



Mémoire

Présenté à la faculté de technologie
Département de l'hydraulique

Par : **Mr. OUMLABAT** Mohamed Abdessamed
Mr. HEMDANE Ali

Pour l'obtention du diplôme de :
Master académique
Filière : Hydraulique
Option : Ressources Hydrauliques

Thème :

**Variation spatio-temporelle et statistique de la
qualité des eaux souterraines de la plaine de Hodna**

Soutenu publiquement le /...../ 2022 devant le jury composé de :

Mr.	Président
Mr. FERHATI	Ahmed	Promoteur
Mr.	Examinateur
Mr.	Examinateur
Mr.	Examinateur

Remerciements

Avant tout, nous remercions notre dieu tout puissant, de nous avoir donné le courage et les moyens pour effectuer ce travail, Alhamdulillah.

Nous tenons tout particulièrement à témoigner nos sincères remerciements à tout le staff pédagogique du département de l'hydraulique de l'université de M'sila, pour son encadrement durant l'année universitaire 2021/2022, sans oublier notre encadreur Mr FERHATI Ahmed, pour ses conseils judicieuses et orientations pendant la conception de ce travail.

✨ Dédicaces ✨

Je dédie ce modeste travail :

A mes parents et ma femme pour leur soutien exceptionnel durant ce parcours d'étude restreint.

A mes frères, mes sœurs et mes deux fils.

A mes amis et collègues de travail.

OUM, ABAT Mohamed Abdessamed

✨ Dédicaces ✨

Je dédie ce travail :

A ma mère

A mon père

Pour tous les sacrifices et le soutien moral et matériel dont ils ont fait preuve pour que je réussisse.

A mes frères et sœurs.

A tous mes amis et spécialement mes amis et frères en ALLAH.

HEMDANE ali

ملخص:

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو تشخيص لنوعية المياه الجوفية في جزء من سهل الحضنة. أولاً، بدأنا بدراسة السياق الجغرافي والجيولوجي والهيكلي الهيدروجيولوجي للمنطقة قيد الدراسة. بعد ذلك، وبناءً على المعطيات الفيزيو-كيميائية التي تم جمعها لإحدى وأربعين نقطة استغلال (بئر مياه عميق)، قمنا بدراسة المعايير الإحصائية لهذه العينات، ثم قمنا بتحليل هذه المتغيرات الكيميائية مكانياً باستخدام نظام المعلومات الجغرافية، ومقارنة القياسات لفترتين (2019 و2021).

وأعقب الدراسة تحليل للنمط العنصري الكيميائي لهذه المياه، ثم التحليل بواسطة تقنيات إحصائية متعددة المتغيرات، حيث نخص بالذكر: طريقة تحليل المكونات الرئيسية وطريقة التجميع الهرمي.

وأخيراً، وعلى أساس نفس المعلومات الفيزيو-كيميائية، أجرينا خريطة لنوعية المياه للمنطقة قيد الدراسة وفقاً للمعايير والحدود المذكورة في المرسوم التنفيذي الجزائري رقم 11-125.

Résumé :

L'objectif principal de ce travail est de faire un diagnostic de la qualité des eaux souterraines relative à une partie de la plaine de Hodna. Tout d'abord, nous avons commencé par l'étude du contexte géographique, géologique et la structure hydrogéologique de la zone d'étude. Ensuite, on se basant sur les données physico-chimiques collectées de quarante et un points d'exploitation (forages), nous avons étudiés les paramètres statistiques de ces échantillons, puis analysés spatialement ces variables chimique en utilisant le système d'information géographique, et on comparant les campagnes de mesures de deux périodes (2019 et 2021).

L'étude a été suivie par l'analyse des faciès chimique de ces eaux, et une analyse par des techniques statistiques multivariés à savoir : l'analyse des composantes principales et le regroupement hiérarchique.

En fin, nous avons réalisé sur la base des mêmes informations physicochimiques, une cartographie de la qualité de l'eau selon les normes et limites citées dans le Décret exécutif Algérien n° 11-125.

Abstract :

The main objective of this work is to diagnose the quality of ground water in a part of the Hodna plain. First, we began by studying the geographical and geological context and the hydrogeological structure of the study area. Then, based on the physico-chemical data collected of forty-one operating points (drilling), we studied the statistical parameters of these samples, then spatially analyzed these chemical variables using the Geographic Information System, and compare the measurements of two periods (2019 and 2021).

The study was followed by the analysis of the chemical facies of these waters, and an analysis by multivariate statistical techniques namely: the analysis of the main components and the hierarchical grouping.

Finally, on the basis of the same physicochemical information, we carried out a mapping of water quality according to the standards and limits cited in Algerian Executive Decree no. 11-125.

<u>Sommaire</u>	<u>Page</u>
ملخص	
Résumé	
Abstract	
Liste des tableaux	01
Liste des figures	03
Liste des abréviations	06
Introduction générale	07
Chapitre I : Présentation de la zone d'étude	08
I-1) Introduction	09
I-2) Situation géographique et localisation administrative de la zone d'étude ...	09
I-3) Le cadre géomorphologique de la zone d'étude	11
I-3-1) Les montagnes	11
I-3-2) Le piedmont	11
I-3-3) La plaine	11
I-3-4) Le chott d'El Hodna	11
I-4) Cadre géologique de la zone d'étude	11
I-4-1) Le Quaternaire	12
a) Quaternaire ancien	12
b) Quaternaire moyen	12
c) Quaternaire récent	12
I-4-2) Le Miocène	12
a) Miocène inférieur	12
b) Miocène supérieur	12
I-4-3) Le Pliocène continental	13
I-4-4) L'Eocène	13
I-4-5) Le Crétacé	13

a) Crétacé inférieur	13
b) Crétacé supérieur	13
I-5) Réseau hydrographique	14
I-6) La structure hydrogéologique de la zone d'étude	15
I-7) Les caractéristiques physiques de la zone d'étude	17
I-8) Aperçu climatique de la zone d'étude	17
I-8-1) Précipitations moyennes mensuelles	18
I-8-2) Précipitations moyennes saisonnières	18
I-8-3) Précipitations moyennes interannuelles	20
I-8-4) Température	20
I-8-5) Vent	21
I-8-6) Humidité	22
I-9) Inventaire des points d'eaux	23
I-10) Conclusion	27
Chapitre II : Hydrogéochimie des eaux souterraines	28
II-1) Introduction	29
II -2) Analyse statistique des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines.....	29
II -2-1) Les paramètres physiques	29
a) Le potentiel hydrogène (pH)	29
b) La température °C	31
c) Conductivité électrique CE en (µs/cm)	31
d) TDS (Total dissolved solids)	32
II -2-2) Les paramètres chimiques	33
a) Le calcium (Ca ²⁺)	33
b) Le Magnésium (Mg ²⁺)	34
c) Le Sodium (Na ⁺)	35
d) Le Potassium (K ⁺)	35

e) Le chlorure (Cl^-)	36
f) Le Sulfate (SO_4^{2-})	36
g) Le Bicarbonate (HCO_3^-)	37
h) Le Nitrate (NO_3^-)	37
II-2-3) Analyse et discussions des résultats.....	38
II -3) Analyse spatiale et les cartes hydro-chimiques	39
II -3-1) Aperçu général sur les méthodes d'interpolations dans le SIG	39
II -3-2) Pondération par Distance Inverse (IDW)	39
II -3-3) Les cartes des répartitions spatiales hydro-chimiques	40
II -4) Faciès hydro-chimiques	46
II -4-1) Outil de traitement	46
II -4-2) Classification de Piper	46
II -4-3) Classification de Schoeller et Berkloff	49
II-4-4) Indices de saturation et équilibres chimiques	56
II-4-5) Origine des minéraux évaporitiques	56
II-4-6) Origine des minéraux carbonatés	58
II -4-7) Analyse et discussions des résultats.....	59
II -5) Analyses statistiques multivariées des variables physico-chimiques	60
II -5-1) L'Analyse en composantes principales (ACP)	60
II -5-1-1) Principe de la (ACP)	60
II -5-1-2) Méthodologie	60
II -5-1-3) Les résultats d'application de L'ACP sur des données chimiques	60
a) Matrice de corrélation	60
b) Etude des valeurs propres, variables et des individus (Observations)	64
II -5-2) L'analyse par la méthode de classification ascendante hiérarchique (CAH)	66
II -5-2-1) Principe de la (CAH)	66
II -5-2-2) Avantages de la classification ascendante hiérarchique	66

II -5-2-3) Les résultats d'application de la (CAH) sur des données	66
II -6) Conclusion	69
Chapitre III : indice de la qualité des eaux souterraines	70
III-1) Introduction	71
III -2) Définition de l'indice de qualité des eaux souterraines (IQES)	71
III -3) Méthode de calcul de l'indice de qualité des eaux souterraines (IQES) ...	72
III -4) Répartition spatiale de l'indice de qualité des eaux souterraine de la période 2021.....	75
III -5) Conclusion	76
Conclusion générale.....	77
Références bibliographiques.....	79

<u>Liste des tableaux</u>	<u>Page</u>
Tab n°(I-01) : Caractéristiques physiques de la zone d'étude.....	17
Tab n° (I-02) : Précipitations moyennes annuels de la zone d'étude.....	18
Tab n° (I-03) : Températures moyennes, maximales et minimales.....	20
Tab n° (I-04) : Vitesses de vents moyennes et maximales en (m/s).....	21
Tab n° (I-05) : L'humidité relative en (%)......	22
Tab n° (I-06) : Inventaire des points d'eaux (F1 – F20).....	24
Tab n° (I-07) : Inventaire des points d'eaux (F21 – F41).....	25
Tab n° (II-01) : Statistiques du pH des eaux souterraines de la zone d'étude....	30
Tab n° (II-02) : Statistiques de la température dans la zone d'étude.....	31
Tab n° (II-03) : Statistiques de la conductivité électrique des eaux souterraines de la zone d'étude.....	32
Tab n° (II-04) : Statistiques du TDS des eaux souterraines de la zone d'étude	33
Tab n° (II-05) : Statistiques du Ca ²⁺ des eaux souterraines de la zone d'étude	34
Tab n° (II-06) : Statistiques du Mg ²⁺ des eaux souterraines de la zone d'étude	34
Tab n° (II-07) : Statistiques du Na ⁺ des eaux souterraines de la zone d'étude...	35
Tab n° (II-08) : Statistiques du K ⁺ des eaux souterraines de la zone d'étude...	35
Tab n° (II-09) : Statistiques du Cl ⁻ des eaux souterraines de la zone d'étude...	36
Tab n° (II-10) : Statistiques du SO ₄ ²⁻ des eaux souterraines de la zone d'étude	37
Tab n° (II-11) : Statistiques du HCO ₃ ⁻ des eaux souterraines de la zone d'étude.....	37
Tab n° (II-12) : Statistiques du NO ₃ ⁻ des eaux souterraines de la zone d'étude.....	38
Tab n° (II-13) : Valeurs moyenne des ions en milliéquivalent par litre.....	38
Tab n° (II-14) : Matrice de corrélation pour la période de 2019.....	60

