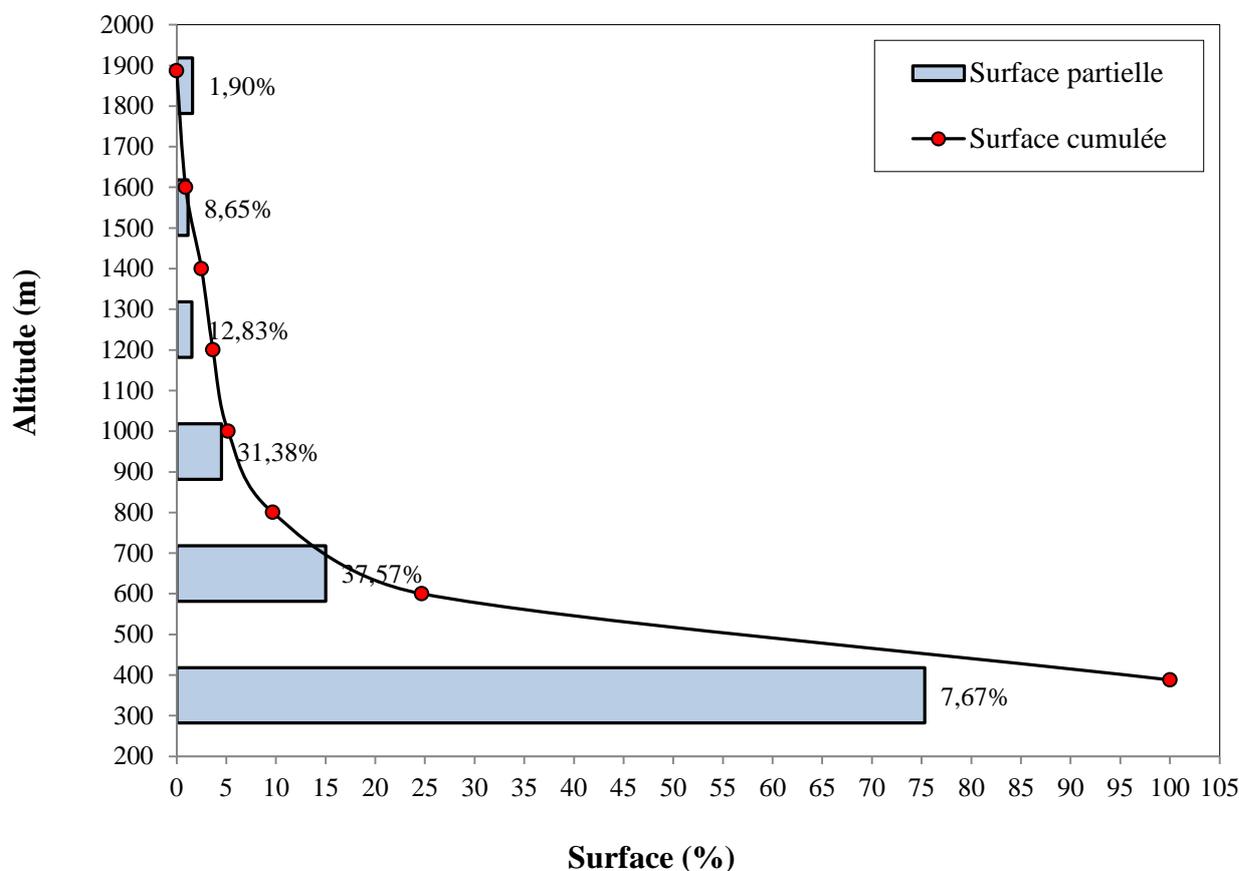


Figure I.10 : Courbe hypsométrique du bassin versant de M'sila

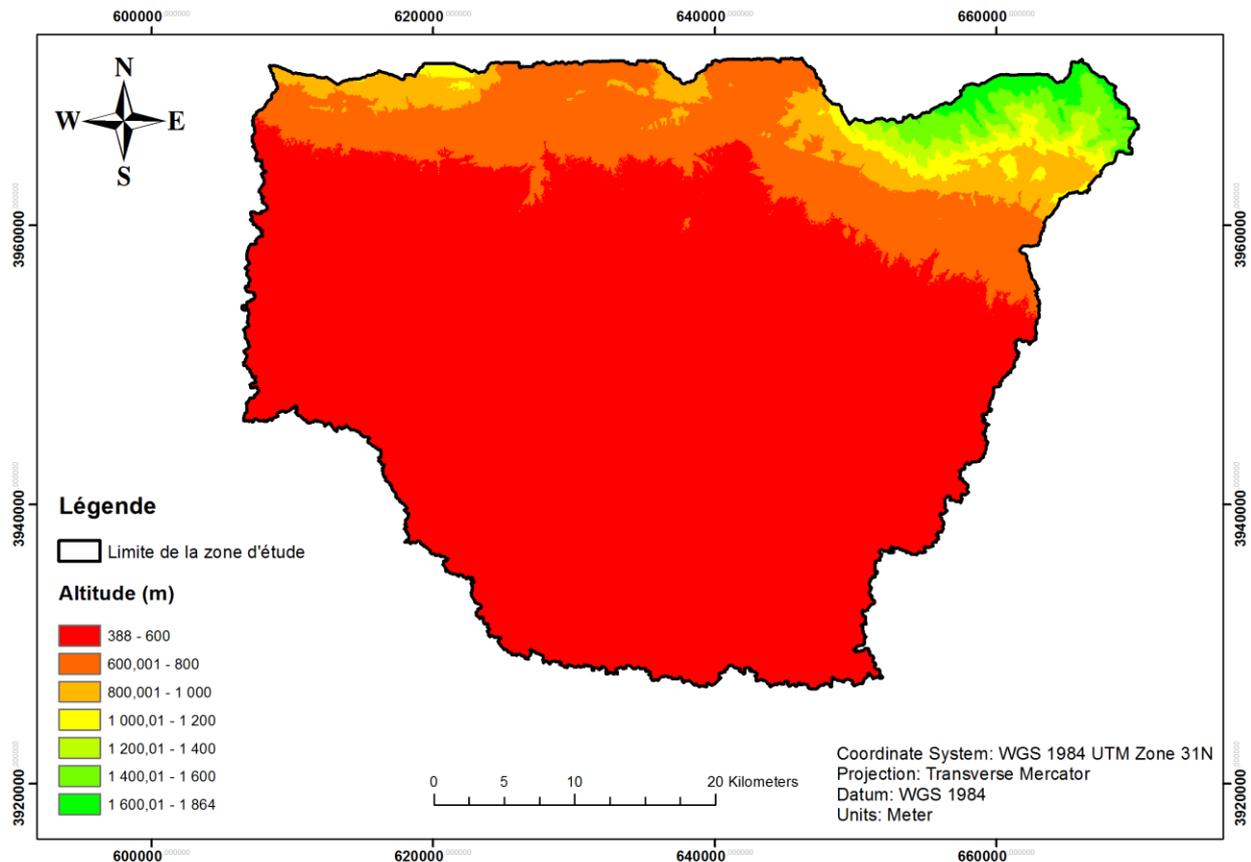
### I.7.6. Les altitudes caractéristiques

#### I.7.6.1. Les altitudes maximale et minimale

L'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin tandis que l'altitude minimale considère le point le plus bas, généralement à l'exutoire. Ces deux données deviennent surtout importantes lors du développement de certaines relations faisant intervenir des variables climatologiques tels que la température, la précipitation et le couvert neigeux. Elles déterminent l'amplitude altimétrique du bassin versant et interviennent aussi dans le calcul de la pente.

Pour notre cas :

- L'altitude minimale est : **H<sub>min</sub> = 388 m**
- L'altitude maximale est : **H<sub>max</sub> = 1864 m**



**Figure I.11** : Carte des tranches d'altitudes du bassin versant de M'sila

### I.7.6.2. Altitude moyenne ( $H_{moy}$ )

L'altitude moyenne est peu représentative de la réalité. Toutefois, elle est parfois utilisée dans l'évaluation de certains paramètres hydrométéorologiques ou dans la mise en œuvre de modèles hydrologiques. Elle se déduit directement de la courbe hypsométrique ou de la lecture d'une carte topographique. On peut la définir comme suit :

$$H_{moy} = \frac{A_i H_i}{A_t}$$

$H_i$  : Altitude moyenne de chaque classe en mètre ;

$A_i$  : Surface partielle des tranches d'altitude en Km<sup>2</sup> ;

$A_t$  : Surface totale sous bassin en km<sup>2</sup>.

Altitudes (m)	H <sub>i</sub> (m)	A <sub>i</sub> (km <sup>2</sup> )	(A <sub>i</sub> H <sub>i</sub> )/A <sub>t</sub>
388 - 600	494	1529,16	372,02
600 - 800	700	304,68	105,03
800 - 1000	900	91,46	40,54
1000 - 1200	1100	31,01	16,80
1200 - 1400	1300	23,39	14,97
1400 - 1600	1500	32,32	23,88
1600 - 1864	1732	18,51	15,79
Somme		2030,53	589,03

Pour notre cas, **H<sub>moy</sub> = 589,03 m**.

### **I.7.6.3. Altitude médiane (H<sub>50%</sub>)**

L'altitude médiane correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique (figure I.10). Cette grandeur se rapproche de l'altitude moyenne dans le cas où la courbe hypsométrique du bassin concerné présente une pente régulière. L'altitude médiane dans le bassin versant de M'sila est égale à : **H<sub>50%</sub> = 520 m**

### **I.7.6.4. Dénivelée simple (D)**

Sur la courbe hypsométrique tracée, on prend la distance verticale en (m), qui sépare les altitudes ayant 5 % et 95 % de la surface totale du sous bassin versant. Ils peuvent être estimés par interpolation linéaire à partir du tableau altimétrique (Tableau I.5), Pour notre cas :

- La hauteur à 5 % de la surface totale est : **H<sub>5%</sub> = 1020 m**
- La hauteur à 95 % de la surface totale est : **H<sub>95%</sub> = 390 m**

$$D = H_{5\%} - H_{95\%} = 630 \text{ m}$$

### **I.7.7. Indices de pente**

L'objet de ces indices est de caractériser les pentes d'un bassin et de permettre des comparaisons et des classifications.

#### **I.7.7.1. L'indice de pente I<sub>p</sub>**

M. ROCHE a proposé un indice de pente plus facile à calculer que le précédent : I<sub>p</sub> est la moyenne de la racine carrée des pentes mesurées sur le rectangle équivalent, et pondérée par les surfaces.

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{Lr}} \sum_{i=1}^n \sqrt{X_i (a_i - a_{i-1})}$$

Avec :

$I_p$  : Indice de pente (%) ;

$L_r$  : Longueur du rectangle équivalent (m) ;

$X_i$  : Portion de la surface du bassin comprise entre les courbes de niveau, côte  $a_i$  et  $a_{i-1}$  (%) ;

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

Pour notre cas,  $I_p = 0,81 \%$

### 1.7.7.2. Indice de pente globale ( $I_g$ )

L'indice de pente globale est déterminé à partir de la courbe hypsométrique en éliminant les valeurs extrêmes, de manière à ne garder que 90 % de l'aire du sous bassin. Cet indice est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$I_g = D / L_r$$

Avec :

$D$  : Dénivelée simple en (m) ;

$L_r$  : Longueur du rectangle équivalent (km).

Pour notre cas,  $I_g = 5,340 \text{ m/km} = 0,0053$

**Tableau I.6 : Classification du relief ( $I_g$ )**

Relief très faible	$I_g < 0,002$
Relief faible	$0,002 < I_g < 0,005$
Relief assez faible	$0,005 < I_g < 0,01$
Relief modéré	$0,01 < I_g < 0,02$
Relief assez fort	$0,02 < I_g < 0,05$
Relief fort	$0,05 < I_g < 0,1$
Relief très fort	$0,1 < I_g$

D'après la classification du relief par L'ORSTOM (*Office de Recherche Scientifique de Territoire d'Outre-Mer*),  $I_g$  étant compris entre 5 et 10 m/km, le sous bassin versant présente un relief assez faible.

### 1.7.7.3. Dénivelée spécifique ( $D_s$ )

La dénivelée spécifique permet de se prononcer sur le relief suivant la classification d'ORSTOM (Tableau I.5). L'indice  $I_g$  décroît pour un même bassin, lorsque la surface augmente, il est donc difficile de comparer des bassins de taille différente, d'où la nécessité d'introduire le paramètre ( $D_s$ ).

$$D_s = I_g \times [A]^{1/2} \rightarrow D_s = 240,6 \text{ m}$$

D'après la deuxième classification de l'ORSTOM, la dénivelée spécifique du BV se trouve dans la classe R5, caractérisée par un relief assez fort.

**Tableau I.7 : Classification du relief (Ds)**

R1	Relief très faible	Ds < 10 m
R2	Relief faible	10 m < Ds < 25 m
R3	Relief assez faible	25 m < Ds < 50 m
R4	Relief modéré	50 m < Ds < 100 m
R5	Relief assez fort	100 m < Ds < 250 m
R6	Relief fort	250 m < Ds < 500 m
R7	Relief très fort	500 m < Ds

### I.8. Caractéristiques du réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est constitué de l'ensemble des chenaux qui drainent les eaux de surface vers l'exutoire du bassin versant. Le réseau hydrographique peut se caractériser par trois éléments :

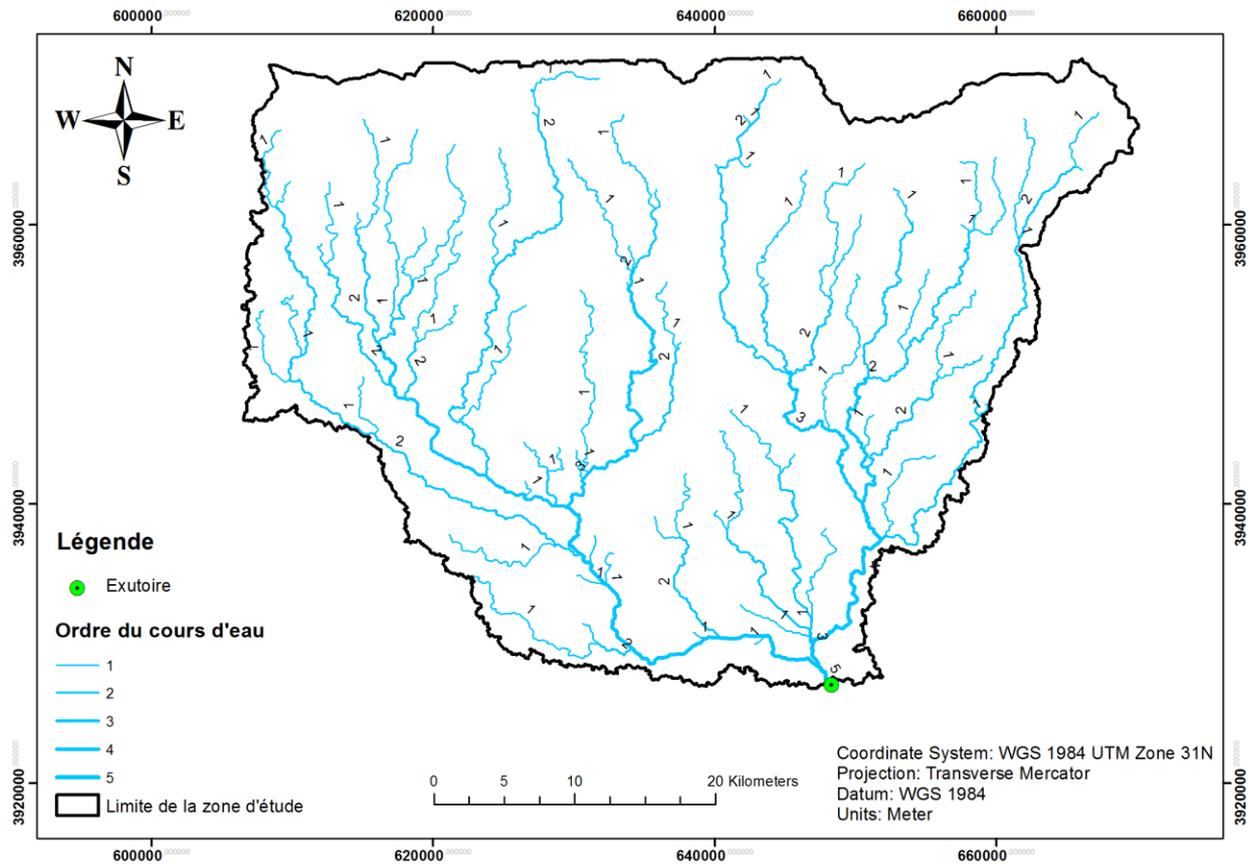
- Sa hiérarchisation ;
- Son développement (nombres et longueurs des cours d'eau) ;
- Et son profil en long.

#### I.8.1. Hiérarchisation du réseau

Pour chiffrer la ramification du réseau, chaque cours d'eau reçoit un numéro fonction de son importance. Cette numérotation, appelée ordre du cours d'eau, diffère selon les auteurs. Parmi toutes ces classifications, nous adopterons celle de Strahler :

- Tout cours d'eau n'ayant pas d'affluent est dit d'ordre 1 ;
- Au confluent de deux cours d'eau de même ordre  $n$ , le cours d'eau résultant est d'ordre  $n+1$ ;
- Un cours d'eau recevant un affluent d'ordre inférieur garde son ordre, ce qui se résume par :

$$n + n = n + 1 \text{ et } n + m = \max(n, m)$$



**Figure I.12 :** Hiérarchisation du réseau hydrographique de BV de M'sila

### ***1.8.2. La longueur du cours d'eau principal***

La longueur du cours d'eau principal ( $L_p$ ) est la distance curviligne depuis l'exutoire jusqu'à la ligne de partage des eaux, en suivant toujours le segment d'ordre le plus élevé lorsqu'il y a un embranchement et par extension du dernier jusqu'à la limite topographique du bassin versant. Si les deux segments à l'embranchement sont de même ordre, on suit celui qui draine la plus grande surface.

Le calcul donne pour Oued K'sob de bassin versant de M'sila une longueur  $L_p = 67,02 \text{ km}$

### ***1.8.3. La densité de drainage***

La densité de drainage, introduite par Horton (1945), est la longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface du bassin versant :

$$D_d = \sum_1^n L_i / A$$

Avec :

$D_d$  : densité de drainage [ $\text{km}/\text{km}^2$ ] ;

$L_i$  : longueur de cours d'eau [ $\text{km}$ ] ;

$A$  : surface du bassin versant [ $\text{km}^2$ ].

La densité de drainage dans le bassin versant de M'sila est égale à 0,43 km/km<sup>2</sup>, ceci traduit que le bassin présente dans son ensemble une formation géologique perméable, dont l'écoulement est plutôt limité et centralisé ainsi que l'infiltration est augmentée (Guesri, 2021).

**Tableau I.8 :** Calcul de la densité Drainage

Ordre	Longueur d'ordre Ni	Densité de drainage D <sub>d</sub>
L <sub>1</sub>	420,29	0,207
L <sub>2</sub>	317,98	0,157
L <sub>3</sub>	82,59	0,041
L <sub>4</sub>	48,88	0,024
L <sub>5</sub>	1,86	9,160 × 10 <sup>-4</sup>
Total	871,60	0,429

#### I.8.4. La densité hydrographique

La densité hydrographique représente le nombre de canaux d'écoulement par unité de surface.

$$F = \frac{\sum N_i}{A}$$

Où :

F : densité hydrographique [km<sup>-2</sup>] ;

N<sub>i</sub> : nombre de cours d'eau ;

A : superficie du bassin [km<sup>2</sup>].

**Tableau I.9 :** Calcul de la densité hydrographique

Ordre	Nombre d'ordre Ni	Densité hydrographique F
N <sub>1</sub>	116	0,057
N <sub>2</sub>	84	0,041
N <sub>3</sub>	30	0,015
N <sub>4</sub>	22	0,011
N <sub>5</sub>	1	4,92 × 10 <sup>-4</sup>
Total	253	0,125

La densité hydrographique qui est égale à  $F=0.125$ , est une faible densité et donc le bassin d'étude présente une région à substratum perméable, à couvert végétal important et à relief peu accidenté (Guesri, 2021).

### ***1.8.5. Le rapport de confluence***

Sur la base de la classification des cours d'eau, (Horton, 1932) et (Schumm, 1956) ont établi différentes lois : Ces "lois" empiriques relient le nombre, la longueur moyenne et l'ordre des cours d'eau. On constate que pour un bassin versant homogène, le "rapport de confluence"  $R_c$ , rapport du nombre  $N_i$  de cours d'eau d'ordre  $i$  au nombre  $N_{i+1}$  de cours d'eau d'ordre  $i+1$ , est sensiblement constant :

$$R_c = N_i / N_{i+1}$$

Avec :

$R_c$  : rapport de confluence des cours d'eau ("bifurcation ratio") ;

$N_i$  : nombre d'affluents d'ordre  $i$  ;

$N_{i+1}$  : nombre d'affluents d'ordre  $i+1$ .

**Tableau I.10** : Calcul des rapports de confluence

<b>Ordre</b>	<b>Nombre d'ordre <math>N_i</math></b>	<b>Rapport de confluence <math>R_c</math></b>
$N_1$	116	1,38
$N_2$	84	2,80
$N_3$	30	1,36
$N_4$	22	22
$N_5$	1	/

### ***1.8.6. Rapport des longueurs***

Sur la base de la classification des cours d'eau, (Horton, 1932) et (Schumm, 1956) ont établi cette loi :

$$R_L = L_i / L_{i+1}$$

Avec :

$R_L$  : rapport des longueurs des cours d'eau ;

$L_i$  : longueur d'affluents d'ordre  $i$  ;

$L_{i+1}$  : longueur d'affluents d'ordre  $i+1$ .

**Tableau I.11** : Calcul des rapports de la longueur

Ordre	Longueur $L_i$	Rapport des longueurs $R_L$
$L_1$	420,29	1,32
$L_2$	317,98	3,85
$L_3$	82,59	1,69
$L_4$	48,88	26.28
$L_5$	1,86	/

**I.8.7. Coefficient de torrentialité ( $C_T$ )**

C'est le rapport entre la fréquence des cours d'eau d'ordre 1 avec la densité de drainage.

$$C_T = F_1 \times D_d \rightarrow C_T = 0,057 \times 0,429$$

Pour notre cas,  $C_T = 0,024 \text{ km/km}^4$

Cette faible valeur traduit que le bassin ne représente pas des caractéristiques morphométriques adaptées à l'écoulement, ainsi qu'il est constitué par des formations perméables dont le taux de l'infiltration est important (Guesri, 2021).

**I.8.9. Temps de concentration**

Le temps de concentration est défini comme étant la durée que met une goutte d'eau qui tombe dans le point le plus éloigné du bassin versant, pour atteindre l'exutoire. Il est exprimé par la formule ci-après.

$$T_C = \frac{4\sqrt{A} + 1,5 \times L_p}{0,8\sqrt{H_{\text{moy}} - H_{\text{min}}}}$$

$L_p$  = Longueur du talweg principal (km), Pour notre cas,  $T_C = 24,75$  heures.

**I.8.10. Vitesse d'écoulement de l'eau ( $v_e$ )**

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$V_e = L_p / T_C$$

Avec :

$L_p$  : Longueur du talweg principal = 67,02 km

$T_c$  : Temps de concentration.

Pour notre cas,  $V_e = 2,71 \text{ km/h} = 0,75 \text{ m/s}$

## **I.9. Conclusion**

L'analyse morphométrique nous permet d'évaluer un certain nombre de paramètres très importants qui doivent être étroitement liés à la nature lithologique du terrain et la topographie du bassin.

Le sous bassin de K'sob d'une superficie de 2030,53 Km<sup>2</sup> est caractérisé par :

\* Une forme allongée ( $K_c = 1,68$ ) ce qui fait que les eaux précipitées mettent plus de temps pour atteindre l'exutoire le Sebkhah de Chott el Hodna, ceci est confirmé par les résultats du temps de concentration qui est de  $T_c = 24,75$  heures, c'est une importante durée pour l'évaluation des crues.

\* L'altitude moyenne du territoire du bassin est de 589.03 m, elle donne l'aspect d'une morphométrie assez forte au sous bassin.

\* D'après la classification du relief par L'ORSTOM, L'indice de pente globale (**Ig**) étant compris entre 5 et 10 m/km, le sous bassin versant présente un relief assez faible.

\* D'après la deuxième classification de l'ORSTOM, la dénivelée spécifique du BV se trouve dans la classe R5 ( $100 \text{ m} < D_s = 240,6 \text{ m} < 250 \text{ m}$ ), caractérisée par un relief assez fort.

La connaissance de la région d'étude est très importante avant toute étude approfondie d'un bassin versant (Hydrologie, érosion, transport solide, inondations, qualité des eaux...). Dans cette étude nous allons nous intéresser à la qualité des eaux souterraines.

# Chapitre II

## Etude hydrochimique des eaux

## Chapitre II : Etude hydrochimique des eaux

### II.1. Introduction

Il est important de connaître certains paramètres physico-chimiques, qui pourraient être la cause de nombreux problèmes. A cet effet, dans le présent travail, nous nous intéressons à la cartographie des données physico-chimique de l'eau de la nappe Mio-Plio- Quaternaire de M'Sila. Cette cartographie est faite à l'aide de logiciel ArcMap 10.3.1.

Nous avons donc entrepris d'évaluer la qualité des eaux souterraines de la région de M'Sila, pour ce fait, L'indice de qualité de l'eau (IQE) est une expression numérique utilisée pour évaluer la qualité globale de l'eau à partir d'une grande quantité de données et il est facilement compris par les gestionnaires et décideurs. Dans cette étude, l'IQE à douze paramètres physico-chimiques ( $T^{\circ}C$ , pH, CE, TH $^{\circ}F$ , Turbidité,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^{+}$ ,  $K^{+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^{-}$  et  $NO_3^{-}$ ) est utilisé pour évaluer la qualité globale des eaux pendant la période de Février 2023. Après une étude statistique a été menée par la méthode d'Analyse en Composantes Principales (ACP) à l'aide du logiciel XLSTAT pour la détermination et la classification de la qualité chimique de l'eau de la région.

### II.2. Inventaire des points d'eau

#### II.2.1. Caractéristiques des points d'eau étudiés

Les données utilisées pour notre étude sont les résultats des analyses effectuées sur les 18 points d'eaux par les services de l'Algérienne Des Eaux (ADE) de la Wilaya de M'sila durant la campagne Février 2023.

Leurs caractéristiques principales sont les suivantes (Tableau II.1 et Figure II.1).

Tableau II.1 : Caractéristiques des points d'eau (ADE, M'Sila)

SOURCE	Lieu de prélèvement	Commune	X	Y	Z	T °C	PH	Cond (us/cm)	Tur (NTU)	TDS (mg/l)	M.O (mg/l)	TAC (°F)	HCO <sup>3-</sup> (mg/l)	TH (°F)	Ca <sup>+2</sup> (mg/l)	Mg <sup>+2</sup> (mg/l)	Cl <sup>-</sup> (mg/l)	R.S (mg/l)	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/l)	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> (mg/l)	NO <sup>-3</sup> (mg/l)	Fe <sup>+2</sup> (mg/l)	PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> (mg/l)	Na <sup>+</sup> (mg/l)	K <sup>+</sup> (mg/l)
F1	F, Boukhmissa	M'sila	640515	3963605	541	12,9	7,2	3250	0,7	1670	1	25	305	116	256	126	355	2463	< 0,02	< 0,02	850	20	< 0,2	< 0,1	220	6
F2	Lachiakh	M'sila	640946	3952476	482	15,4	7,5	3170	1,25	1627	2	25	305	120	272	126,36	284	2402	< 0,02	< 0,02	900	50	< 0,2	< 0,1	180	6
F3	Mezrir I (Est)	M'sila	638247	3946335	443	13	8,0	1973	0,5	919		22	267	76	144	97	227		< 0,02	< 0,02	600	8,9	< 0,2	< 0,1	59	7
F4	Mezrir II (Ouest)	M'sila	636598	3945461	438	13	8,0	3780	0,8	1213		22	265	120	240	146	440		< 0,02	< 0,02	1000	6,4	< 0,2	< 0,1	121	9
F5	Khebbeb	M'sila	645262	3942539	422	13	8,0	1532	0,5	678		25	333	68	136	82	177		< 0,02	< 0,02	500	5	< 0,2	< 0,1	80	8
F6	Ghozel	M'sila	635400	3946605	441	13	7,4	3690	2	2051		25	315	120	240	146	284		< 0,02	< 0,02	950	16	< 0,2	< 0,1	203	7
F7	F, Termonte 03	Termonte	618586	3967409	674	13,4	7,6	1616	4,4	809		20	244	60	128	68	36	1225	< 0,02	< 0,02	550	20	< 0,2	< 0,1	110	8
F8	F,Farkoussa	O,Manssour	624115	3947809	446	13,7	7,8	4430	0,3	2310		25	305	152	304	185	639	3357	< 0,02	< 0,02	1000	42	< 0,2	< 0,1	360	5,8
F9	F,O,Moussa 02	O,Manssour	626471	3954393	479	13,4	7,8	3360	4,7	1729		25	305	104	224	117	391	2546	< 0,02	< 0,02	900	8	< 0,2	< 0,1	340	9,5
F10	F, O, Haless03	O,Manssour	624467	3955951	489	13,4	7,7	3240	0,7	1697		25	305	100	224	107	355	2455	< 0,02	< 0,02	900	13	< 0,2	< 0,1	340	7
F11	F,Oum chouachi 10	Beni ilmane	611791	3966983	683	13,4	7,6	1026	0,5	506		25	305	40	96	39	36	778	< 0,02	< 0,02	200	11	< 0,2	< 0,1	60	5
F12	F,Oum chouachi 07 Bis	Beni ilmane	612282	3966655	672	13,4	7,5	1485	6,2	741		30	366	54	112	63	71	1125	< 0,02	< 0,02	350	18	< 0,2	< 0,1	113	7,8
F13	F,O,Dhaim 03	O,Derradj	653428	3944394	474	16,2	7,06	715	0,22	349		22	268	34	96	24	21	542	< 0,02	< 0,02	120	28	< 0,2	< 0,1	18	3
F14	F,O,Derradj 01 Bis (R F213)	O,Derradj	657274	3944776	488	16	7,06	1003	1,85	494		20	244	48	112	49	36	760	< 0,02	< 0,02	250	32	< 0,2	< 0,1	19,4	7
F15	F,O,Ben saoucha	O,Derradj	656100	3943856	481	16	7,03	930	0,48	457		20	244	44	96	49	36	705	< 0,02	< 0,02	250	23	< 0,2	< 0,1	18,8	6
F16	01 Ahl Dir	Oulad Addi El Gbala	662567	3960915	786	14,7	7,8	875	1,8	441		22	268,4	36	96	29,16	42,6	663	< 0,02	< 0,02	180	15	< 0,2	< 0,1	49	4,6
F17	02 Ahl Dir	Oulad Addi El Gbala	662821	3961392	800	15,1	6,9	788	0,39	394		20	244	32	80	29,16	35,5	597	< 0,02	< 0,02	180	12	< 0,2	< 0,1	42	3,9
F18	03 Ahl Dir	Oulad Addi El Gbala	662871.05	3962619.496	802	14,7	7,7	781	1,16	393		20	244	32	80	29,16	35,5	591	< 0,02	< 0,02	180	13	< 0,2	< 0,1	44	3,9