Tab n° (II-15) : Matrice de corrélation pour la période de 2021.....	61
Tab n° (II-16) : Couples corrélés des périodes 2019 et 2021.....	61
Tab n° (III-01) : Statut de la qualité de l'eau basée sur IQES.....	72
Tab n° (III-02) : Paramètres de qualité d'eau, valeurs standard, les valeurs idéales et facteurs de poids de l'eau.....	72
Tab n° (III-03) : L'indice de qualité pour la deuxième classe.....	73
Tab n° (III-04) : L'indice de qualité pour la troisième classe.....	74
Tab n° (III-05) : L'indice de qualité pour la quatrième classe.....	74
Tab n° (III-06) : Etat récapitulatif de la qualité des eaux souterraines.....	75

<u>Liste des figures</u>	<u>Page</u>
Fig n° (I-01) : Situation géographique de la zone d'étude.....	09
Fig n° (I-02) : Situation administratif de la zone d'étude.....	10
Fig n° (I-03) : Géologie de la zone d'étude extraite de la carte géologique de l'Algérie (1/500 000).....	13
Fig n° (I-04) : Coupe géologique schématique à travers le Hodna (GUIRAUD, 1969).....	14
Fig n° (I-05) : Le réseau hydrographique et les sous bassins versants de la zone d'étude	15
Fig n° (I-06) : Les nappes d'eaux souterraines dans le bassin versant de Hodna	16
Fig n° (I-07) : Variation des précipitations moyennes mensuelles	19
Fig n° (I-08) : Le régime saisonnier des précipitations saisonnières.....	19
Fig n° (I-09) : Variations des précipitations interannuelles.....	20
Fig n° (I-10) : Variations de la température en °C.....	21
Fig n° (I-11) : Variations des vitesses de vent en (m/s).....	22
Fig n° (I-12) : Variations de l'humidité relative en (%)	23
Fig n° (I-13) : Positionnement des forages dans la zone d'étude	26
Fig n° (II-01) : Variation du pH en fonction des forages	30
Fig n° (II-02) : Variation de la conductivité en fonction des forages.....	32
Fig n° (II-03) : Variation de la TDS en fonction des forages.....	33
Fig n° (II-04) : Principe de la méthode IDW.....	39
Fig n° (II-05) : Variation de la conductivité électrique entre 2019 et 2021	41
Fig n° (II-06) : Variation du calcium entre 2019 et 2021	42
Fig n° (II-07) : Variation du magnésium entre 2019 et 2021.....	42
Fig n° (II-08) : Variation du sodium entre 2019 et 2021	43
Fig n° (II-09) : Variation du potassium entre 2019 et 2021.....	43
Fig n° (II-10) : Variation du potassium entre 2019 et 2021	44

Fig n° (II-11) : Variation du bicarbonate entre 2019 et 2021.....	44
Fig n° (II-12) : Variation de sulfate entre 2019 et 2021.....	45
Fig n° (II-13) : Variation de nitrate entre 2019 et 2021.....	45
Fig n° (II-14) : Diagramme de PIPER de la zone d'étude (compagnie 2019 F1-F30)	47
Fig n° (II-15) : Diagramme de PIPER de la zone d'étude (compagnie 2019 F31-41)	47
Fig n° (II-16) : Diagramme de PIPER de la zone d'étude (compagnie2021 F1-F30)	48
Fig n° (II-17) : Diagramme de PIPER de la zone d'étude (compagnie 2021 F31-F41)	48
Fig n° (II-18) : Diagramme de Schoeller-Berkaloff appliqué aux eaux souterraines de la région d'étude (compagnie 2019 de F1 à F14).....	50
Fig n° (II-19) : Diagramme de Schoeller-Berkaloff appliqué aux eaux souterraines de la région d'étude (compagnie 2019 de F15 à F28).....	51
Fig n° (II-20) : Diagramme de Schoeller-Berkaloff appliqué aux eaux souterraines de la région d'étude(compagnie 2019 de F29 à F41)	52
Fig n° (II-21) : Diagramme de Schoeller-Berkaloff appliqué aux eaux souterraines de la région d'étude(compagnie 2021 de F1 à F14).....	53
Fig n° (II-22) : Diagramme de Schoeller-Berkaloff appliqué aux eaux souterraines de la région d'étude(compagnie 2021 de F15 à F28)	54
Fig n° (II-23) : Diagramme de Schoeller-Berkaloff appliqué aux eaux souterraines de la région d'étude(compagnie 2021 de F29 à F41)	55
Fig n° (II-24) : Variation de l'indice de saturation des minéraux évaporitiques et carbonatés (Période2019)	57
Fig n° (II-25) : Variation de l'indice de saturation des minéraux évaporitiques et carbonatés (Période 2021).....	57
Fig n° (II-26) : (Ca) = f (SO4).....	58
Fig n° (II-27) : (Mg) = f (SO4).....	58
Fig n° (II-28) : (Na) = f (SO4)	58
Fig n° (II-29) : (Na) = f (Cl)	58
Fig n° (II-30) : (Mg) = f (HCO3)	59
Fig n° (II-31) : (Ca) = f (HCO3)	59

Fig n° (II-32) : Cercle de corrélation des variables sur le plan (F1 et F2) de la période 2019.....	63
Fig n° (II-33) : Cercle de corrélation des variables sur le plan (F1 et F2) de la période 2021.....	63
Fig n° (II-34) : Répartition des individus sur le plan (F1 et F2) de la période 2019	64
Fig n° (II-35) : Répartition des individus sur le plan (F1 et F2) de la période 2021	65
Fig n° (II-36) : Dendrogramme de l'analyse de faisceau hiérarchique (Q-mode) de la période 2019.....	67
Fig n° (II-37) : Dendrogramme de l'analyse de faisceau hiérarchique (Q-mode) de la période 2021	67
Fig n° (III-01) : Histogramme de classification de la qualité des eaux	75
Fig n° (III-02) : Répartition spatiale de l'IQES en 2021.....	76

Liste des abréviations

ACP :	Analyse en composantes principales
ADE :	Algérienne des eaux
AGIRE	Agence nationale de gestion intégrée des ressources en eaux
CE :	Conductivité électrique
C° :	Degré Celsius
CAH :	Classification ascendante hiérarchique
IDW :	Inverse Distance Weighting
IQES :	Indice de qualité des eaux souterraines
méq/l :	Milliéquivalent par litre
mg/l :	Milligramme par litre
m/s :	Mètre par seconde
NASA :	National Aeronautics and Space Administration
OMS :	Organisation mondiale de la santé
pH :	Potentiel hydrogène
POWER :	Prediction Of World wide Energy Resources
RN :	Route nationale
SIG :	Système d'information géographique
TDS :	Total Dissolved Solids
UTM :	Universal Transverse Mercator
µs/cm :	Micro-siemens par cm
WGS :	World Geodetic System

Introduction générale :

Les ressources en eau sont essentielles pour le développement durable à l'échelle mondiale. En raison de la croissance démographique rapide, du développement économique et d'autres défis qui affectent les ressources naturelles, l'eau est devenue un bien précieux.

Les ressources en eaux souterraines à travers le monde sont considérées comme une précieuse source pour répondre à l'agriculture, l'utilisation domestique et aux exigences industrielles. Cela est particulièrement vrai pour les régions arides à semi-arides où les précipitations sont rares et l'approvisionnement en eau de surface est pratiquement négligeable.

Dans ces régions, les ressources souterraines sont également caractérisées par une importante variabilité spatio-temporelle, ce qui rend important la connaissance des bases hydro chimiques d'un aquifère. Cette dernière suggère l'évaluation et la compréhension des procédés chimiques naturels qui se produisent dans l'aquifère et qui est un facteur clé pour définir l'origine de la minéralisation et la qualité des eaux, ainsi que les différents processus responsables de l'acquisition leurs chimisme à savoir : le temps de séjours en contact avec l'encaissant, l'interaction ; la dissolution/précipitation des minéraux et d'une manière moindre l'infiltration des substances liées aux activités anthropiques.

La région de M'Sila se trouvant à 250 Km au sud-est d'Alger, la capitale, par son climat aride à semi-aride fait partie d'une région naturelle où les ressources en eau souterraine constituent la principale source d'approvisionnement (AMROUNE 2018) .L'exploitation intensive de ces ressources et la variabilité climatique dans cette région a entraîné une baisse générale du niveau des nappes, et cela a fortement influencé le fonctionnement hydro chimique des aquifères situé dans la partie Nord du bassin de Hodna.

Dans la présente étude ayant pour thème «Variation spatio-temporelle et statistique de la qualité des eaux souterraines de la plaine de Hodna », nous allons essayer de faire une évaluation qualitative des ressources en eau souterraines dans ladite zone d'étude située au cœur de la plaine de HODNA, à travers de données d'analyses physico chimiques récoltées de l'Algérienne Des Eaux, et portent sur 41 forages, pendant deux périodes différentes (2019et2021).

Chapitre I :
Présentation de la zone d'étude

I-1) Introduction :

Ce chapitre est consacré à une présentation détaillée de notre zone d'étude, de point de vue situation géographique, géologique, hydrogéologique et climatologique, afin de compiler les données et les connaissances nécessaires à l'étude hydrogéochimique des eaux souterraines.

I-2) Situation géographique et localisation administrative de la zone d'étude :

La zone d'étude est localisée dans la wilaya de M'Sila, au Sud Est de la capitale d'Algérie, elle s'étend entre (4°18 'et 4 ° 47 ') de longitudes Est, et (35 ° 30 ' et 36°) de latitudes Nord, au centre du bassin hydrographique d'el Hodna, et au milieu de la région dite plaines de Hodna(Voir la Fig n° (I-01)).