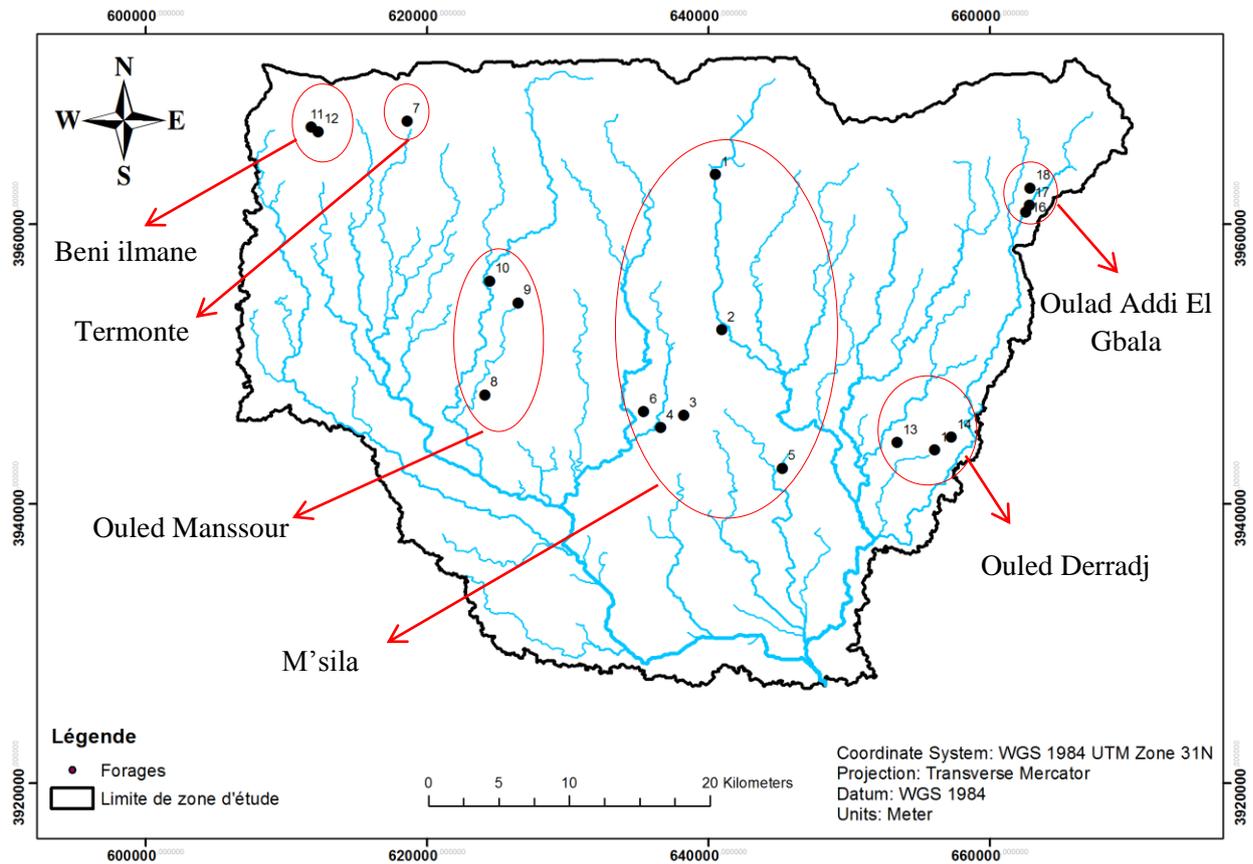


Figure II.1 : Carte de positionnement des forages étudiés

### II.3. Analyse de la balance ionique

L'étude de la fiabilité des données a consisté d'une part à une vérification du bilan ionique. Cette vérification a été précédée d'une analyse des ions majeurs intervenant dans l'évaluation du bilan ionique. Sachant qu'une analyse chimique des eaux n'est considérée comme représentative que lorsque la balance ionique est inférieure ou égale à 10% (Kouassi *et al.*, 2013), les balances ioniques ont été systématiquement vérifiées pour l'ensemble des échantillons analysés. L'erreur sur la balance ionique (BI) est donnée en pourcentage et calculée par la relation suivante (équation II.1) :

$$BI (\%) = 100 \times \left| \frac{\sum cations - \sum anions}{\sum cations + \sum anions} \right| \quad (II.1)$$

$\sum cations$  : somme des cations majeurs contenus dans l'eau en milliéquivalent ;

$\sum anions$  : somme des anions majeurs contenus dans l'eau en milliéquivalent.

**Tableau II.2** : Résultats du calcul de la balance ionique des eaux souterraines de la zone d'étude

Nom de point d'eau	Somme des cations (meq/L)	Somme des anions (meq/L)	Balance ionique (%)	Fiabilité des analyses
F1	32,866	33,032	0%	BI Vérifié
F2	31,954	32,555	-1%	BI Vérifié
F3	17,913	23,416	-13%	BI n'est pas vérifié
F4	29,483	37,679	-12%	BI n'est pas vérifié
F5	17,218	20,942	-10%	BI Vérifié
F6	32,999	33,211	0%	BI Vérifié
F7	16,972	16,789	+1%	BI Vérifié
F8	46,200	44,522	+2%	BI Vérifié
F9	35,837	34,896	+1%	BI Vérifié
F10	34,951	33,961	+1%	BI Vérifié
F11	10,737	10,356	+2%	BI Vérifié
F12	15,888	15,579	+1%	BI Vérifié
F13	7,625	7,934	-2%	BI Vérifié
F14	10,644	10,736	0%	BI Vérifié
F15	9,793	10,591	-4%	BI Vérifié
F16	9,439	9,590	-1%	BI Vérifié
F17	8,318	8,941	-4%	BI Vérifié
F18	8,405	8,958	-3%	BI Vérifié

#### II.4. Les principaux paramètres physico-chimiques

Dans le but de voir l'évolution et répartition des éléments physico-chimiques dans notre zone d'études on a essayé d'établir une carte pour chaque élément.

##### II.4.1. Etude des paramètres physiques

###### II.4.1.1. La température de l'eau

La température de l'eau est un facteur important dans l'environnement aquatique du fait qu'elle régit la presque totalité des réactions physiques, chimiques et biologiques (**Chapman et Kimstach, 1996**). Les températures enregistrées au niveau des eaux souterraines de la zone d'étude sont relativement moyennes (entre 12.9 et 16°C). La valeur la plus élevée a été enregistrée au niveau du forage (F13 : 16,2°C). Ces valeurs restent acceptables pour les normes Algériennes de potabilité.

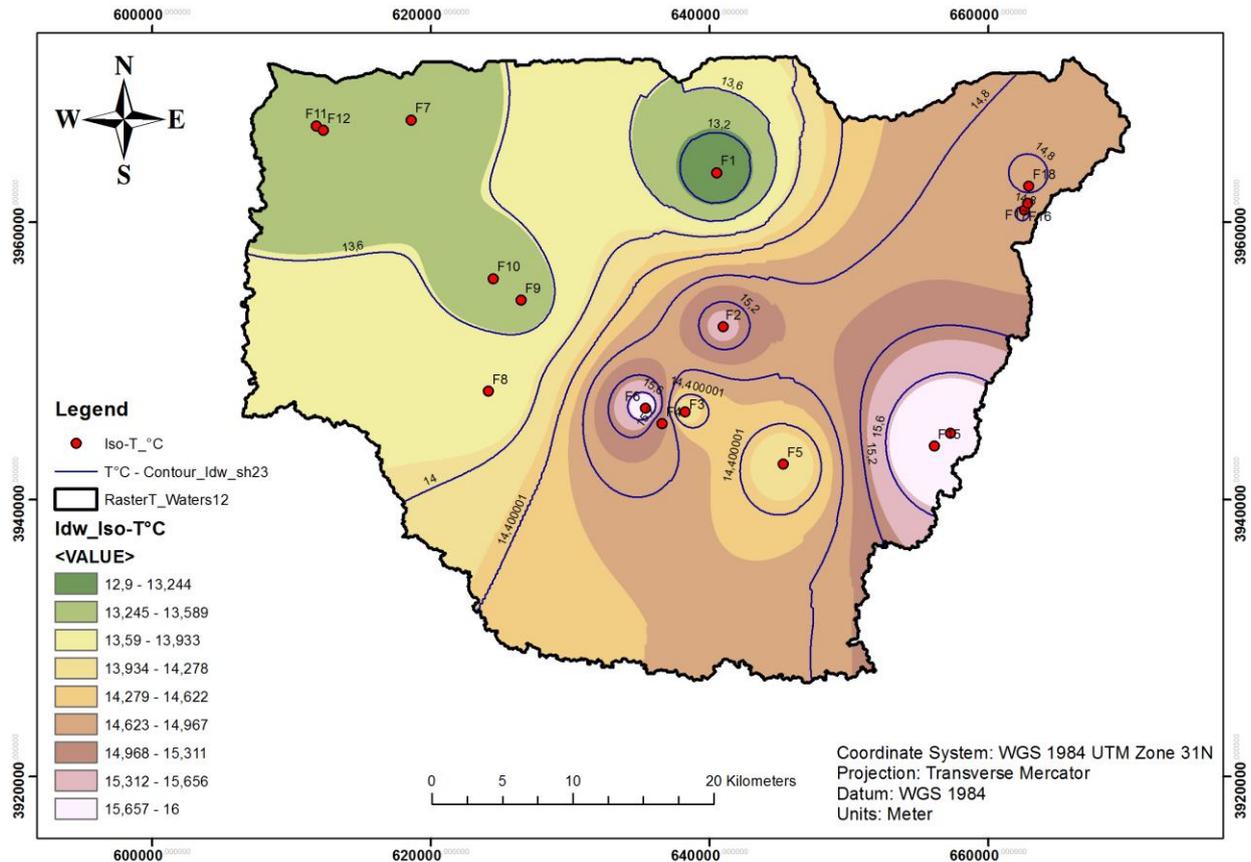
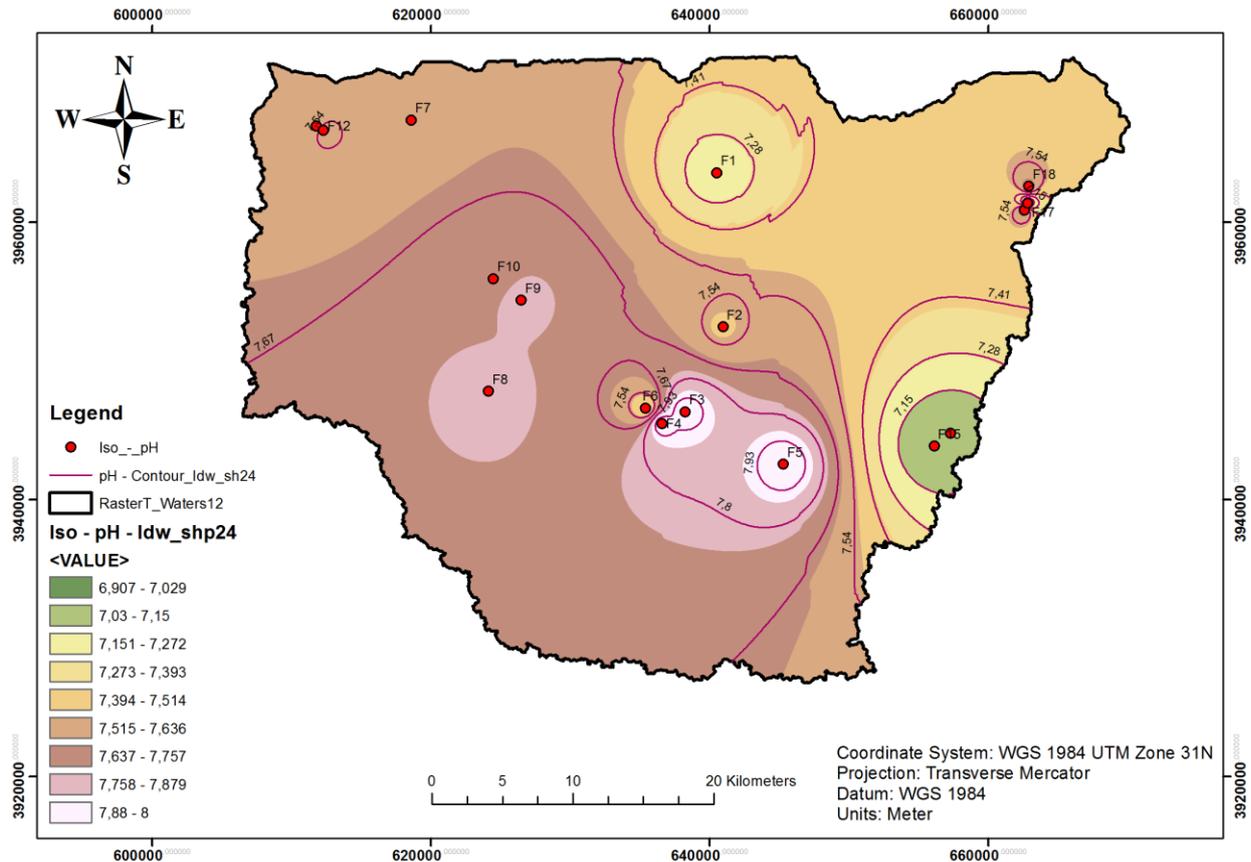


Figure II.2 : Variabilité spatiale de la température des eaux souterraines dans la zone d'étude

#### II.4.1.2. Le pH de l'eau

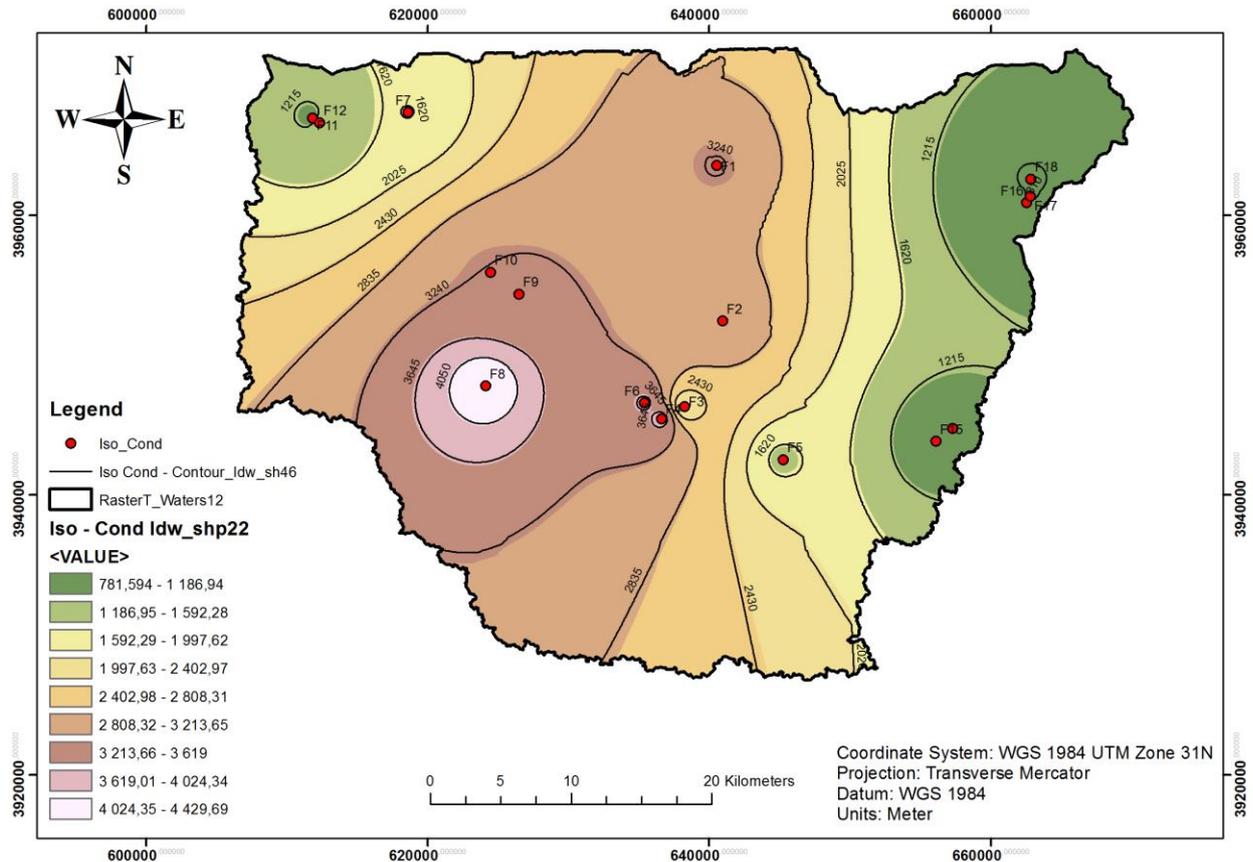
Le pH de l'eau renseigne sur son acidité et son alcalinité. Selon (Nisbet et Verneau, 1970), le pH des eaux naturelles est généralement compris entre 6,6 à 7,8 et selon (Rodier, 1984) il varie de 7,2 à 7,6. Habituellement, les valeurs du pH se situent entre 6 et 8,5 dans les eaux naturelles (Chapman et Kimstach, 1996). La nature des terrains traversés par les eaux est la cause naturelle, provoquant des variations importantes du pH. L'analyse de ces eaux a dévoilé que le pH est proche de la neutralité, au niveau de l'ensemble des points d'eau, les valeurs moyennes du pH au niveau de la zone d'étude ont été dans les normes de potabilité.



**Figure II.3 :** Variabilité spatiale du pH des eaux souterraines dans la zone d'étude

#### II.4.1.3. La conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique désigne la capacité de l'eau à conduire un courant électrique. Elle est déterminée par la teneur en substances dissoutes, la charge ionique, la capacité d'ionisation, la mobilité et la température de l'eau. Par conséquent, la conductivité électrique renseigne sur le degré de minéralisation d'une eau. Les eaux des points contrôlés sont minéralisées (Figure II.4), avec des valeurs qui oscillaient entre 781,591 et 4429,69  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Ces valeurs importantes semblent résulter du lessivage de la roche réservoir au sein de laquelle les eaux séjournent.

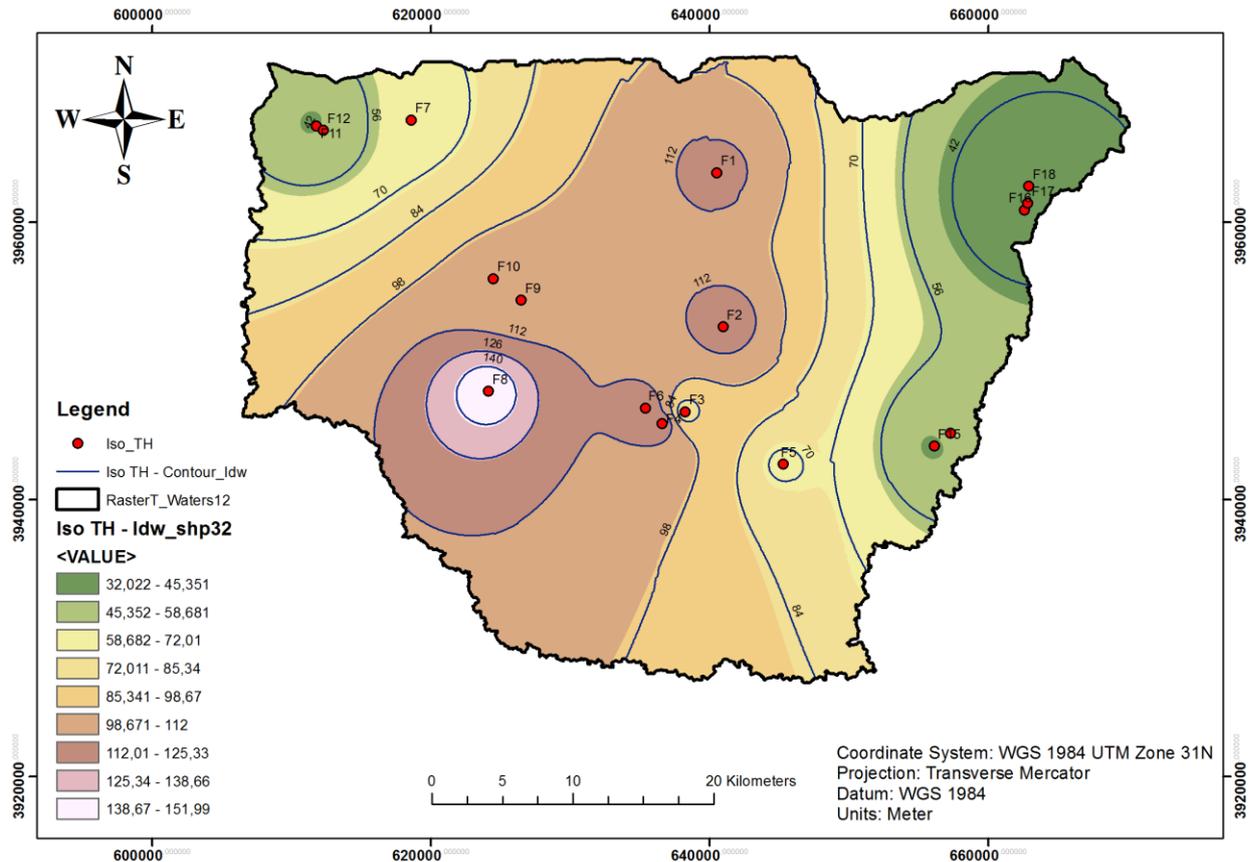


**Figure II.4 :** Variabilité spatiale de la conductivité des eaux souterraines dans la zone d'étude

**II.4.1.4. La dureté de l'eau**

La dureté est l'indicateur de minéralisation de l'eau. Cela représente la somme des ions calcium magnésium contenus dans l'eau. C'est l'un des indicateurs principaux de la qualité de l'eau. Il indique sa dureté.

Les dureté enregistrées au niveau des eaux souterraines de la zone d'étude sont relativement moyennes (entre 32,022 et 151,99 °F). La valeur la plus élevée a été enregistrée au niveau du forage (F8 : 152 °F), cette valeur dépasse la norme de potabilité (> 50 °F).



**Figure II.5 :** Variabilité spatiale de la dureté des eaux souterraines dans la zone d'étude

#### II.4.2. Etude des paramètres chimiques

L'établissement des cartes des principaux éléments chimiques nous permet d'apprécier la répartition des concentrations et d'expliquer leur origine. Pour cela nous avons dressé des cartes d'iso-teneurs en  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Cl}^-$  et  $\text{NO}_3^-$ .

##### II.4.2.1. Le Calcium $\text{Ca}^{2+}$

Le calcium est généralement l'élément dominant des eaux potables et sa teneur varie essentiellement suivant la nature des terrains traversés (terrain calcaire ou gypseux) (Rodier, 2009). Les teneurs en calcium des eaux contrôlées (Figure II.8) variaient de 80,07 à 303,98 mg/L. La teneur en calcium la plus élevée a été enregistrée au niveau du forage (F8 : 304 mg/L) la valeur maximale admissible qui est de 200 mg/L (Journal officiel N° 13 – 09 Mars 2014). Les teneurs élevées en calcium pourraient être attribuées à la dissolution de la calcite ainsi que d'autres minéraux calciques tels que le gypse.

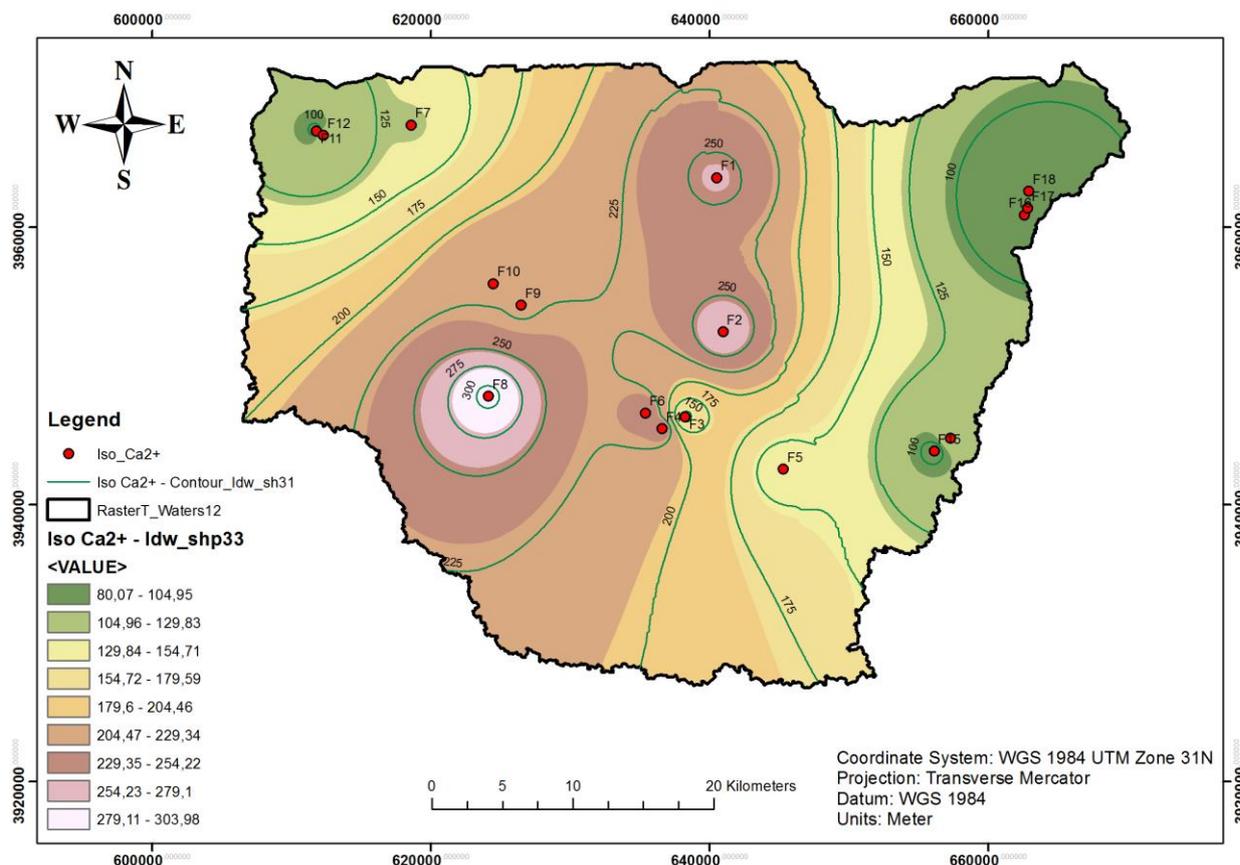
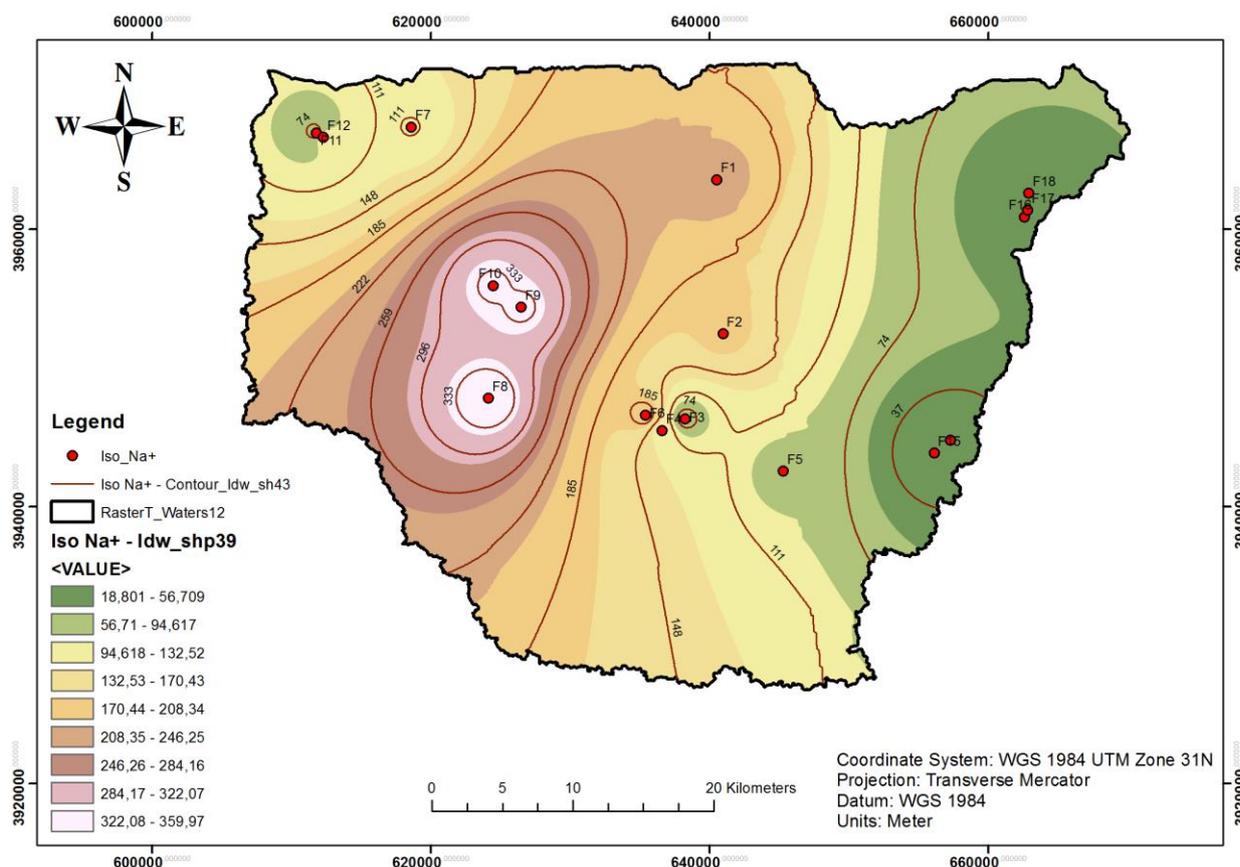


Figure II.6 : Carte iso-teneurs du  $\text{Ca}^{2+}$

#### II.4.2.2. Le Magnésium $\text{Mg}^{2+}$

La majorité des eaux naturelles contiennent généralement une petite quantité de magnésium, sa teneur dépend de la composition des roches sédimentaires rencontrées. Il provient de l'attaque par l'acide carbonique des roches magnésiennes et de la mise en solution du magnésium sous forme de carbonates et bicarbonates (**Bermond et Perrdon, 1979**). Dans les points d'eau analysés (Figure II.7), les teneurs en magnésium variaient entre 29,162 et 184,96 mg/L, La teneur en magnésium la plus élevée a été enregistrée au niveau du forage (F8 : 185 mg/L) la valeur maximale admissible qui est de 150 mg/L. La source du magnésium semble être liée au contact des eaux avec les roches calcaires et dolomitiques.