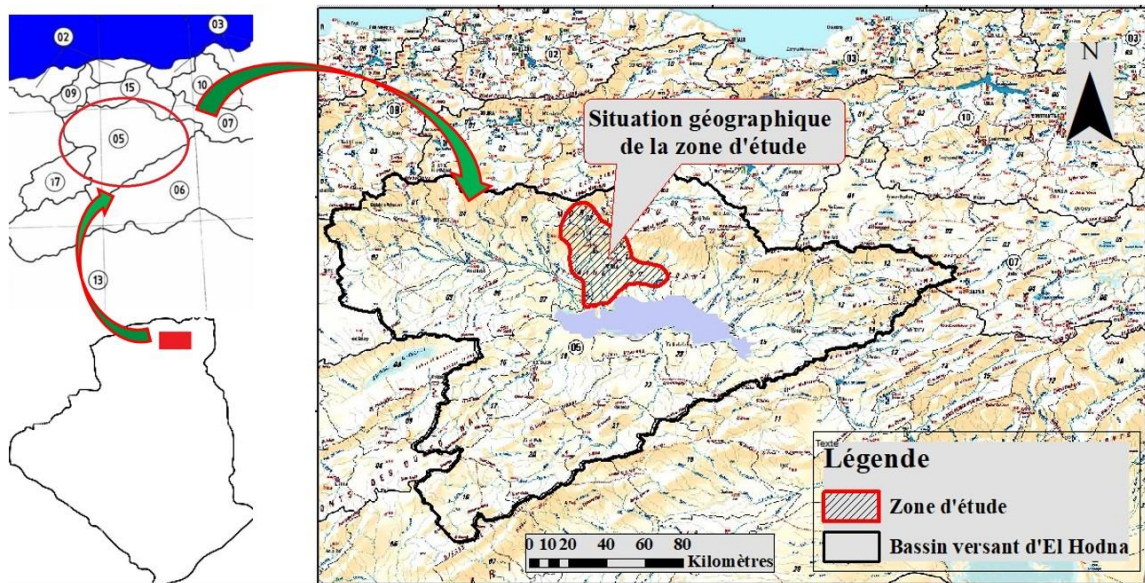


Fig n° (I-01) : Situation géographique de la zone d'étude

La zone d'étude s'étale sur une superficie d'environ **1212 km²**, elle est reliée par les routes nationales RN40, RN45 et RN60. De point de vue administratif, elle couvre plusieurs parties des communes de la wilaya de M'sila, à savoir : la commune de M'sila, Ouled Mansour, Hammam Dhalaa, Ouled Derradj, M'tarfa, Soumaa, Challal et Tarmount. (Voir la Fig n° (I-02)).

Cette partie de la plaine est limitée au Nord et au Nord-Est par les monts du Hodna, au Sud par Chott El Hodna, à l'ouest par les plaines de Zerarka et Sidi Hadjras et à l'Est par les monts de Maadid et le reste des plaines d'Ouled derradj. Le passage entre ces deux domaines, marqué par une succession d'ensembles montagneux et de plaines, favorise la diversité des milieux bioclimatiques, cela influe sur l'activité socio-économique de ces régions (Kebiche 1994).

La structure physique de cette région est hétérogène, Elle se caractérise par trois régions naturelles bien distinctes :

- Région montagneuse, au nord de la zone d'étude, d'une altitude qui varie entre 1100 et 2000 m, à un couvert végétal assez dense formé essentiellement des maquis de chêne vert et des reboisements de pin d'Alep.
- Région steppique, sur des altitudes qui varient entre 450 et 1000 m, formées essentiellement de parcours et des steppes à Alfa.
- Région de dépression, sur des altitudes qui varient entre 350 et 450 m, couverte par une végétation spontanée et des Halophytes, incluant le Chott d'El Hodna.

Les cultures annuelles céréalières sont les plus connues dans cette région d'étude.

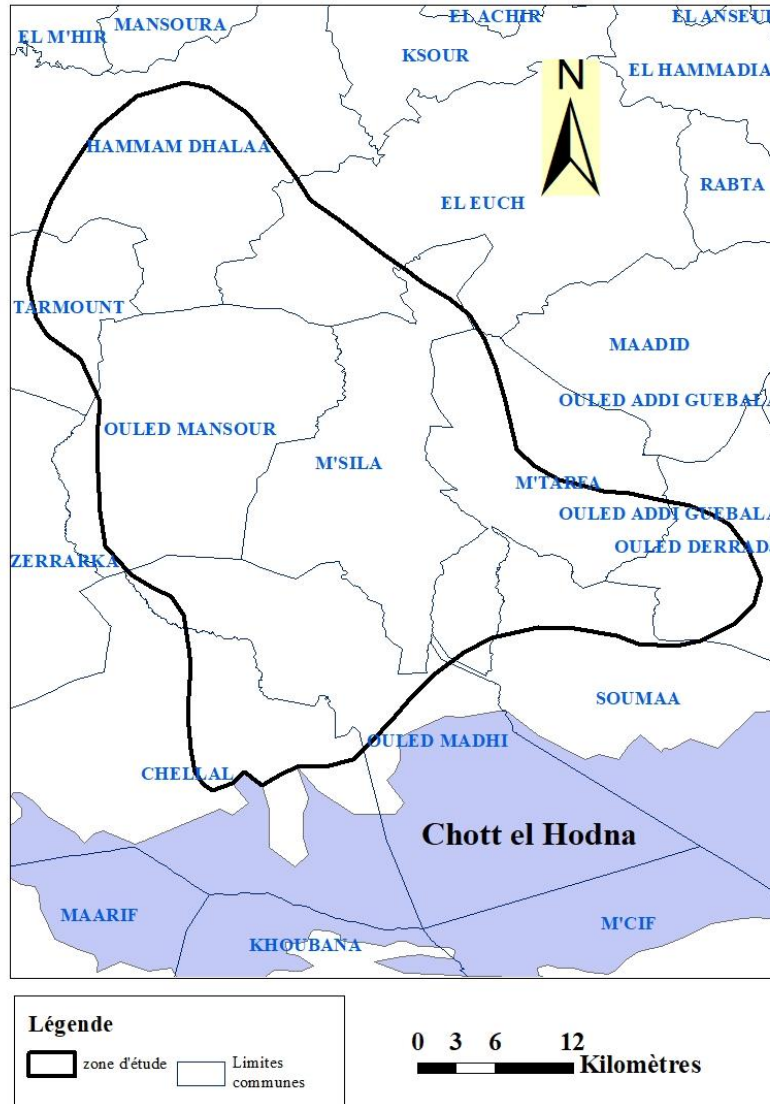


Fig n° (I-02) : Situation administratif de la zone d'étude

I-3) Le cadre géomorphologique de la zone d'étude :

On peut distinguer dans la zone d'étude les formes de reliefs suivantes :

I-3-1) Les montagnes :

La zone d'étude est limitée au nord par une chaîne montagneuse qui s'étend du Nord-Ouest jusqu'à l'Est de la zone. Cette barrière forme un véritable écran montagneux dont l'altitude varie entre 1100 et 2000 m (Dj. Djebough 1175m ; Dj. Tachirt, 1902 m). De par leur vigueur, ces reliefs, jouent un rôle important du point de vue climatique en réduisant les influences maritimes. A l'Est la zone est limitée par djebel Maadid, (1863 m). Ces reliefs ont une influence prépondérante sur le climat, l'hydrologie et l'hydrogéologie (Boudjemline and Semar 2018).

I-3-2) Le piedmont :

C'est la zone de transition entre la montagne et la plaine, allongée d'Ouest en Est aux pieds des montagnes du versant Nord entre les cotes 700 m et 500 m. Ces formes sont très développées à l'Est de l'oued Ksob où elles sont constituées de dépôts continentaux mio-pliocènes qui plongent vers l'aval sous des dépôts récents.

Au Nord, il est assez large et se constitue en forme de grands paliers correspondant à des niveaux de glaciaires qui sont profondément entaillés par des d'oueds qui descendent des montagnes (Boudjemline and Semar 2018).

I-3-3) La plaine :

Elle s'étend au Sud et à l'Est du piedmont, elle s'étale jusqu'aux abords de la sebkha qui occupe le centre du bassin, Nous pouvons ainsi distinguer la plaine du Nord, de l'Est dans la zone d'étude (Boudjemline and Semar 2018).

I-3-4) Le chott d'elHodna :

La zone d'étude est limitée dans la partie Sud par le chott de Hodna. Il s'agit d'une vaste surface d'épandage des eaux de crues et couvre une superficie de 1150 Km² à son maximum de surface. L'altitude maximale est de 400 m, alors que le fond de la cuvette est à 392 m. Il se trouve au centre de la plaine que nous venons de présenter. C'est une étendue argileuse d'une platitude quasi parfaite, fortement salée où toute végétation est absente (Boudjemline and Semar 2018).

I-4) Cadre géologique de la zone d'étude :

L'analyse du cadre géologique de la zone d'étude est basée sur la lecture de la carte géologique au 1/500.000 couvrant le bassin du Hodna (Carte géologique de l'Algérie à l'échelle 1/500.000).

D'après la Fig n° (I-3) et Fig n° (I-4), les formations géologiques existantes dans la zone d'étude sont :

- Les alluvions actuelles au sud de la zone (chotts).
- Le quaternaire continental formé d'alluvions, regs et terrasses.

- Le miocène supérieur marin (calcaires, grès, argiles), du Miocène inférieur marin (Burdigalien).
- Le pliocène continentale (poudingues, calcaires lacustres).
- L'éocène moyen marin.
- L'éocène inférieur marin.
- Le crétacé supérieur marin (turonien et cénomanien).
- Le crétacé inférieur (faciès marin normaux).

I-4-1) Quaternaire

Le Quaternaire est d'origine continentale, les formations quaternaires sont discordantes sur un substratum néogène et parfois paléogène et sont souvent protégées par des croûtes calcaire- gypseuses (Boudjemline and Semar 2018). On y distingue :

a) Quaternaire ancien

Ce niveau comporte des conglomérats à gros blocs, des horizons à galets et feuillets d'encroûtement calcaires rouge orange.

b) Quaternaire moyen

Il est représenté par de gros bancs de calcaires, de galets emballés dans une matrice de croûte calcaire gréseuse, des conglomérats et d'argiles à débris prismatiques.

c) Quaternaire récent

Au niveau du Chott el Hodna, il est constitué par des limons, de couleur grise, avec des cristaux de gypse. Par contre, dans les dunes, on trouve des sables fins, des argiles et du gypse. Les galets sont localisés au pied des reliefs.