Figure II.8 : Carte iso-teneurs du Na<sup>+</sup>

#### II.4.2.4. Le Potassium K<sup>+</sup>

Le potassium est généralement l'élément majeur le moins abondant dans les eaux après le sodium, le calcium et le magnésium ; il ne prend qu'exceptionnellement le troisième rang des cations (Nouayti *et al.*, 2015). Le potassium se rencontre sous forme de chlorures doubles dans de nombreux minerais tels que la corrollite et la sylvinite. On le trouve également dans les cendres des végétaux sous forme de carbonate. Le potassium est un élément indispensable à la vie et notamment à la croissance des végétaux. L'agriculture, il est utilisé comme engrais sous forme de sulfate de potassium, de chlorure de potassium, ou encore de nitrate de potassium (Pesson, 1979).

La teneur en potassium est presque constante dans les eaux naturelles. Celle-ci ne dépasse pas habituellement 10 à 15 mg/L (Nouayti *et al.*, 2015). Sa concentration dans les points d'eau contrôlés (Figure II.13) variait entre 0,00065 et 9,4972 mg/L ; elle ne dépassait pas les normes algériennes de potabilité. La valeur la plus élevée en potassium est enregistrée au niveau du point d'eau (F9 : 9,5 mg/L).



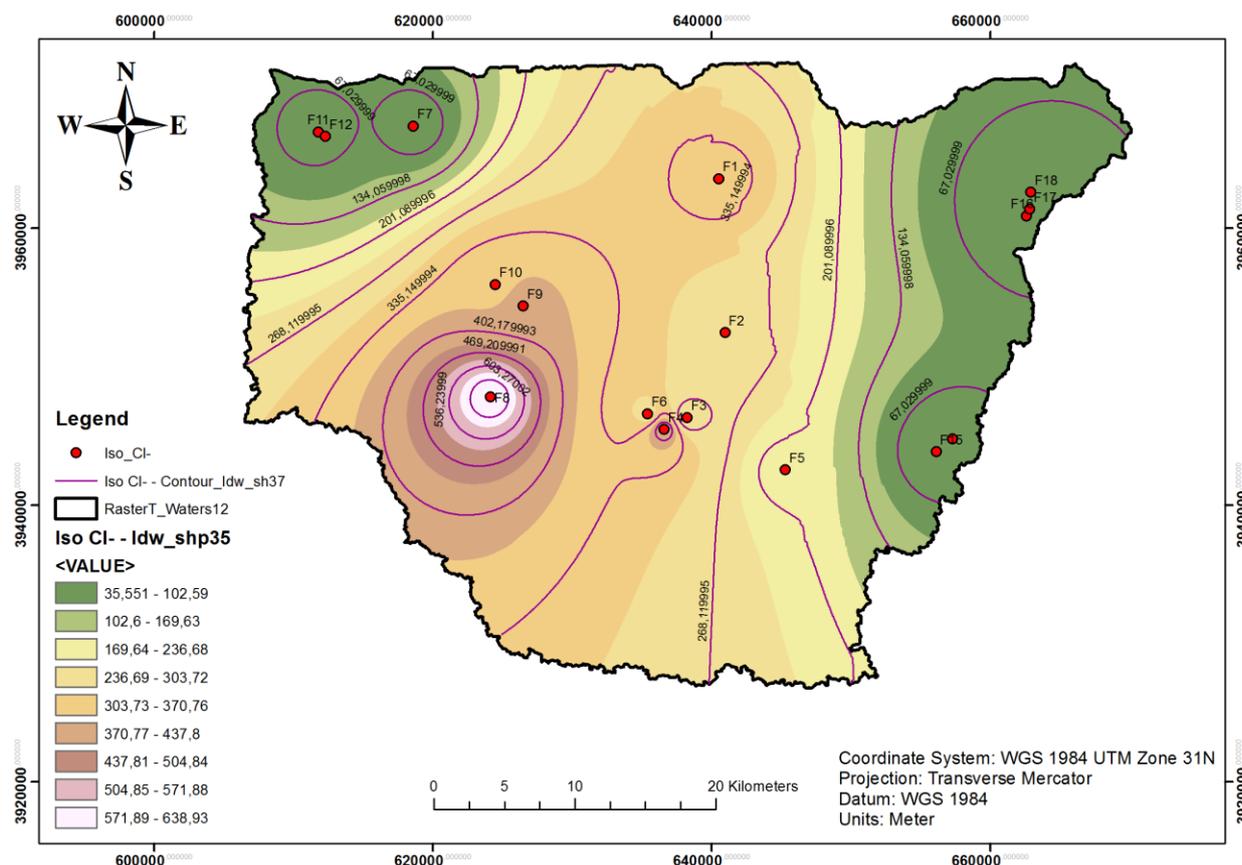


Figure II.10 : Carte iso-teneurs du Cl<sup>-</sup>

#### II.4.2.6. Les Nitrates NO<sub>3</sub><sup>-</sup>

Les nitrates constituent le stade final de l'oxydation de l'azote organique, leur présence dans une eau polluée atteste que le processus d'autoépuration est déjà entamé. L'activité humaine accélère le processus d'enrichissement en cet élément sur les sols subissant l'érosion, ce qui provoque l'infiltration des eaux usées, par les rejets des industries minérales et d'engrais azoté (**Bermond et Perrdon, 1979**). Dans les stations étudiées et comme il est indiqué sur la figure II.11 les teneurs en nitrates variaient entre 5,0045 et 49,974 mg/L. Elles n'ont pas dépassé les normes algériennes.

La valeur la plus élevée est enregistrée au niveau de forage (F2 : 50 mg/L), Cette dégradation semble être due essentiellement à l'activité humaine, la fertilisation azotée des zones agricoles avoisinantes aux points étudiés, les eaux usées, les puits perdus et les déchets des élevages.

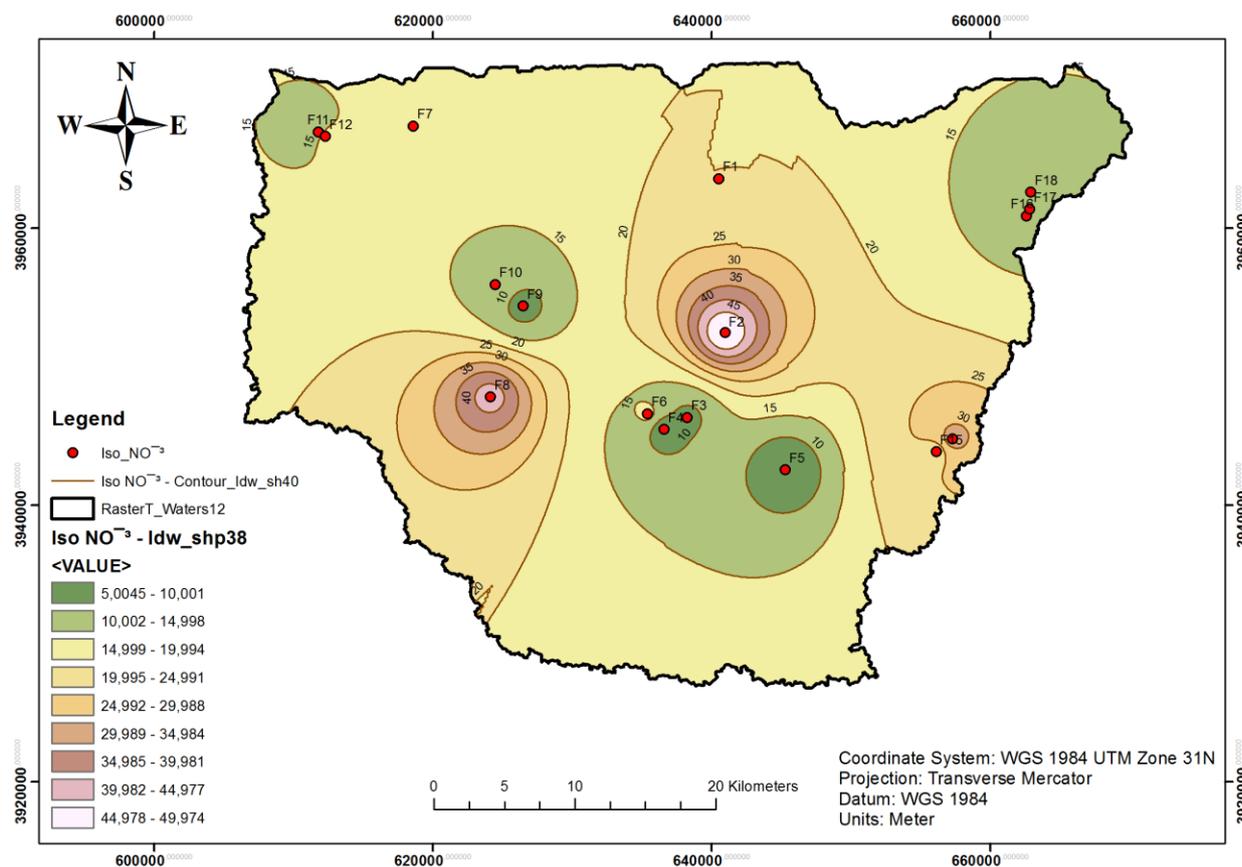


Figure II.11 : Carte iso-teneurs du NO<sub>3</sub><sup>-</sup>

#### II.4.2.7. Les Sulfates SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>

Dans les conditions naturelles, les sulfates, forme de soufre dissous la plus répandue dans les eaux naturelles, ont essentiellement deux origines : géochimique et atmosphérique (**Deliste et Schmidt, 1977**). Du fait de la solubilité élevée des sulfates, l'eau souterraine en conditions normales peut en contenir jusqu'à 1,5 g/L (**Matthess, 1994**). L'oxydation des sulfures ainsi que la dégradation de la biomasse dans le sol constituent d'autres sources possibles. De nombreuses activités humaines et naturelles peuvent générer des apports de sulfates dans l'eau souterraine : application d'engrais sulfatés, précipitations chargées en dioxyde de soufre, etc...

Les valeurs des sulfates dans les eaux étudiées sont très variables, elles oscillaient entre 180,01 à 999,96 mg/L (Figure II.12). Les teneurs élevées au niveau des points d'eau (F4 et F8 : 1000 mg/L), la valeur maximale admissible qui est de 200 mg/L.

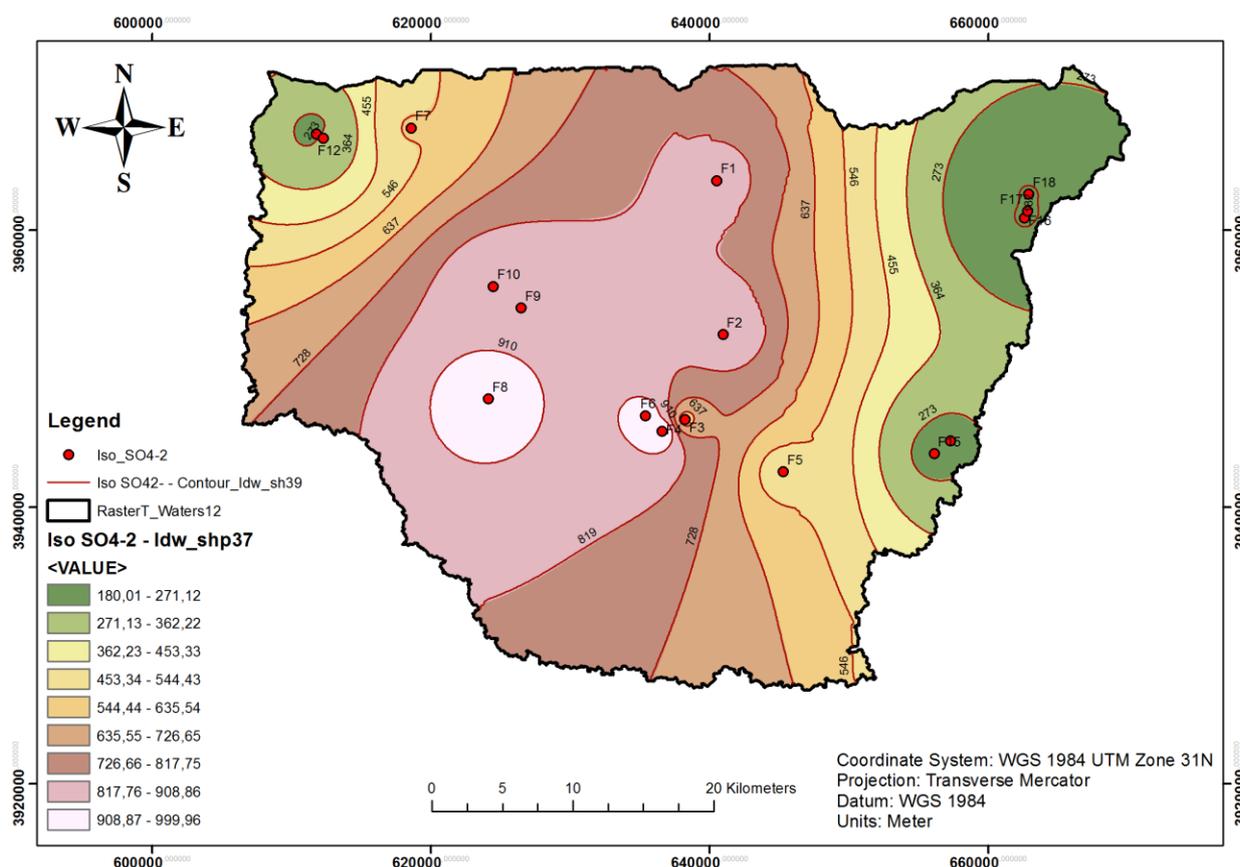


Figure II.12 : Carte iso-teneurs du  $\text{SO}_4^{2-}$

## II.5. Faciès chimique des eaux

Les faciès chimiques sont couramment utilisés en hydrogéologie pour la description de la composition des eaux naturelles. La nécessité d'une comparaison aisée voire une classification des eaux naturelles nécessite l'utilisation des représentations graphiques.

De ce fait, plusieurs représentations sont utilisées parmi lesquelles on peut citer :

- Le diagramme de Piper ;
- Le diagramme semi-logarithmique de Schöeller-Berkaloff ;
- Le diagramme de Riverside / Wilcox ;
- Le diagramme de Stiff ;
- Le diagramme à coordonnées rayonnantes...

Dans notre étude, deux représentations graphiques ont été retenues et utilisées : le diagramme de Piper et le diagramme Riverside/Wilcox. La réalisation de ces diagrammes a été faite à l'aide du logiciel "Diagrammes"

II.5.1. Diagramme de Piper

La projection des résultats des analyses des eaux prélevées pendant la campagne de Février 2023 sur le diagramme de Piper (Figure II.13) montre que le chimisme des eaux analysées des aquifères de notre zone d'étude (F1 – F18) est caractérisée par un faciès chimique **Chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne**, à l'exception du forage (F13) située à Ouled Derradj représente un faciès chimique **Bi/Carbonatée calcique et magnésienne**.

Le rôle de la géologie est primordial dans l'interprétation des résultats hydrochimiques, car l'eau est constamment en contact avec les formations géologiques.