I-4-2) Miocène :

Il s'observe également dans les régions montagneuses, ils sont constitués essentiellement par des formations marneuses comportant des intercalations gréseuses (Boudjemline and Semar 2018).. La période du Miocène est représentée dans le bassin du Hodna par trois cycles :

a) Miocène inférieur

Il affleure seulement sur les confins du Hodna où il est bien individualisé. Ce caractère comporte des faciès détritiques et continentaux on note parfois la succession suivante :

- Des conglomérats à ciments calcaires grès ;
- Des marnes vertes et rougeâtres alternant avec des rares niveaux gréseux ;

Un conglomérat représentant la base des Miocène moyen ;

b) Miocène supérieur

Le Miocène supérieur correspond à des formations marno-gréseuses d'environ 400 m l'épaisseur. Des marnes de couleur grise et verdâtre souvent sableuses ou gypseuse sont en alternance avec des passées de grès friable et surmontées par des grès conglomératiques.

I-4-3) Le Pliocène continental :

Il affleure dans le bassin du Hodna et comporte des apports conglomératiques et des passées gypseuses assez importantes (Aitadjedjou 2015) .

I-4-4) L'Eocène :

Formations qui affleurent dans la moitié occidentale des monts du Hodna. Elle sont représentées par des marnes noires gypseuses, marno-calcaires phosphatés, calcaires à silex et calcaires argileux(Aitadjedjou 2015) .

I-4-5) Le Crétacé :

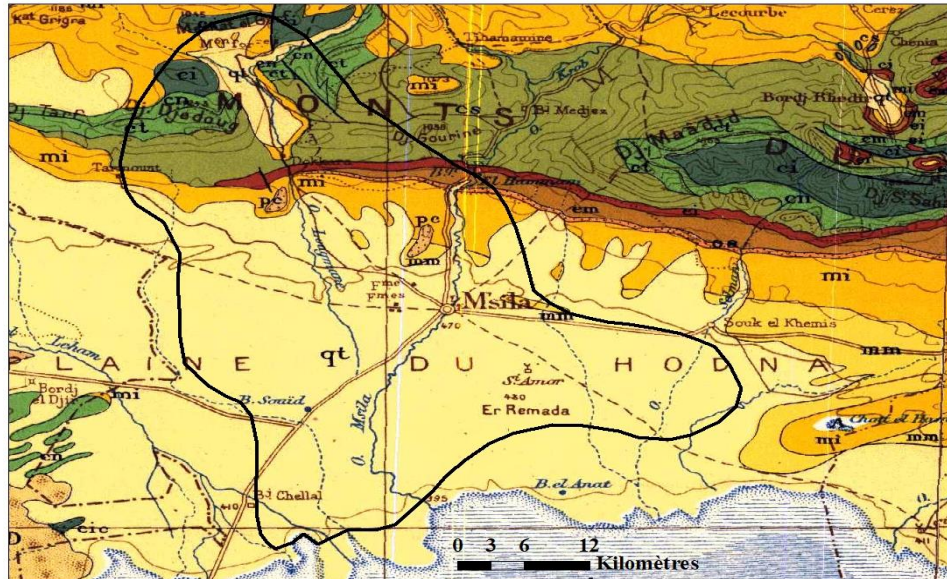
Le Crétacé affleure largement dans les chaînes montagneuses qui constituent le cadre du Hodna et on note la présence d'un Crétacé inférieur et d'un Crétacé supérieur (Boudjemline and Semar 2018) .

a) Crétacé inférieur :

Il occupe de vastes superficies dans les monts du Hodna. Il est constitué de plusieurs formations, notamment marno-calcaire peu résistantes à l'érosion, dolomitico-gréseuse, calcaire-marneuse et calcaire-marno-gréseuse.

b) Crétacé supérieur :

Il est constitué par une alternance de marne qui apparaît sur la plupart des reliefs, de marno-calcaires, de calcaires et de dolomies.



Légende :

A :	Alluvions actuelles	qt :	Quaternaire continental
mm :	Miocène supérieur marin	mi :	Miocène inférieur marin
pc :	Pliocène continental	em :	Eocène moyen marin
ei :	Eocène inférieur marin	cs :	Crétacé supérieur marin
ci :	Crétacé inférieur		

Fig n° (I-3) : Géologie de la zone extraite de la carte géologique de l'Algérie (1/500 000)

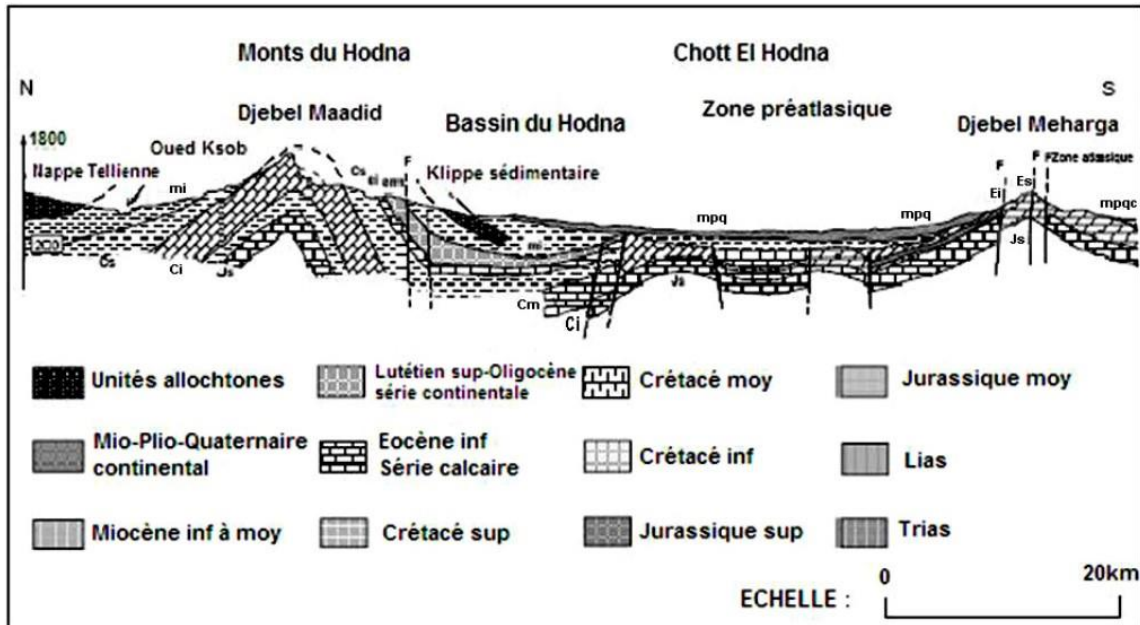


Fig n° (I-4) : Coupe géologique schématique à travers le Hodna (GUIRAUD, 1969)

I-5) Réseau hydrographique :

La zone d'étude couvre principalement des grandes parties des deux sous bassins versants, celle d'el ksob, et de lougman (voir la Fig n° (I-5)). Les principaux oueds provenant des régions telliennes (nord) sont à l'origine de la richesse de la zone d'étude.

Le plus important est l'Oued Ksob, il se distingue par sa longueur (environ 200 km), la superficie de sous bassin-versant (1 480 km² dont 1 330 dans le domaine tellien) et surtout par un écoulement qui se maintient même en période estivale (Boudjemline and Semar 2018)

Oued Lougman traverse une superficie de 336 km², c'est le plus petit sous bassin du Hodna, son réseau hydrographique est le seul qui ne verse pas dans le Chott Hodna, il prend naissance dans les monts de Hodna et s'achemine vers le sous bassin d'oued Ksob (Boudjemline and Semar 2018).

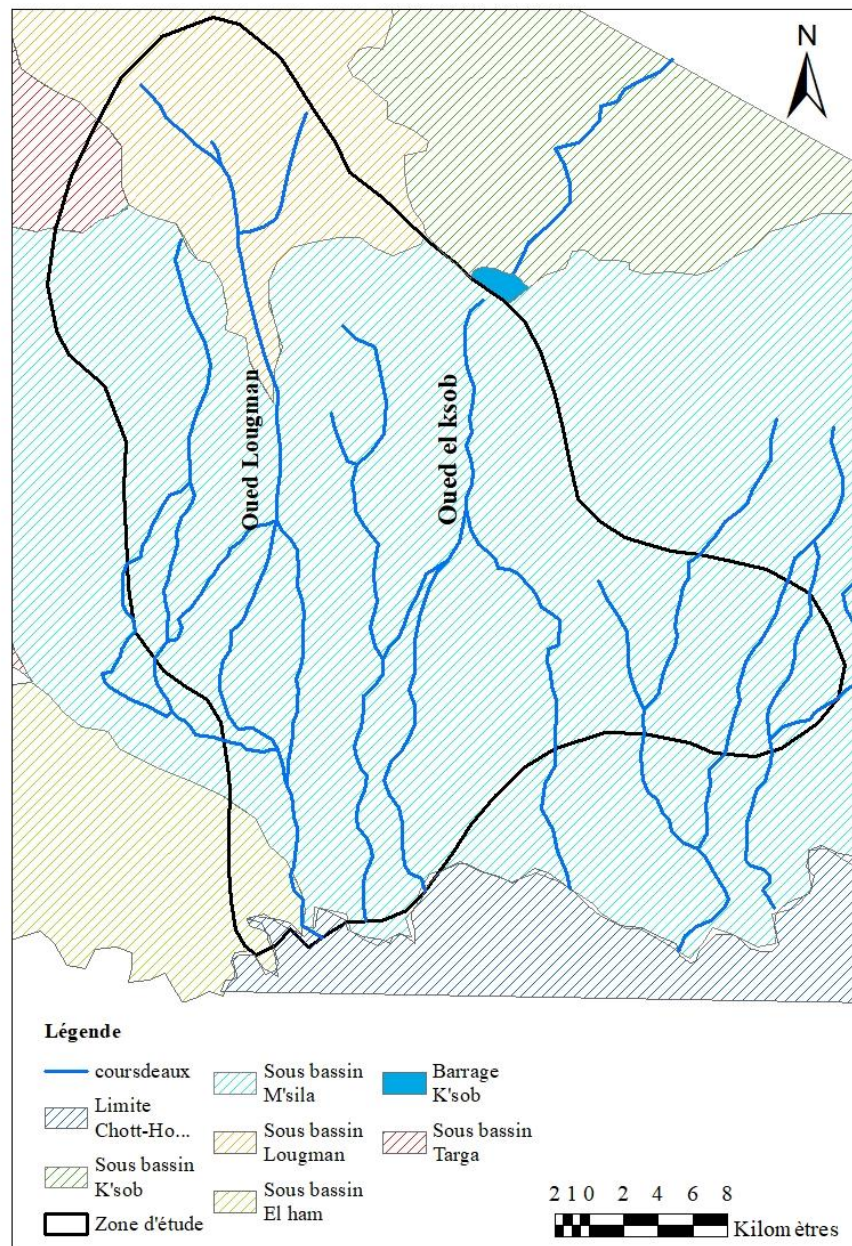


Fig n° (I-5) : Le réseau hydrographique et les sous bassins versants de la zone d'étude

I-6) La structure hydrogéologique de la zone d'étude :

L'eau souterraine dans la zone d'étude existe sous la forme des nappes captives et nappes superficielles (le réservoir des formations alluviales de la plaine), pour les nappes captives, on distingue la nappe de M'sila et de Selmane (voir la Fig n° (I-06)), elles sont constituées par des formations conglomératiques et gréseuse du mio-pliocène (Boudjemline and Semar 2018)).

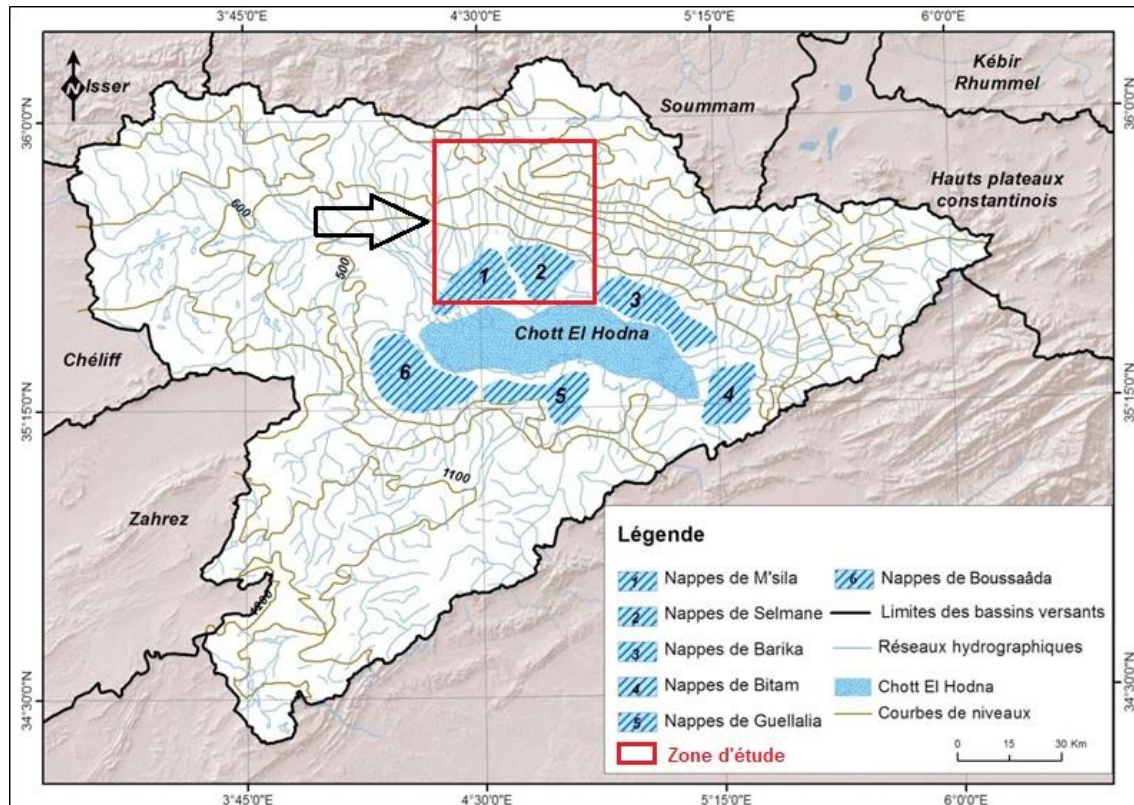


Fig n° (I-06) : Les nappes captives d'eaux souterraines dans le bassin versant de Hodna

(Source : Thèse de doctorat/Boudjemline Fouzia/ 2021)

La structure hydrogéologique de la plaine de M'sila renferme beaucoup de formations aquifères réparties sur plusieurs niveaux depuis le crétacé jusqu'au quaternaire.

Les nappes phréatiques sont principalement les nappes alluviales qui sont alimentées par le ruissèlement direct et dans une certaine mesure par infiltration des eaux le long des rives qui ne sont pas colmatées, ou lors des crues lorsque les oueds sortent de leurs lits et divaguent sur toute la plaine alluviale, elles s'étendent sur une aire de 2700 km².

La profondeur de ces nappes est en partie liée au niveau des oueds, et tend à se rapprocher de la surface vers l'aval (la profondeur est de 40m dans les parties hautes de la plaine et de 5m au niveau de la sebkha) (Boudjemline and Semar 2018).de toutes les nappes présentes dans le bassin versant d'el Hodna, celles de M'sila sont les plus connues grâce aux multiples études et travaux dont elles ont fait objet (Boudjemline and Semar 2018).

Les nappes superficielles s'étend sur une superficie de 600 km², elle est constituée par des formations détritiques du quaternaire dont la granulométrie diminue d'amont en aval, passant de matériaux grossiers (sable, galets, marneux) à des sables argileux et argiles. L'épaisseur de ces formations augmente de l'amont en aval passant de 50m à 100m.le maximum est atteint au centre de la plaine avec 150m (Boudjemline and Semar 2018).le substratum de la nappe est constitué de formations argileuses, argilo-sableuses, et par des galets (Boudjemline and Semar 2018) .

Les nappes profondes présente la même extension géographique que les nappes superficielles, elle est constituée essentiellement des grès et de conglomérats ayant une épaisseur de 250 m. Le toit de la nappe correspond au substratum de la nappe superficielle, lors que le substratum est constituée de marnes argilo-sablo-gypseuses du pliocène inférieur.

La nappe est artésienne dans la partie méridionale de la plaine, son aire de jaillissement représente le tiers de la surface de la plaine. Vers le nord, les niveaux topographique est supérieur au niveau piézométrique de la nappe alors les eaux deviennent ascendante. Les écoulements, comme ceux de la nappe superficielle convergent vers le chott ([Boudjemline and Semar 2018](#)).

I-7) Les caractéristiques physiques de la zone d'étude :

Les caractéristiques physiques de la zone d'étude sont résumées dans le **Tabn°(I-01)** suivant :

Tabn° (I-01) : Caractéristiques physiques de la zone d'étude.

Caractéristiques	Valeurs
Surface	1212 km ²
Périmètre	185 km ²
Langueur du talweg principal	58 km
Altitude maximale	806 m
Altitude minimale	403 m
Altitude moyenne	610 m
Altitude du somment principale	806 m

I-8) Aperçu climatique :

L'environnement steppique reflète le climat de la zone d'étude dont le degré d'aridité est dicté par plusieurs facteurs, les principaux étant : la latitude, l'altitude et l'éloignement de la mer, en effet, elle est située au Sud-Est et à quelque 150 Km à vol d'oiseau de la côte, Méditerranéenne, ceci reflète le climat méditerranéen semi-aride, caractérisé par une sécheresse estivale et une saison humide à pluviométrie concentrée sur les mois froids.

Les données climatologiques de la zone d'étude sont extraites de la base de données (**NASA Prediction Of World wide Energy Resources**), conçu et mises à la disposition des utilisateurs par l'intermédiaire de la NASA Météorologie de surface et énergie solaire (SSE, Version 6.0) disponible gratuitement dans le site web (<http://earth-www.larc.nasa.gov/power/>).

Le (**POWER Data Access Viewer**) est une base de données à accès libre, qui permet de visualiser et d'accéder aux données et des paramètres météorologiques et solaires à l'échelle mondiale, activés géo-spatialement et formulés pour évaluer et concevoir des systèmes d'énergie renouvelable ainsi que d'autres finalités comme l'agro-climatologie.

Les données **POWER**, à cause de leur couverture mondiale à haute résolution et enregistrement continu, ne sont pas seulement des valeurs aux industriels, architectes de bâtiments, et les agriculteurs, mais aussi un grand potentiel pour faciliter l'analyse et la prévision de l'énergie mondiale à partir du point de vue climatologique et économique.

I-8-1) Précipitations moyennes mensuelles :

La pluviométrie constitue un facteur écologique d'importance fondamentale, car sa répartition annuelle ou son rythme est plus important que sa valeur volumique absolue.

Les moyennes mensuelles des précipitations de 40 ans (1981-2021) extraites de la base de données POWER sont illustrées dans le Tab n°(I-02) et Fig n° (I-07).

Tab n° (I-02) :précipitations moyennes annuels de la zone d'étude.

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Précipitations (mm)	26,2	17,1	26,5	29,8	33,5	9,99	3,7	9,39	25,8	21,2	24,5	24,6

D'après les données précédente son aperçoit que la variation des précipitations moyennes mensuelles est irrégulière d'une façon générale, on peut diviser l'année en deux périodes :

Une période humide : s'étendant du mois de septembre au mois de Mai avec un maximum enregistré au mois de Mai (35,5 mm).

Une période sèche : s'étendant du mois de Juin au mois de d'Aout avec un minimum enregistré au mois de juillet (3,7 mm).

La moyenne totale annuelle des précipitations enregistrées est égale à 252 mm.

I-8-2) Précipitations moyennes saisonnières :

La subdivision des pluies moyennes de l'année sur les quatre saisons : l'automne (Septembre, Octobre, Novembre) ; l'hiver (Décombres, Janvier, Février) ; le printemps (Mars, Avril, Mai) et l'été (Juin, Juillet, Août), est illustrée dans la Fig n° (I-08).