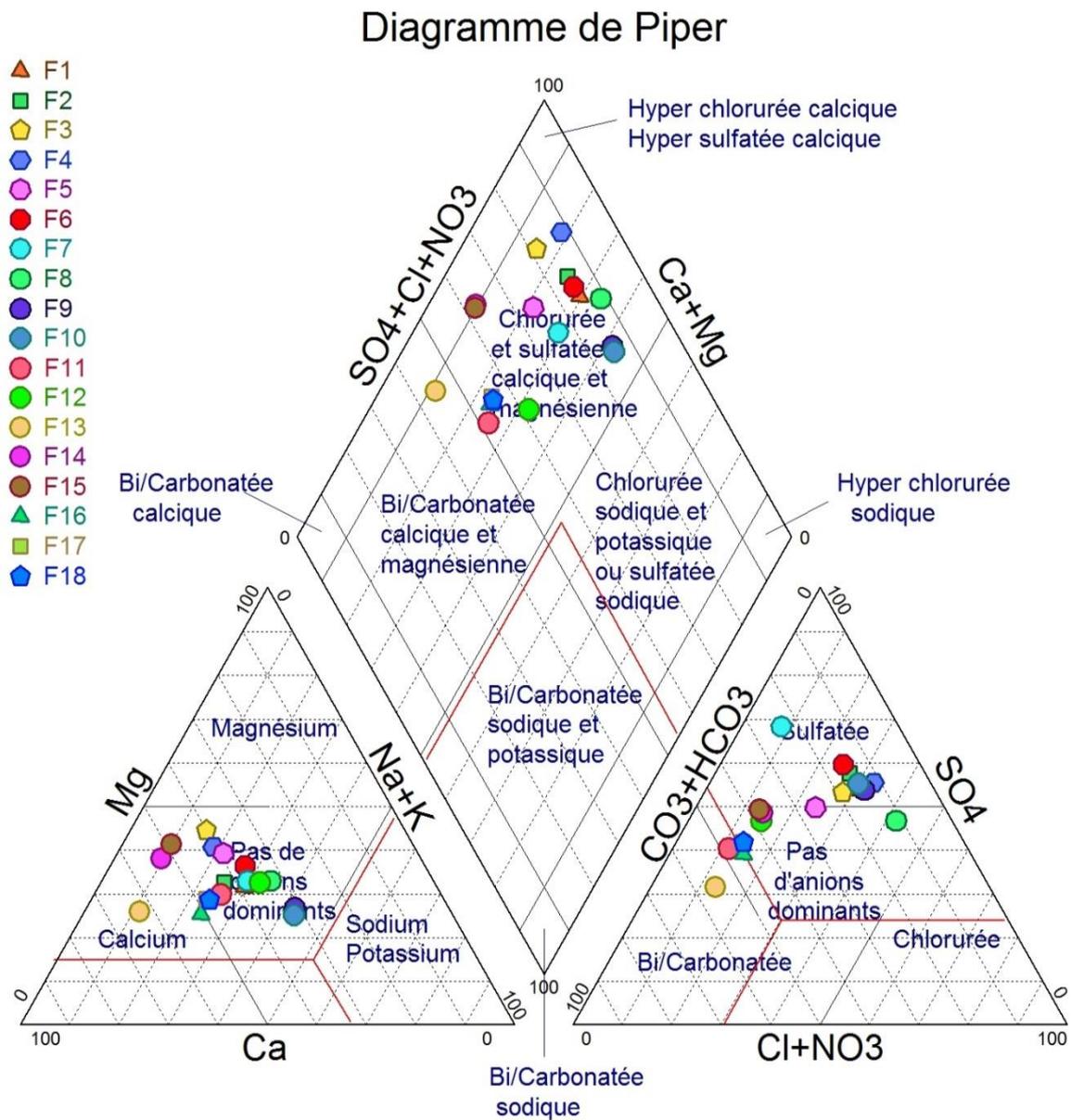


Figure II.13 : Le faciès chimique des eaux souterraines de notre zone d'étude

## **II.6. Qualités des eaux**

Lors de l'utilisation de l'eau hors de son milieu, sa qualité est souvent mentionnée, elle est fonction du type d'usage. Ainsi, les exigences relatives à la qualité sont différentes d'une utilisation à l'autre. Dans ce travail, seule la qualité d'eau destinée à la consommation humaine et aux activités agricoles sont soulevées.

Dans cette optique, nous allons profiter des données analytiques disponibles pour évaluer la qualité des eaux destinées à la consommation humaine et aux activités agricoles. En effet, la quasi-totalité des eaux mobilisables dans la région sont utilisées pour ces deux activités.

### ***II.6.1. Qualité des eaux destinées à la consommation humaine***

L'appréciation de la qualité des eaux de la zone étudiée se fait à partir des normes Algériennes de potabilisation basées sur les paramètres physico-chimiques, et organoleptiques. A chaque paramètre est affecté une valeur guide ou idéale et une valeur maximale admissible (CMA). On parle de non-conformité à la norme lorsque cette dernière est dépassée.

La qualité d'une eau est définie par des paramètres physiques, chimiques et biologiques, mais également par son usage. Ainsi, une eau impropre à la consommation peut être adaptée à l'irrigation ou à la pisciculture. La mauvaise qualité des eaux peut être induite par des activités anthropiques ou par des phénomènes naturels.

**Tableau II.3 :** Norme de potabilité de l'eau (Journal officiel N° 13 – 09 Mars 2014) et les résultats de la potabilité des eaux souterraines de la zone d'étude

	Paramètres physico-chimiques										Substance indésirable	Paramètre organoleptique
	T	pH	CE	TH	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Turbidité
Norme	25 °C	6.5 - 8.5	2800 (µS/cm)	50 (°F)	200 (mg/L)	150 (mg/L)	200 (mg/L)	20 (mg/L)	200 (mg/L)	200 (mg/L)	50 (mg/L)	5 (NTU)
F1	12,9	7,2	3250	116	256	126	220	6	850	355	20	0,7
F2	15,4	7,5	3170	120	272	126,36	180	6	900	284	50	1,25
F3	13	8,0	1973	76	144	97	59	7	600	227	8,9	0,5
F4	13	8,0	3780	120	240	146	121	9	1000	440	6,4	0,8
F5	13	8,0	1532	68	136	82	80	8	500	177	5	0,5
F6	13	7,4	3690	120	240	146	203	7	950	284	16	2
F7	13,4	7,6	1616	60	128	68	110	8	550	36	20	4,4
F8	13,7	7,8	4430	152	304	185	360	5,8	1000	639	42	0,3
F9	13,4	7,8	3360	104	224	117	340	9,5	900	391	8	4,7
F10	13,4	7,7	3240	100	224	107	340	7	900	355	13	0,7
F11	13,4	7,6	1026	40	96	39	60	5	200	36	11	0,5
F12	13,4	7,5	1485	54	112	63	113	7,8	350	71	18	6,2
F13	16,2	7,06	715	34	96	24	18	3	120	21	28	0,22
F14	16	7,06	1003	48	112	49	19,4	7	250	36	32	1,85
F15	16	7,03	930	44	96	49	18,8	6	250	36	23	0,48
F16	14,7	7,8	875	36	96	29,16	49	4,6	180	42,6	15	1,8
F17	15,1	6,9	788	32	80	29,16	42	3,9	180	35,5	12	0,39
F18	14,7	7,7	781	32	80	29,16	44	3,9	180	35,5	13	1,16

### II.6.2. Calcul de l'indice de qualité de l'eau (IQE)

Douze paramètres importants (T°C, pH, CE, TH°F, Turbidité, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup> et NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) ont été sélectionnés pour calculer l'Indice de qualité de l'eau IQE. Cet indice est une technique de classification de la qualité de l'eau qui repose sur la comparaison des paramètres de qualité de l'eau avec les normes internationales ou nationales algériennes dans le cadre de cette étude. L'IQE résume de grandes quantités de données sur la qualité de l'eau en termes simples (Excellente, Bonne, Mauvaise, Très mauvaise, etc.). Dans cette étude l'indice IQE est appliqué pour estimer l'influence des facteurs naturels et anthropiques sur la base de plusieurs paramètres clés du chimisme des eaux souterraines de la région de M'Sila. Cet indice est calculé en suivant la méthode de l'indice arithmétique pondéré (**Abdelghani et al., 2020**). Dans cette approche, une valeur numérique appelée poids relatif (Wi), spécifique à chaque paramètre physico-chimique, est calculée (Tableau II.5) selon la formule suivante :

$$W_i = \frac{k}{S_i} \quad (\text{II.2})$$

Où :

k : constante de proportionnalité et peut également être calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$K = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (1/S_i)} \quad (\text{II.3})$$

n : nombre de paramètres

Si : Valeurs limites de la norme Algérienne de potabilisation (Journal officiel N° 13 – 09 Mars 2014).

Ensuite, une échelle d'évaluation de la qualité (Qi) est calculée pour chaque paramètre en divisant la concentration par la norme dudit paramètre et en multipliant l'ensemble par 100 comme dans la formule suivante :

$$Q_i = (C_i/S_i) \times 100 \quad (\text{II.4})$$

Qi : échelle d'évaluation de la qualité de chaque paramètre.

Ci : la concentration de chaque paramètre en mg/l

Finalement l'indice global de la qualité de l'eau est calculé par l'équation suivante :

$$IQE = \sum_{i=1}^n Q_i \times W_i / \sum_{i=1}^n W_i \quad (\text{II.5})$$

Cinq classes de qualité peuvent être identifiées selon les valeurs de l'indice de qualité de l'eau IQE (Tableau II.4).

**Tableau II.4 :** Classification et usage possible de l'eau selon l'IQE (Abdelghani *et al.*, 2020)

Classe de IQE	Type d'eau	Usage possible
0 – 25	Excellente qualité	Eau potable, irrigation et industrie
> 25 – 50	Bonne qualité	Eau potable, irrigation et industrie
> 50 – 75	Mauvaise qualité	Irrigation et industrie
> 75 – 100	Très mauvaise qualité	Irrigation
> 100	Eau non potable	Traitement approprié requis avant utilisation

### II.6.3. Résultats du calcul de l'indice IQE et évaluation de la qualité des eaux

Le poids relatif ( $W_i$ ) de chaque paramètre physico-chimique et la constante de proportionnalité  $k$  sont calculés en premier lieu en utilisant les valeurs maximales de la norme algériennes de potabilisation (Journal officiel N° 13 – 09 Mars 2014) des paramètres physicochimiques étudiés (Tableau II.5).

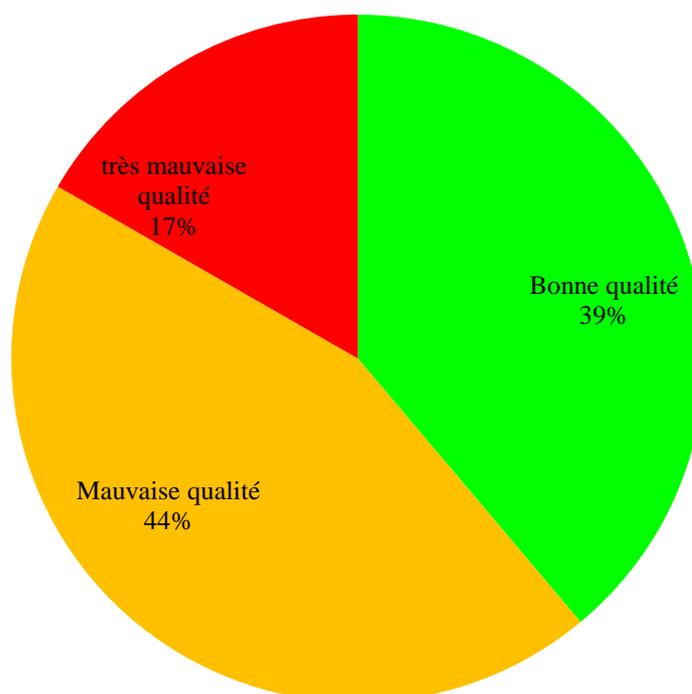
**Tableau II.5 :** Valeur limite de la norme Algériennes de potabilisation

Paramètres	Si (valeurs limite de la norme algériennes de potabilisation)	1/Si	Wi
T (°C)	25	0,0400	0,0807
pH	9	0,1111	0,2240
CE (µs/cm)	2800 à 20 °C	0,0003	0,0007
TH (°F)	50	0,0200	0,0403
Turb (NTU)	5	0,2000	0,4033
Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	200	0,0050	0,0101
Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	150	0,0066	0,0134
Na <sup>+</sup> (mg/l)	200	0,0050	0,0101
K <sup>+</sup> (mg/l)	12	0,0833	0,1680
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	400	0,0025	0,0050
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	500	0,0020	0,0040
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	50	0,0200	0,0403
		12,403	1,0000
	$K = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (1/S_i)}$	0,081	

Après le calcul de l'indice global de qualité IQE en utilisant les résultats d'analyses physico-chimiques et les valeurs limites de la norme Algérienne de potabilisation, la classe de qualité des eaux est déterminée pour les 18 points d'eaux. Ainsi, trois classes de qualité (bonne, mauvaise et très mauvaise) sont identifiées lors de campagne de Février 2023.

**Tableau II.6 :** Valeurs de l'indice IQE et classe de qualité des eaux souterraine de la région de M'Sila pendant la campagne de Février 2023

Point d'eau	IQE	Classe de qualité
F1	52,068	Mauvaise qualité
F2	60,685	Mauvaise qualité
F3	47,711	Bonne qualité
F4	58,196	Mauvaise qualité
F5	47,865	Bonne qualité
F6	64,576	Mauvaise qualité
F7	78,953	Très mauvaise qualité
F8	56,916	Mauvaise qualité
F9	89,406	Très mauvaise qualité
F10	53,356	Mauvaise qualité
F11	39,831	Bonne qualité
F12	91,959	Très mauvaise qualité
F13	34,751	Bonne qualité
F14	55,380	Mauvaise qualité
F15	41,722	Bonne qualité
F16	50,505	Mauvaise qualité
F17	35,353	Bonne qualité
F18	43,516	Bonne qualité



**Figure II.14 :** pourcentage de qualité des eaux souterraine de la région d'étude

#### II.6.4. Qualité des eaux destinées aux activités agricoles

Notre zone d'étude caractérisée par un climat semi-aride, où la salinisation et l'alcalinisation des eaux sont les principaux risques qui peuvent encourir les eaux destinées à l'irrigation. Dans le but d'évaluer ces deux risques, les résultats des analyses physicochimiques ont été projetées sur le digramme Riversids (U.S salinity Laboratory staff, 1954 *In* Hem, 1985). Sur cette représentation graphique, le risque de salinité est estimé par la conductivité exprimé en  $\mu\text{s/cm}$ . Alors que le risque d'alcalinisation des sols est quantifié par le S.A.R (sodium Adsorption Ratio). Ce dernier coefficient est calculé ainsi :

$$\text{SAR} = \frac{\text{NA}}{\sqrt{\frac{\text{Ca}+\text{Mg}}{2}}}$$

Tous les ions sont exprimés en **még/l**.

Dans la plupart des cas et pour la prédiction de l'effet des eaux d'irrigation en considérant les deux critères en même temps (salinisation et sodium), la classification de Riverside de l'USSL (1954) est la plus utilisée. Le diagramme de Riverside repose sur le croisement des deux critères : Le premier est la conductivité électrique (CE) en abscisse, les eaux sont classées de C1 à C4 selon le risque croissant de salinisation. Ce critère vise à quantifier la charge en sels de la solution et par voie de conséquence le risque de salinisation (accumulation de sel dans les sols). Le second est le SAR. (Sodium Adsorption Ratio) de l'eau en ordonnées, les eaux sont classées de S1 à S4 selon le risque croissant d'alcalinisation.

La figure II.15 présente la répartition des forages dans le diagramme de Richards (Riverside). Selon ce diagramme, la majorité des eaux des forages de notre zone d'étude appartient à la classe C3S1 de qualité moyenne à médiocre. Il existe des forages appartiennent à la classe C4S1 de qualité médiocre à mauvaise et des forages appartiennent à la classe C4S2 de mauvaise qualité (tableau II.7).