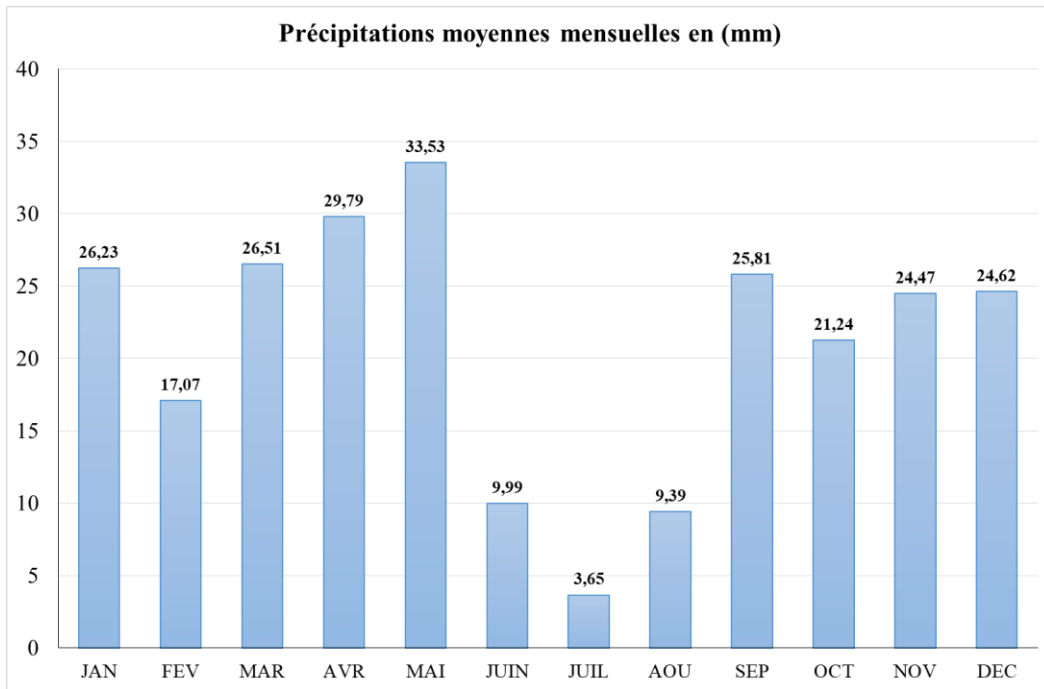


Fig n° (I-07) : Variation des précipitations moyennes mensuelles

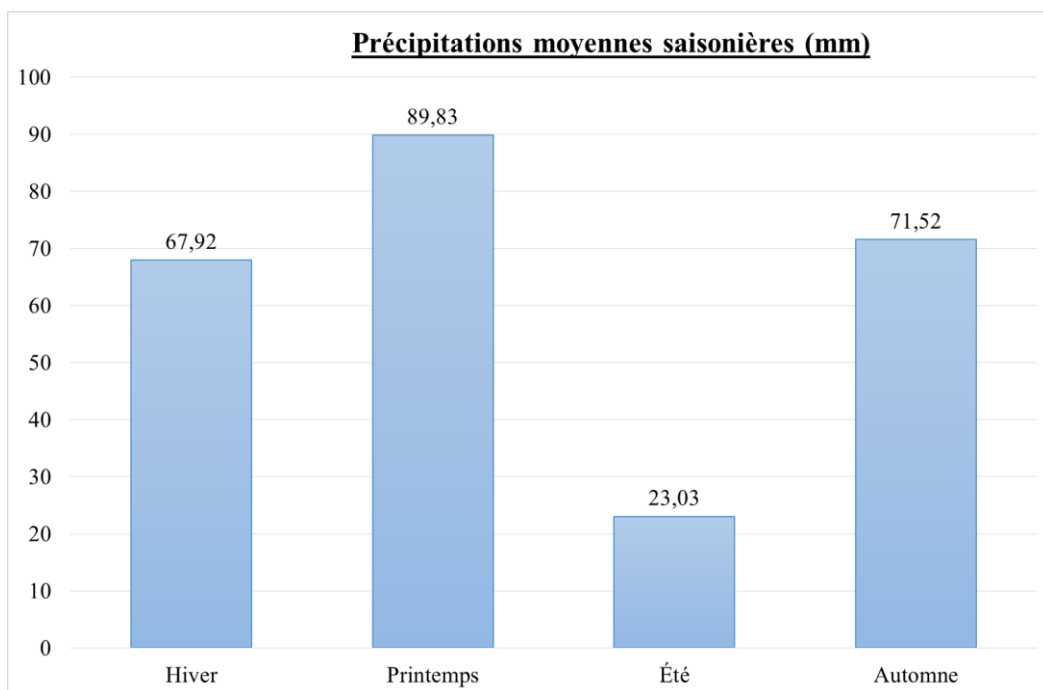


Fig n° (I-08) : Le régime saisonnier des précipitations saisonnières

I-8-3) Précipitations moyennes interannuelles :

Les valeurs des précipitations interannuelles de la zone d'étude depuis 1981 jusqu'au 2021 sont irrégulières (voir la Fig n° (I-09)), elles varient de 84,37 mm en 1983 à 390,23 mm en 2004. La région reçoit en moyenne 253,5 mm de pluie par an.

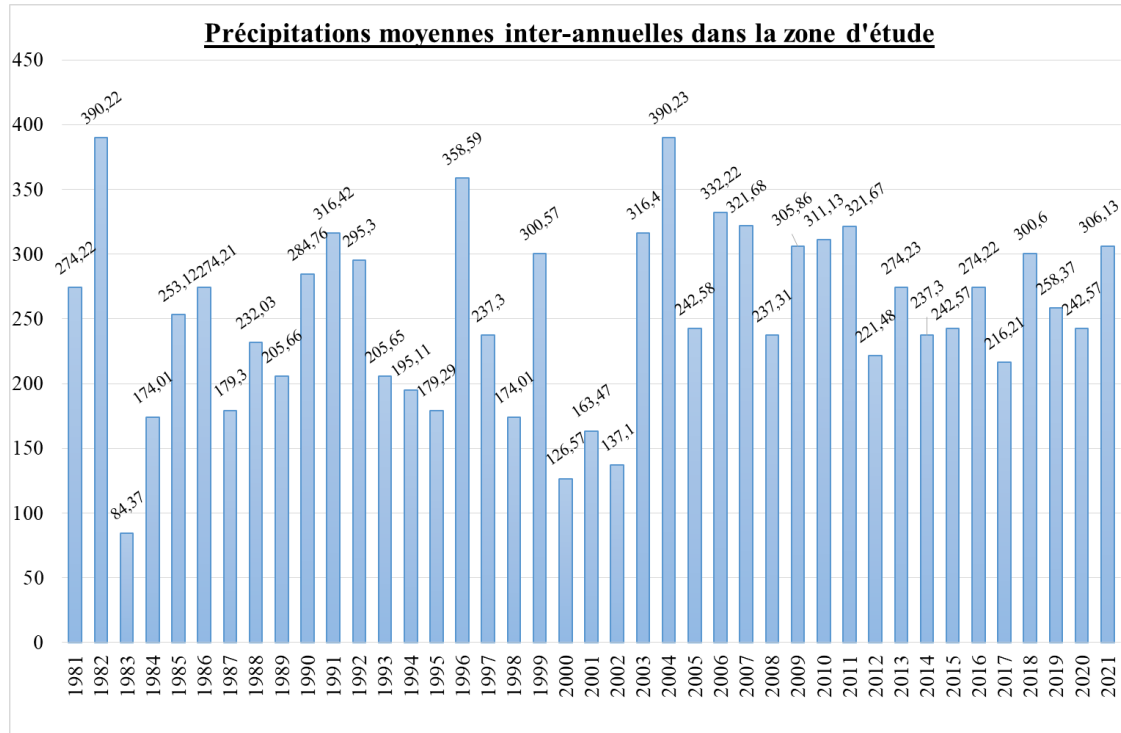


Fig n° (I-09) : Variations des précipitations interannuelles

I-8-4) Température :

La température de l'air est l'un des paramètres ayant une grande influence sur le climat et sur le bilan hydrique, car il conditionne l'évaporation et l'évapotranspiration. Elle est en fonction de l'altitude, de la distance à la mer et des saisons.

Les températures mensuelles moyennes, maximales et minimales enregistrées dans le secteur d'étude depuis 1981 jusqu'au 2021 sont présentées dans le Tab n° (I-03), tandis que la température moyenne interannuelle enregistrée est de 25,19 °C.

Tab n° (I-03) : Températures moyennes, maximales et minimales.

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	May	Juin	Juill	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec
Température Moy (C°)	7,17	8,64	11,99	15,8	20,78	26,21	30,33	30,09	24,7	19	12,38	8,39
Température Min (C°)	25	29,2	34,16	35,9	42,76	43,69	44,96	45,44	42,6	38,6	30,67	26,5
Température Max (C°)	-6,45	-4,08	-3,03	0,12	2,69	6,46	12,67	13,65	8,8	3,49	-2,83	-3,38

Par ailleurs, on constate l'existence d'un écart considérable entre l'été chaud et sec et l'hiver froid (voir la Fig n° (I-10)). En effet, le mois le plus froid est le mois de Janvier avec une température moyenne mensuelle de 7,17 °C. Le mois de Juillet est le plus chaud avec une température qui peut atteindre 45°C. On remarque aussi que les températures moyennes mensuelles présentent deux saisons à savoir : Une saison chaude dont la température dépasse la moyenne mensuelle, à savoir 17,96°C qui s'étend du mois de Mai au mois d'Octobre ; Une saison froide allant de Novembre jusqu'au mois d'Avril.

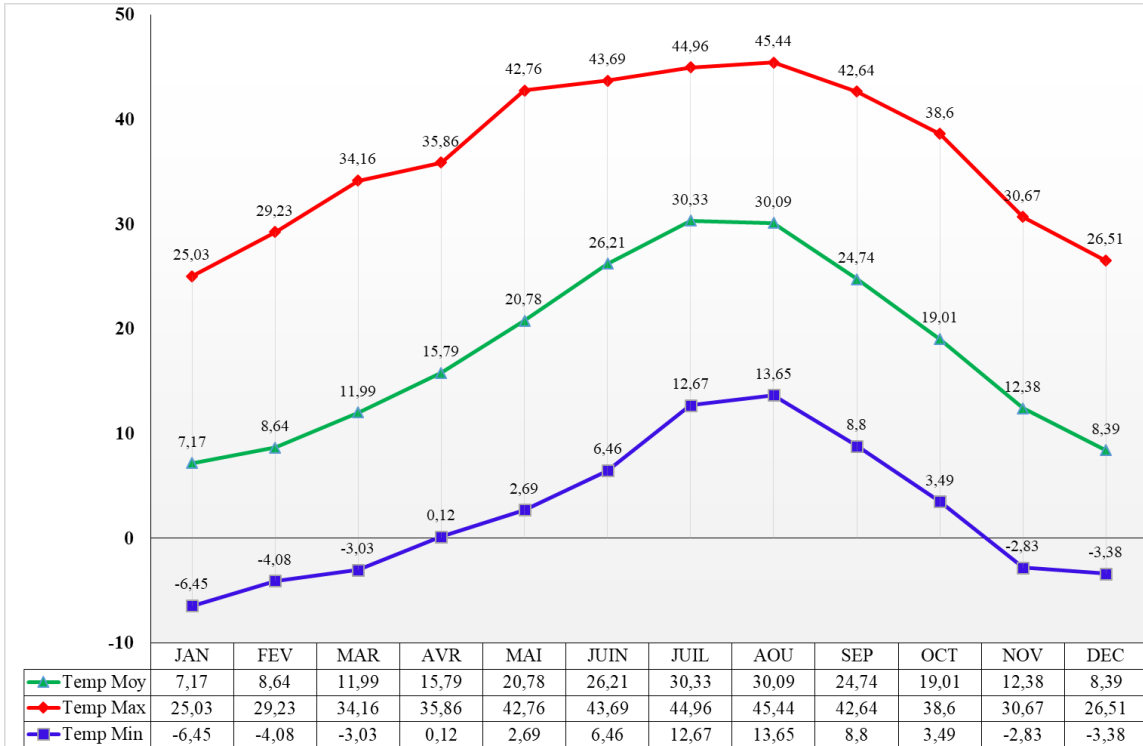


Fig n° (I-10) : Variations de la température en °C

I-8-5) Vent :

Le vent est l'un des éléments caractéristiques du climat régissant l'évaporation à la surface du sol et de la végétation. Les résultats des moyennes mensuelles de la vitesse du vent moyen(en m/s) enregistrés dans le secteur d'étude sont enregistrés dans le Tab n° (I-04) (Période : 1981-2021).

Tab n° (I-04) : Vitesses de vents moyennes et maximales en (m/s).

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	May	Juin	Juill	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
Vitesse Moy (m/s)	3,9	4,1	4,17	4,34	4,08	3,89	3,78	3,54	3,6	3,5	3,87	3,8
Vitesse Max (m/s)	17	18	17,3	15,6	14,4	14,6	14,9	12,04	14	14	15,4	16

La Fig n° (I-11) montre que la force de vent est modérée durant toute l'année, la valeur moyenne maximale est enregistrée au mois d'Avril avec une vitesse de 4.34 m/s. La valeur moyenne minimale est enregistrée en mois d'Octobre avec une vitesse de 3,48 m/s.

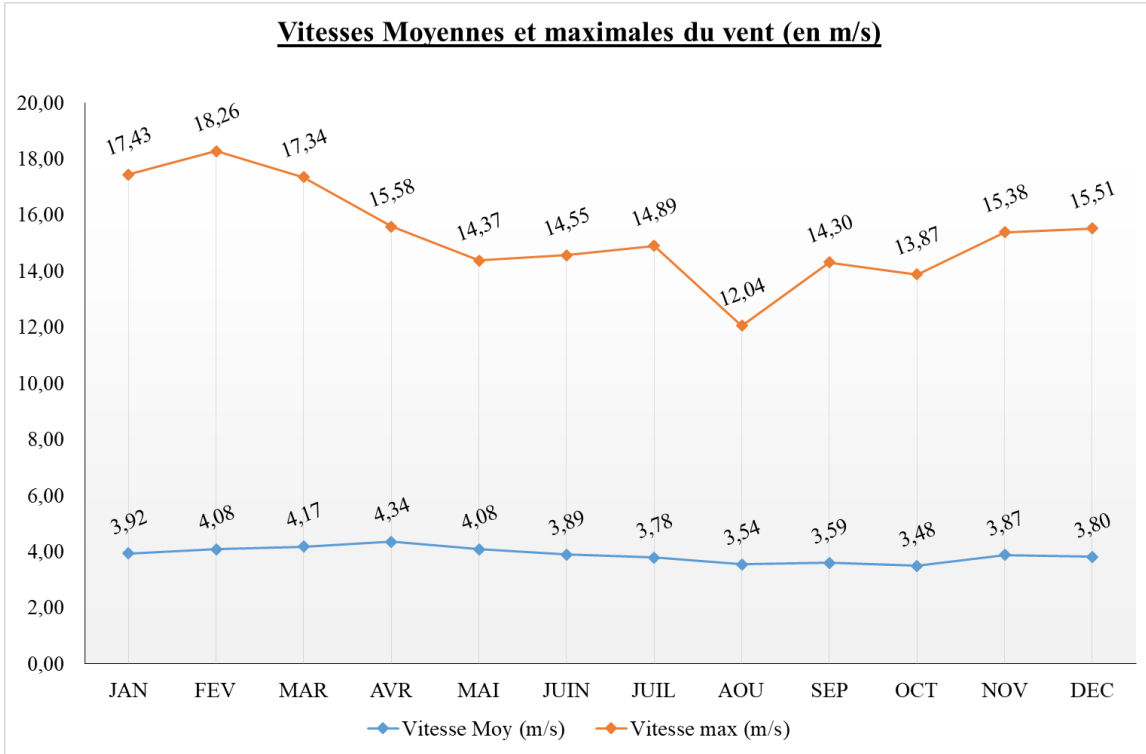


Fig n° (I-11) : Variations des vitesses de vent en (m/s)

I-8-6) Humidité :

L'humidité relative de l'air c'est le rapport entre la teneur en vapeur d'eau de l'air et la masse théorique de vapeur d'eau que peut renfermer l'atmosphère à saturation compte tenu de la température et de la pression barométrique existante (BOUDJELLAL and MAIZA 2017). C'est un élément atmosphérique très important puisqu'il donne le taux de condensation de l'atmosphère. Les données l'humidité relative moyenne (en %) de la période (1981-2021) sont reportées dans le Tab n° (I-05).

Tab n° (I-05) : L'humidité relative en (%).

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	May	Juin	Juill	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
Humidité relative %	73,34	67,53	61,15	54,76	48,55	39,93	31,58	33,22	46,39	54,85	66,14	73,86

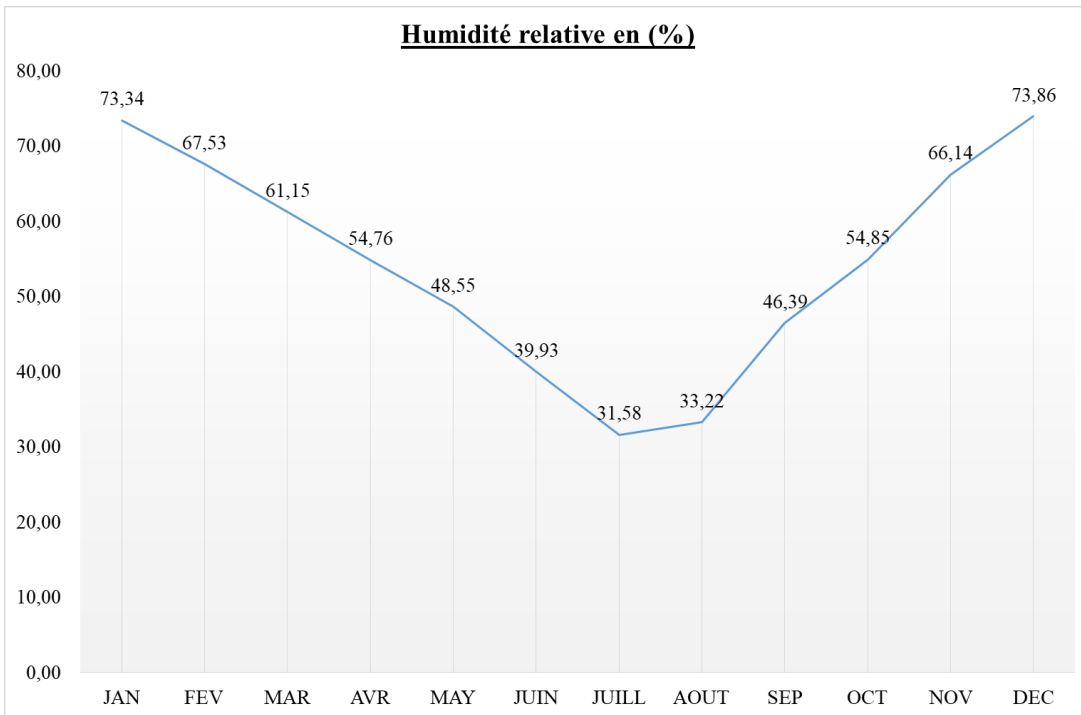


Fig n° (I-12) : Variations de l'humidité relative en (%)

Sur la Fig n° (I-12) ci-dessus, on distingue deux périodes : l'une humide (supérieur à 50%) allant du mois d'Octobre au mois d'avril avec un maximum de 73,86 % au mois de décembre, et une période sèche (inférieur à 50%) s'étend du mois de mai au mois de septembre.