**Tableau II.7** : Classification des eaux d'irrigation selon Richards

Classes	Qualité	Appréciation
C1-S1	Bonne	Eau présentant une bonne qualité pour l'irrigation, utilisable avec précautions pour les plantes sensibles.
C1-S2, C2-S1	Moyenne à bonne	Eau de qualité bonne à moyenne a utilisé avec précaution pour les sols mal drainés et pour les plantes sensibles.
C2-S2, C1-S3, <b>C3-S1</b>	<b>moyenne à médiocre</b>	Qualité moyenne à médiocre a utilisé avec précaution ; nécessite un drainage avec des doses de lessivage et/ou apport de gypse.
C1-S4, C2-S3, C3-S2, <b>C4-S1</b>	<b>médiocre à mauvaise</b>	Eau de qualité médiocre à mauvaise, utilisée avec précaution pour les sols lourds et les plantes sensibles, l'emploi pour les sols légers et bien drainés nécessite une dose de lessivage et/ou apport de gypse.

C2-S4, C4-S2, C3-S3	mauvaise	Eau de qualité mauvaise utilisée que pour les sols légers et bien drainés et pour les plantes résistantes avec nécessité de doses de lessivages et/ou apport de gypse.
C3-S4, C4-S3	très mauvaise	Qualité très mauvaise à n'utiliser que pour les circonstances exceptionnelles.
C4-S4	Inutilisable	Déconseillée pour l'irrigation.

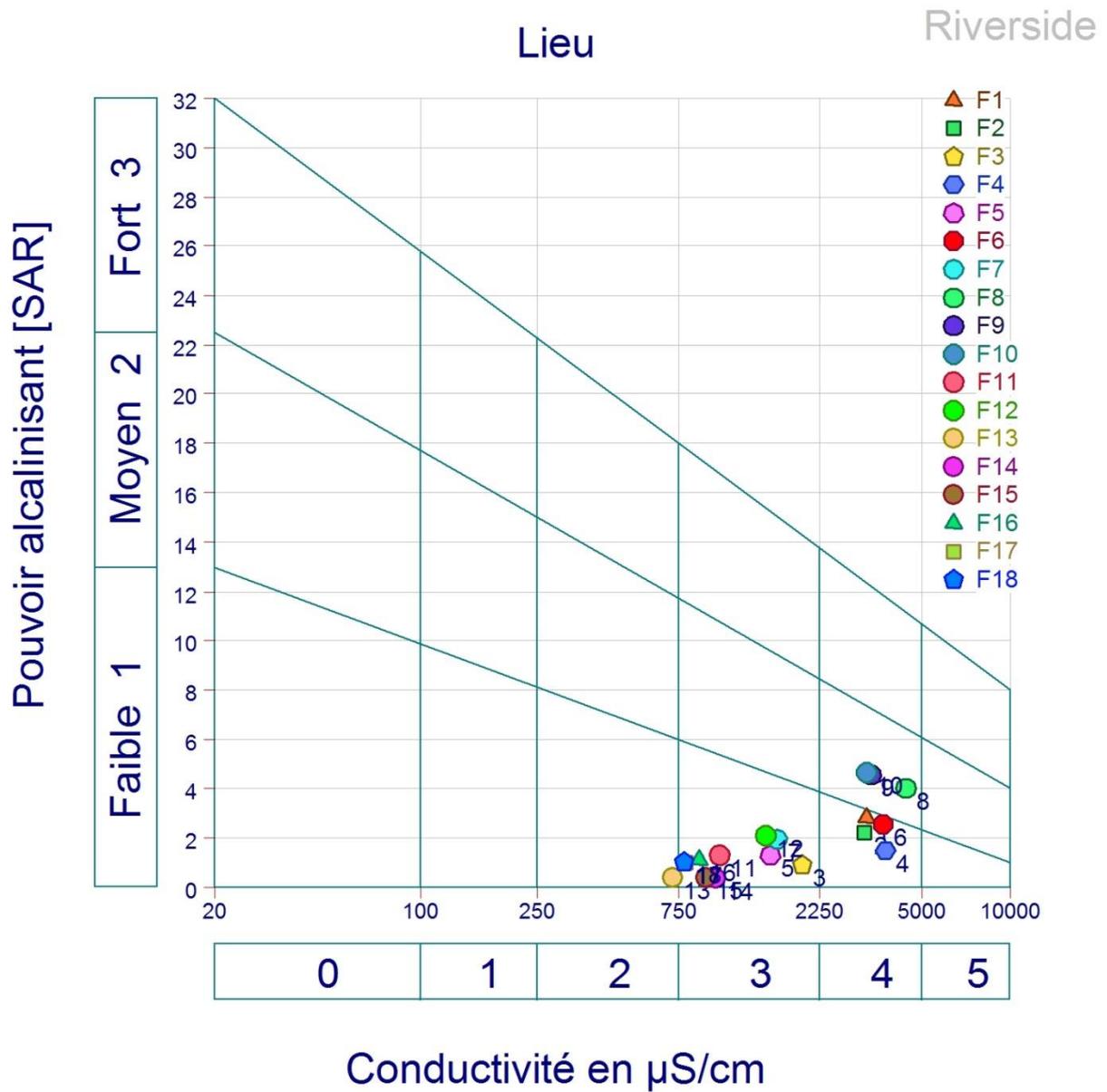


Figure II.15 : Présentation de l'aptitude des eaux de la zone d'étude à l'irrigation d'après le diagramme de Richard

## II.7. Analyse en Composantes Principales (ACP)

Cette analyse multidimensionnelle des données est une méthode factorielle et linéaire qui traite des caractères numériques (dans notre cas, les résultats des analyses chimiques).

Les résultats de l'analyse physico-chimique ont été traités en utilisant l'Analyse en Composantes Principales (ACP). Cette analyse fut introduite par (Pearson, 1901) et développée par (Hotelling, 1933). Elle a pour objectif de résumer de grands ensembles de données quantitatives. Ces données sont rangées dans un tableau comportant un grand nombre d'individus et/ou un grand nombre de variables et la simple lecture de ce tableau ne permet pas de saisir l'essentiel des informations qu'il contient. Cette analyse permet de synthétiser les données en construisant un petit nombre de variables nouvelles, les composantes principales. L'essentiel du tableau de données peut alors être saisi rapidement, à l'aide des représentations graphiques établies à partir de ces composantes principales. L'ACP contient ici 18 descripteurs (Forages) et 12 variables qui sont : T°C, pH, CE, TH, Turbidité, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup> et NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Elle a été réalisée à l'aide du logiciel XLSTAT.

**Tableau II.8 :** statistiques descriptives des variables physicochimiques des eaux souterraines de la zone d'étude

Variable	Observations	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
T (°C)	18	12,90	16,20	14,09	1,19
pH		6,90	8,00	7,54	0,36
CE (μS/cm)		715,00	4430,00	2091,33	1276,24
TH (°F)		32,00	152,00	75,33	38,87
Turb (NTU)		0,22	6,20	1,58	1,74
Ca <sup>2+</sup>		80,00	304,00	163,11	76,30
Mg <sup>2+</sup>		24,00	185,00	83,99	49,13
Na <sup>+</sup>		18,00	360,00	132,07	116,06
K <sup>+</sup>		3,00	9,50	6,36	1,80
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		120,00	1000,00	547,78	340,03
Cl <sup>-</sup>		21,00	639,00	194,53	185,48
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		5,00	50,00	18,96	12,24

La corrélation entre deux éléments est très bonne si elle est proche de 1. Le Tableau II.9 donne les différentes corrélations qui existent entre les éléments chimiques analysés dans les eaux.

**Tableau II.9** : Matrice de corrélation des paramètres physicochimiques des eaux souterraines

Variables	T	pH	CE	TH	Turb	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
T (°C)	<b>1</b>											
pH	-0,6585	<b>1</b>										
CE (µS/cm)	-0,5426	0,3799	<b>1</b>									
TH	-0,4981	0,3574	<b>0,9868</b>	<b>1</b>								
Turb (NTU)	-0,2239	0,0943	0,0096	-0,0427	<b>1</b>							
Ca <sup>2+</sup>	-0,4297	0,3002	<b>0,9762</b>	<b>0,9891</b>	-0,0584	<b>1</b>						
Mg <sup>2+</sup>	-0,5507	0,4031	<b>0,9774</b>	<b>0,9903</b>	-0,0264	<b>0,9590</b>	<b>1</b>					
Na <sup>+</sup>	-0,4853	0,3208	<b>0,8600</b>	<b>0,8203</b>	0,1624	<b>0,8384</b>	<b>0,7874</b>	<b>1</b>				
K <sup>+</sup>	-0,5872	0,4818	0,5077	0,4834	0,5192	0,4194	0,5345	0,4127	<b>1</b>			
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-0,5807	0,4221	<b>0,9791</b>	<b>0,9703</b>	0,0445	<b>0,9571</b>	<b>0,9632</b>	<b>0,8289</b>	0,6015	<b>1</b>		
Cl <sup>-</sup>	-0,5060	0,4483	<b>0,9528</b>	<b>0,9482</b>	-0,1266	<b>0,9317</b>	<b>0,9448</b>	<b>0,8469</b>	0,4311	<b>0,9112</b>	<b>1</b>	
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,5236	-0,3554	0,1876	0,2821	-0,0866	0,3409	0,2220	0,1572	-0,2690	0,1299	0,1617	<b>1</b>

**Corrélation  
significative**

**Corrélation non  
significative**

A l'analyse de ce tableau, on constate qu'il existe une corrélation significative entre la conductivité (CE) et le calcium (0,9762), la CE et le magnésium (0,9774), la CE et le sodium (0,8600), la CE et le sulfate (0,9791) et la CE et les chlorures (0,9528). Cette corrélation indique que l'essentiel de la conductivité des eaux provient de ces minéraux.

Une corrélation significative entre le titre Hydrométrique (TH) et le calcium (0,9891), le (TH) et le magnésium (0,9903) Cette corrélation indique que l'essentiel de dureté des eaux provient de ces deux minéraux.

### II.7.1. Etude des valeurs propres

Les valeurs propres nous renseignent sur la fraction de l'inertie totale prise en compte par chaque axe, ces valeurs nous ont permis d'estimer le nombre d'axes qui forme le plan de projection de l'information. Selon le critère de Kaiser (**Kaiser, 1960**) qui a été appliqué afin de déterminer le nombre total de facteurs (F) significatifs, seuls les facteurs ayant une valeur propre supérieure ou égale à 1 seront acceptés comme sources possibles de variance dans les données.

Pour les puits étudié, la variation totale (100%) est répartie selon les nombre valeurs propres. Cependant, deux seulement ont été retenus (F1 et F2). Ces facteurs représentent 80,01 % de la variance totale, ce qui est assez bon et peut être utilisée pour identifier de l'influence des paramètres physico-chimiques sur les sites. L'axe F1 exprime 61,87% de la variance et l'axe F2 exprime 18,15% de la variance.

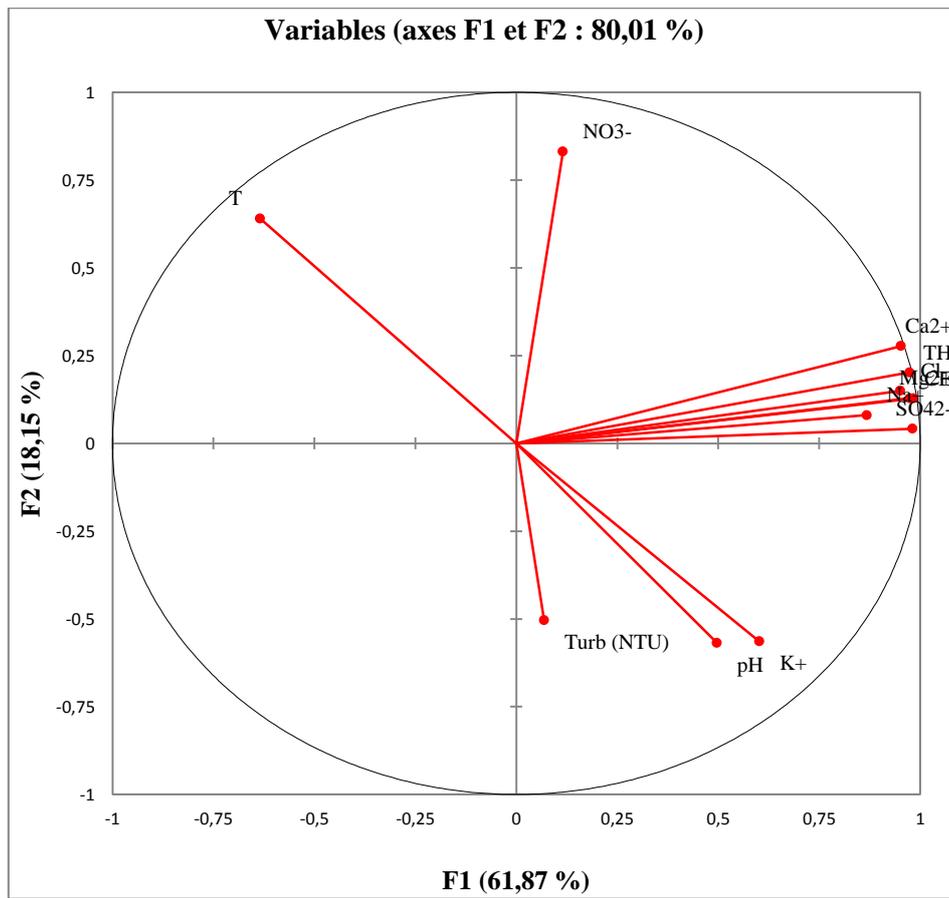


Figure II.16 : Cercle de corrélation des différentes variables selon le plan factoriel (F1et F2)

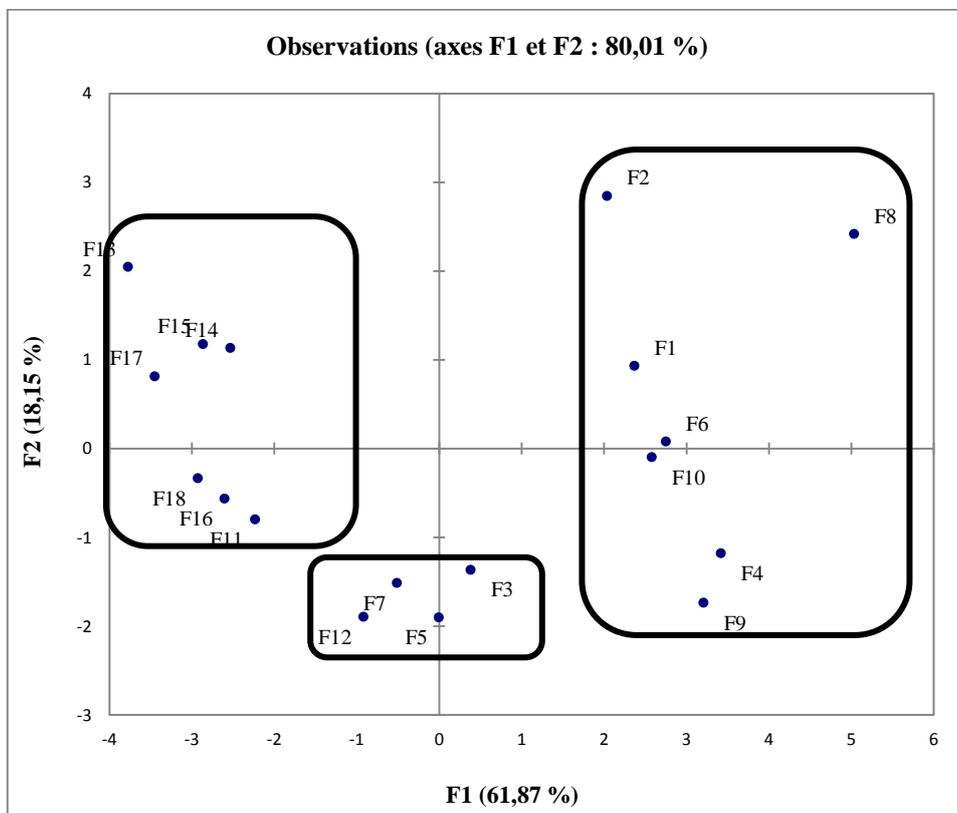


Figure II.17 : Répartition des stations dans le plan factoriel (F1-F2)

Dans le plan formé par les composantes principales F1 et F2 (Figure II.16), les variables les plus corrélées à la CP 1 sont : CE ( $\mu\text{S/cm}$ ),  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  et la dureté TH ( $^{\circ}\text{F}$ ) opposé aux T ( $^{\circ}\text{C}$ ). Parmi ces variables, celles qui contribuent de plus à la formation des groupes de l'axe F1, qui sont divisés en deux. Le premier regroupe : conductivité, calcium, magnésium, sodium, sulfate, chlorure et la dureté qui est fortement corrélés entre elles et positivement à l'axe F1, puisqu'ils définissent des vecteurs propres de même direction et le deuxième groupe qui est rassemblé par la température, qui est corrélée négativement avec cet axe.

En effet, l'axe F2 est défini par le nitrates  $\text{NO}_3^-$  vers son pôle positif opposé aux Turbidité, pH et le potassium.

La carte factorielle (Figure II.17) présente une distribution des 18 stations d'échantillonnage en trois groupes à savoir: 1, 2 et 3 selon leurs caractéristiques physiques et chimiques.

Les axes factoriels montrent que le groupe (1) formé par les forages F1, F2, F4, F6, F8, F9 et F10, sa localisation dans cet ensemble est liée à sa composition élevées de CE ( $\mu\text{S/cm}$ ),  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  et la dureté (TH), Ces variables décrivent généralement la forte minéralisation des eaux analysées et les eaux carbonatées d'origine profonde. En outre les stations : F2, F8 sont caractérisées par des valeurs élevées de Nitrates, qui sont principalement d'origine humaine (Moussa *et al.*, 2018).

## II.8. Conclusion partielle

Cette étude permet de visualiser la situation des eaux souterraines de notre zone d'étude, de point de vue hydro chimique et qualité.

- Après le calcul de l'indice global de qualité IQE en utilisant les résultats d'analyses physico-chimiques et les valeurs limites de la norme Algérienne de potabilisation, la classe de qualité des eaux est déterminée pour les 18 points d'eaux. Ainsi, trois classes de qualité (bonne 39%, mauvaise 44% et très mauvaise 17%) sont identifiées lors de campagne de Février 2023.
- La projection des résultats des analyses des eaux prélevées pendant la campagne de Février 2023 sur le diagramme de Piper montre que le chimisme des eaux analysées des aquifères de notre zone d'étude (F1 – F18) est caractérisée par un faciès chimique Chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne, à l'exception du forage (F13) située à Ouled Derradj représente un faciès chimique Bi/Carbonatée calcique et magnésienne.
- En termes de qualité de l'eau pour l'irrigation, le diagramme de Riverside a montré que la majorité des eaux des forages de notre zone d'étude appartient à la classe C3S1 de qualité moyenne à médiocre. Il existe des forages appartiennent à la classe C4S1 de qualité médiocre à mauvaise et des forages appartiennent à la classe C4S2 de mauvaise qualité.

# Conclusion générale

## **Conclusion générale**

Dans cette étude nous utilisons les systèmes d'information géographique ainsi que l'indice de qualité des eaux (IQE) pour voir l'évolution et répartition des éléments physico-chimiques et l'évaluation de la qualité des eaux souterraine de la région de M'Sila :

- Les résultats de l'analyse physico-chimique des échantillons d'eau souterraine ont été comparés avec les normes algériennes de potabilité de l'eau par l'utilisation de l'indice de qualité de l'eau IQE, cette comparaison confirme l'existence de trois classes de qualité (bonne 39%, mauvaise 44% et très mauvaise 17%) lors de la campagne de Février 2023.
- La projection des résultats des analyses des eaux prélevées pendant la campagne de Février 2023 sur le diagramme de Piper montre que le chimisme des eaux analysées des aquifères de notre zone d'étude (F1 – F18) est caractérisée par un faciès chimique Chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne, à l'exception du forage (F13) située à Ouled Derradj représente un faciès chimique Bi/Carbonatée calcique et magnésienne.
- En termes de qualité de l'eau pour l'irrigation, le diagramme de Riverside a montré que la majorité des eaux des forages de notre zone d'étude appartient à la classe C3S1 de qualité moyenne à médiocre. Il existe des forages appartiennent à la classe C4S1 de qualité médiocre à mauvaise et des forages appartiennent à la classe C4S2 de mauvaise qualité.
- L'analyse des données hydrogéochimiques à l'aide de l'analyse en composantes principales ont montré la présence de trois groupes des points d'eau. L'ACP explique 80,01 % de la variance totale, Cependant, deux facteurs seulement ont été retenus (F1 et F2). Ces facteurs représentent 80,01 % de la variance totale, ce qui est assez bon et peut être utilisée pour identifier de l'influence des paramètres physico-chimiques sur les sites. L'axe F1 exprime 61,87% de la variance et l'axe F2 exprime 18,15% de la variance.

A partir de ces résultats obtenus, nous proposons les recommandations :

- Réaliser des études spatio-temporelles des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines pour comprendre leur évolution et suivre en continu la qualité de l'eau ;
- La recharge de la nappe ;
- L'installation d'un réseau de piézomètres bien répartis à travers la nappe pour contrôler la fluctuation de la surface piézométrique.

## Références bibliographiques

- Abdelghani Talhaoui, Abdellah El Hmaidi, Hajar Jaddi, Habiba Ousmana, Imad Manssouri. (2020).** Calcul De L'indice De Qualité De L'eau (IQE) Pour L'évaluation De La Qualité Physico-Chimique Des Eaux Superficielles De L'Oued Moulouya'(NE, Maroc). European Scientific Journal edition Vol.16, No.2 ISSN: 1857 – 7881.
- Abdoulaye Demba N'diaye, KhadijettouMint Mohamed Salem, Mohamed Brahim El Kory, Mohamed Ould Sid' Ahmed OuldKankou, Michel Baudu. (2014).** Contribution à l'étude de l'évolution Spatio-temporelle de la qualité physicochimique de l'Eau de la Rive droite du fleuve Sénégal, *J. Mater. Environ. Sci.* 5 (1) 320-329.
- Amroune Abdelouahab, (2018).** Etude de l'apport hydrochimique dans la connaissance du fonctionnement de la nappe alluviale de la région nord du Hodna (Sud-Est algérien), Thèse de doctorat. Université de Batna.
- Bebba, N. (2018).** Impact des paramètres environnementaux et distribution spatio-temporelle des éphéméroptères dans les oueds de biskra et batna (Doctoral dissertation).
- Benaouira Ahlam, Benzaoui Manel. (2023).** Contribution à une enquête sur la conduite d'élevage bovin laitiers dans la wilaya de M'sila, Mémoire de master. Université de M'sila.
- Benselama Oumkhaltoum Iyna, (2023).** Caractérisation de la matière organique dans un sol alluvial naturel du Mezrir Importance de la séquestrtion. Mémoire de master. Université de M'sila.
- Bermond R. et Perrdon C (1979).** Paramètres de la qualité des eaux. Ministère de l'environnement Paris, 259.
- Chapman D., Kimstach V (1996).** Selection of water quality variables. Water quality assessments : a guide to the use of biota, sediments and water in environment monitoring, Chapman edition, 2nd ed. E & FN Spon, London, 59-126.
- Custodio, E. (2002).** Groundwater Quality : Genesis and Contamination. Taylor & Francis.
- Deliste C.E.et Schmidt J.W. (1977).** The effects of sulphur on water and aquatic life in Canada. Dans: *Sulphur and itsinorganicderivatives in the Canadian environnement*, NRCC No. 15015, comité associé sur les critères scientifique concernant l'état de l'environnement, Conseil national de recherches du Canada, Ottawa.
- D.S.A, 2023.** Direction des services agricoles de la wilaya de M'sila : bureau statistiques.
- Freeze, R.A. and Cherry, J.A. (1979).** Groundwater. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, Vol. 7632, 604.
- Gravelius H. (1914).** Grundrifi der gesamten Gewcisserkunde. Band I: Flufikunde (Compendium of Hydrology, Vol. I. Rivers, in German). Goschen, Berlin.
- Guesri M. (2021).** Influence de la variabilité climatique sur la production des sédiments. Thèse doctorat, Université de Tlemcen.
- Hadjab M, 1998.** Aménagement et protection des milieux naturels dans la cuvette centrale du Hodna (Algérie). Thèse Doctorat Science géologiques et de l'aménagement, Université D'Aix Marseille 1, France. p240.
- Horton R. (1932).** Drainage Basin Characteristics. Transactions, American Geophysical Union, 13, 350-361.

- KABACHE Zakiya, RAHABI Hadjer. (2023).** Etude comparative des différentes méthodes d'estimation de l'évapotranspiration en zone aride (Cas de la région de M'sila), Mémoire de master. Université de M'sila.
- Kaiser H.F. (1960).** The application of electronic computers to factor analysis. *Educ. Psychol. Meas.*, 20: 141-151.
- Kouassi AM, Mamadou A, Ahoussi KE, Biemi J. 2013.** Simulation de la conductivité électrique des eaux souterraines en relation avec leurs propriétés géologiques : cas de la Côte d'Ivoire. *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, 21-22: 138-166.
- Mansouri F. (2011).** Étude de la qualité des eaux souterraines de la région de chemora wilaya de Batna East Algérien. Mémoire de master en ouvrage hydraulique et aménagement. Université de M'sila.
- Matthess G (1994).** *Geol. Mijinbouw*, 53, 194. -In Forstner U ETWittmann GTW *Metal pollution in the Aquatic Environment*, 355-359.
- Moussa R. S., Alma M. M. M., Laouli M. S., Natatou I. & Habou, I. (2018).** Caractérisation physico-chimique des eaux des aquifères du Continental Intercalaire/Hamadien et du Continentalsiems Terminal de la région de Zinder (Niger). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 12(5), 2395-2411.
- Musy A. & Higy C. (2004).** *Hydrologie: Une science de la nature* (Vol. 21). PPUR presses polytechniques.
- Nisbet E.G.et Verneau O (1970).** Composantes chimiques des eaux courantes, discussion et proposition de classes en tant que bases d'interprétation des analyses chimiques. *Ann. Limn*, 6(2) 161-190.
- Nordine Nouayti, Driss Khattach1, Mohamed Hilali, (2015).** Evaluation de la qualité physico-chimique des eaux souterraines des nappes du Jurassique du haut bassin de Ziz (Haut Atlas central, Maroc) Assessment of physico-chemical quality of groundwater of the Jurassic aquifers in high basin of Ziz (Central High Atlas, Morocco). *J. Mater. Environ. Sci.* 6 (4) 1068-1081.
- P.A.W.M, 2009.** Plans d'aménagement de la wilaya de m'sila, évaluation territorial "bilan critique et problématique d'aménagement. P117.
- Pesson P (1979).** Pollution des eaux continentales, incidences sur les biocénoses aquatiques 97-101.
- Ramade F, 2003.** *Eléments d'Ecologie : fondamentale*. Ed. Dunod, paris. 690p. remplacement. CRAAO ; 30 éme symposium sur les bovins laitiers. *Renc.Rech.Ruminants*.
- Rodier J. (1984).** *L'analyse de l'eau. Eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer*. 7ème édition, Dunod, Paris, 1353.
- Rodier J. (2009).** *L'analyse de l'eau*, 9e édition. DUNOD (éditeur), Paris, France. 1579.
- Sassolas-Serrayet T., Cattin R. & Ferry, M. (2018).** The shape of watersheds. *Nature communications*, 9(1), 1-8.
- Schumm S.A. (1956).** Evolution of Drainage Systems & Slopes in Badlands at Perth, New Jersey. *Bulletin of the Geological Society of America*, 67, 597-646.
- Todd, D. and Mays, L. (2005).** *Groundwater Hydrology*. 3rd Edition, John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, 652 p.

## ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم نوعية المياه الجوفية في منطقة المسيلة اعتماداً على مؤشر جودة المياه الرقمي IQE . وللقيام بذلك، تم تنفيذ حملة أخذ العينات في فبراير 2023. وتضمنت ثمانية عشر بئر. تعتمد المنهجية أولاً على التوصيف الفيزيائي والكيميائي لهذه المياه من خلال الإحصائيات الأولية وتحديد سحناتها الكيميائية باستخدام مخطط بايبر. بعد ذلك، تتم مناقشة طريقة حساب مؤشر IQE. أظهرت النتائج أن كيمياء المياه التي تم تحليلها في منطقة دراستنا (F1 – F18) تتميز بسحنة كيميائية للكوريد والكالسيوم وكبريتات المغنيسيوم، باستثناء البئر (F13) الذي يحتوي على السحنة الكيميائية ثنائية/كربونات الكالسيوم والمغنيسيوم. تؤكد نتائج مؤشر IQE و نتائج الإحصائيات الأساسية أن 39% من نقاط المياه تنتمي إلى فئة الجودة الجيدة، و44% إلى فئة الجودة الرديئة، و17% تنتمي إلى فئة الجودة الرديئة جداً. وتشكل هذه النتائج قاعدة بيانات لإدارة موارد المياه الجوفية في المنطقة.

**الكلمات المفتاحية :** المياه الجوفية، سحنة كيميائية، مؤشر جودة المياه، تحليل المكونات الرئيسية.

## Résumé

Cette étude a pour but d'évaluer la qualité des eaux souterraines de la région de M'Sila à partir d'un indice numérique IQE. Pour ce faire, une campagne d'échantillonnage a été réalisée en février 2023. Elle a porté sur dix-huit forages. La méthodologie est basée d'abord sur la caractérisation physico-chimique de ces eaux à travers les statistiques élémentaires et la détermination de leurs faciès chimiques à l'aide du diagramme de Piper. Ensuite, la méthode de calcul de l'indice IQE est abordée. Les résultats montrent que le chimisme des eaux analysées de notre zone d'étude (F1 – F18) est caractérisée par un faciès chimique Chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne, à l'exception du forage (F13) qui présente un faciès chimique Bi/Carbonatée calcique et magnésienne. Les résultats de l'indice IQE confirment ceux des statistiques élémentaires. Ils montrent que 39% des points d'eau appartiennent à la classe de qualité bonne, 44% à la classe de qualité mauvaise et 17% appartiennent à la classe de qualité très mauvaise. Ces résultats constituent une base de données dans le cadre de la gestion des ressources en eau souterraine de la région.

**Mots clés :** Eaux souterraines, Faciès chimique, IQE, ACP.

## Abstract

This study aims to assess the quality of groundwater in in the M'Sila region using a WQI numerical index. To do this, a sampling campaign conducted in February 2023 focused on eighteen boreholes. The methodology is based first on the physico-chemical characterization of these waters through elemental statistics and the determination of their chemical facies using the Piper diagram. Then the numerical index WQI method was applied. The results show that the chemistry of the waters analyzed in our study area (F1 – F18) is characterized by the calcimagnesian sulfate-chloride facies, with the exception of the borehole (F13) which presents the calcic and magnesian bicarbonate facies. WQI results confirmed those of elementary statistics. They showed that 39% of the water points belong to the good quality class, 44% to the poor quality class and 17% belong to the very poor quality class. These results constitute a database for the management of the region groundwater resources.

**Keywords:** Groundwater, Chemical facies, WQI, PCA.