I-9) Inventaire des points d'eaux :

Pour mener à bien cette étude, nous avons choisi un échantillon composé de 41 forages d'eaux, éparpillés dans le secteur d'étude. Les informations collectés de l'Algérienne des eaux ADE (unité de M'sila) et l'Agence Nationale de la Gestion intégrée des ressources en eaux AGIRE étaient des données brutes, nous avons procédé ainsi au traitement des différents informations qui concerne : la nomenclature des ouvrages, la localisation des forages par commune, la géo localisation par coordonnées cartésiennes en utilisant un logiciel SIG (voir la Fig n° (I-13)). La projection (WGS_1984_UTM_Zone_31N) est mieux adaptée. Les informations collectées sont enregistrés dans les Tab n° (I-06) et (I-07) ci-dessous :

Tabn° (I-06) :Inventaire des points d'eaux (F1 – F20) (source ADE et AGIRE)

Code	Nomenclature de l'ADE	Commune	X (m)	Y(m)	Z (m)
F1	Forage F 256/168 Bis (S-P Khebab)	M'sila	643943	3946836	445
F2	Forage 267/168 (F05 Bis) (S-P Khebab)	M'sila	645295	3944621	430
F3	Forage 224 Bis (S-P Khebab)	M'sila	645434	3945652	436
F4	Forage 331/168 (Khebab 01) (S-P Khebab)	M'sila	644621	3942869	424
F5	Forage 310 Bis (S-P Khebab)	M'sila	645191	3945021	431
F6	Forage M04/14 (S-P Khebab)	M'sila	645981	3944712	431
F7	Forage 250/168 bis (S-P Mezrir 01)	M'sila	640971	3945083	435
F8	Forage 278/168 Bis (S-P Mezrir 01)	M'sila	636598	3945461	438
F9	Forage 249/168 Bis (S-P Mezrir 01)	M'sila	640642	3943385	475
F10	Forage 268/168 Bis (S-P Mezrir 01)	M'sila	639861	3945356	438
F11	Forage F 311/168 (S-P Mezrir 01)	M'sila	640479	3945077	436
F12	Forage M01/14 (S-P Mezrir 02)	M'sila	636676	3944889	434
F13	Forage 283/168 bis (S-P Mezrir 02)	M'sila	637446	3945562	438
F14	Forage 255/168 Bis (Guerfala)	M'sila	641595	3949534	460
F15	Forage 279/168 (Boukhmissa)	M'sila	640515	3963605	541
F16	Forage 335/168 (Ghozal Bis)	M'sila	635400	3946605	441
F17	Forage 333/168 (Sidi Amara)	M'sila	639565	3950674	467
F18	Forage 328/168 (Lechiakh)	M'sila	640946	3952476	482
F19	Forage Lougmane 03 (Dokkara) (S-P Lougmane)	M'sila	627326	3967598	620
F20	Forage Lougmane 01 Bis (S-P Lougmane)	M'sila	628052	3965360	599

Tabn° (I-07) : Inventaire des points d'eaux (F21 – F41) (source ADE et AGIRE)

Code	Nomenclature de l'ADE	Commune	X (m)	Y(m)	Z (m)
F21	Forage Termount 03 (S-P Lougmane)	M'sila	618586	3967409	674
F22	Forage Lougmane (APC) (S-P Lougmane)	M'sila	628377	3965070	596
F23	Forage M'sila 02 (Vers Douar Ghozel)	M'sila	640353	3942420	445
F24	Forge Laamarate	Chellal	634406	3934897	407
F25	Forage El Guassia	Chellal	634110	3932937	402
F26	Forage Sidi Laoubi	Chellal	629449	3931582	404
F27	Forage Feriha 01	Chellal	629215	3931076	402
F28	Forage Feriha 02	Chellal	629917	3930928	401
F29	Forage Feriha 03	Chellal	630605	3930937	403
F30	Forage Haourane III (D'bil)	H.dalaa	626595	3978508	805
F31	Forage Ouled Haless 03	O.mansour	624467	3955951	489
F32	Forage Ouled Moussa 01	O.mansour	626647	3954488	481
F33	Forage Ouled Moussa 02	O.mansour	626471	3954393	479
F34	Forage Ferkoussa	O.mansour	624115	3947809	446
F35	Forage O-Derradj 01 Bis (Remplace F 213) (S-P Djorf)	O.derradj	645686	3943715	427
F36	Forage F 315/168 (S-P Djorf)	O.derradj	658037	3946466	508
F37	Forage 321/168 (Renforcement 2) (S-P Djorf)	O.derradj	657274	3944776	488
F38	Forage Ouled Ben Saoucha (S-P Djorf)	O.derradj	656100	3943856	481
F39	Forage Ouled Derradj 01	O.derradj	653863	3944965	443
F40	Forage Ouled Derradj 02	O.derradj	653711	3944748	478
F41	Forage Ouled Derradj 03	O.derradj	653428	3944394	474

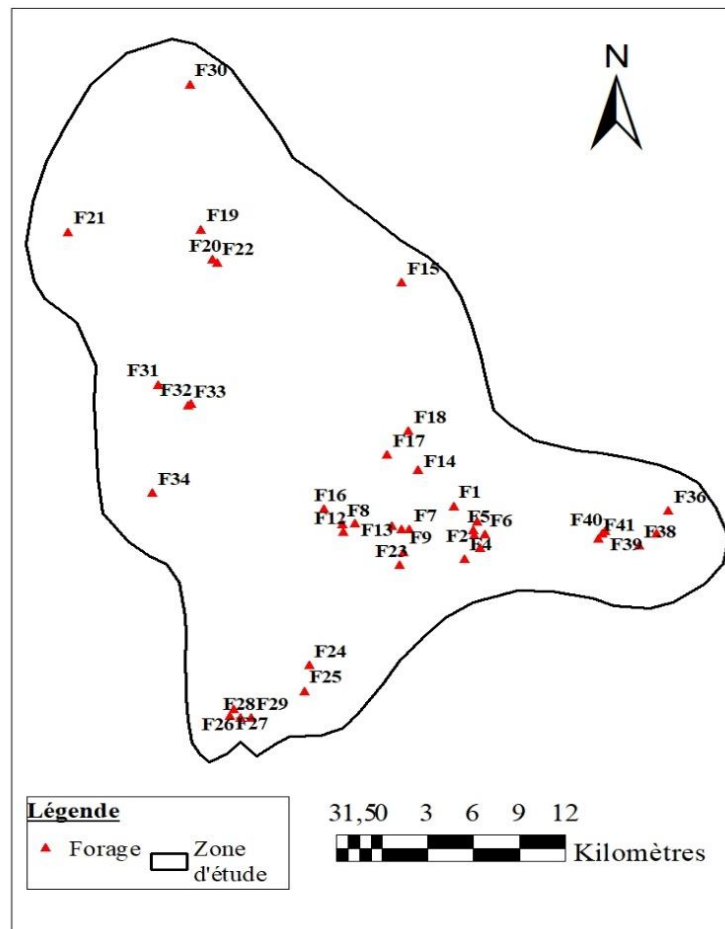


Fig n° (I-13) : Positionnement des forages dans la zone d'étude

I-10) Conclusion :

De point de vue géologique, la formation prédominante est celle du quaternaire présent dans les plaines, et constitué par des galets calcaire gréseuse, des limons, des conglomérats et d'argiles. Suivie par le Crétacé inférieur et supérieur présent dans les monts d'el Hodna au Nord de la zone d'étude, constitué de formations marno-calcaire et de dolomite gréseuse.

Ces conditions géologiques et géomorphologiques sont favorables pour l'accumulation des eaux souterraines sous formes de nappes libres ou captives superposées.

Le climat de la zone d'étude est un climat méditerranéen semi-aride, caractérisé par une sécheresse estivale et une saison humide à pluviométrie concentrée sur les mois froids, avec une moyenne annuelle de 21 mm/an.

Ces informations collectées vont nous aider à accomplir la caractérisation hydrogéochimique des eaux souterraines de la zone d'étude.

Chapitre II :
Hydrogéochimie des eaux souterraines

II-1) Introduction :

Quarante et un forages qui existent déjà dans le secteur d'étude ont été choisis, pour analyser leurs paramètres physico-chimiques pendant des campagnes de mesures effectuées en deux périodes (2019 et 2021), les analyses ont été réalisées dans le laboratoire de l'Algérienne des eaux (ADE) de l'unité de M'sila.

Ces données vont nous permettre d'analyser les paramètres statistiques des échantillons, de procéder à une représentation cartographique illustrant la variation spatiale des variées chimiques, de procéder à une classification des faciès, et enfin de procéder à une analyse statistique multi variable, dont le but est l'identification des aspects qualitatifs des eaux souterraines de la zone d'étude.

II-2) Analyse des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines :

Les eaux souterraines sont plus ou moins minéralisées en fonction :

- De la nature des roches traversées et des minéraux rencontrés au cours de l'infiltration.
- Du temps de contact de l'eau avec les minéraux, donc de la vitesse de percolation de l'eau dans le sous-sol.
- Du temps de renouvellement de l'eau de la nappe par l'eau d'infiltration.

La qualité physico-chimique de l'eau souterraine peut être mieux déterminée par des mesures in situ et en laboratoire, on respectant les conditions de transport et de stockage selon les méthodes standard pour l'examen de l'eau, les facteurs les plus importants de la qualité requise de l'eau sont de types physique et chimique.

II-2-1) Les paramètres physiques :

Pour chaque échantillon d'eau, le pH, la température, le TDS et la CE ont été mesurés, in situ immédiatement après le prélèvement à l'aide d'un kit d'analyse portable [source ADE M'sila].

a) Le potentiel hydrogène (pH) :

Le potentiel hydrogène (**pH**) est une mesure de l'activité chimique des ions hydrogènes H⁺ en solution, il interfère avec d'autres paramètres de qualité dans de complexes réactions chimiques tel que la dureté et l'alcalinité (MERIEM 2020). Un pH très acide a tendance à amoindrir les effets du calcaire tandis qu'un pH très basique a plutôt tendance à les amplifier.

Le pH est acide dans les eaux des aquifères sableuses ou granitiques et il est alcalin dans les calcaires. Le pH donc mesure l'acidité ou la basicité d'une solution. Ainsi, dans un milieu aqueux à 25 °C :

- Une solution de pH = 7 est dite neutre;
- Une solution de pH < 7 est dite acide ;

- Une solution de $\text{pH} > 7$ est dite basique ;

Comme la variation de la pression des gaz (CO_2 , O_2) modifie le pH, il est important de le mesurer directement lors de la prise d'échantillon.

Le Tab n° (II-01) présente le résumé statistique du pH pour les échantillons des deux périodes 2019 et 2021 :

Tab n° (II-01) : Statistiques du pH des eaux souterraines de la zone d'étude

Périodes	Minimum	Moyenne	Maximum	Ecart-type	Norme de potabilité (OMS)	Norme d'irrigation
2019	6,95	7,56	7,95	0,26	6.5 < pH < 8.5	5,5 < pH < 6,5
2021	6,7	7,49	9,3	0,45		

L'examen des paramètres statistiques de position du pH (maximum, minimum, moyenne) durant les périodes 2019 et 2021 montrent qu'il y a une variabilité dans les deux échantillons mais correspondent à la norme de potabilité, et l'inverse pour la norme d'irrigation. Les valeurs moyennes des échantillons sont presque égales et modérément alcaline. La courbe de variation (voir la Fig n° (II-01)) montre des anomalies au niveau des forages F13 et F25 par des pics d'alcalinité en 2021. L'examen du paramètre de dispersion (l'écart-type) montre que les valeurs du pH sont moins dispersées autour de la moyenne en 2019 et plus dispersées en 2021, ce qui traduit une plus de variabilité de la qualité des eaux en 2021.

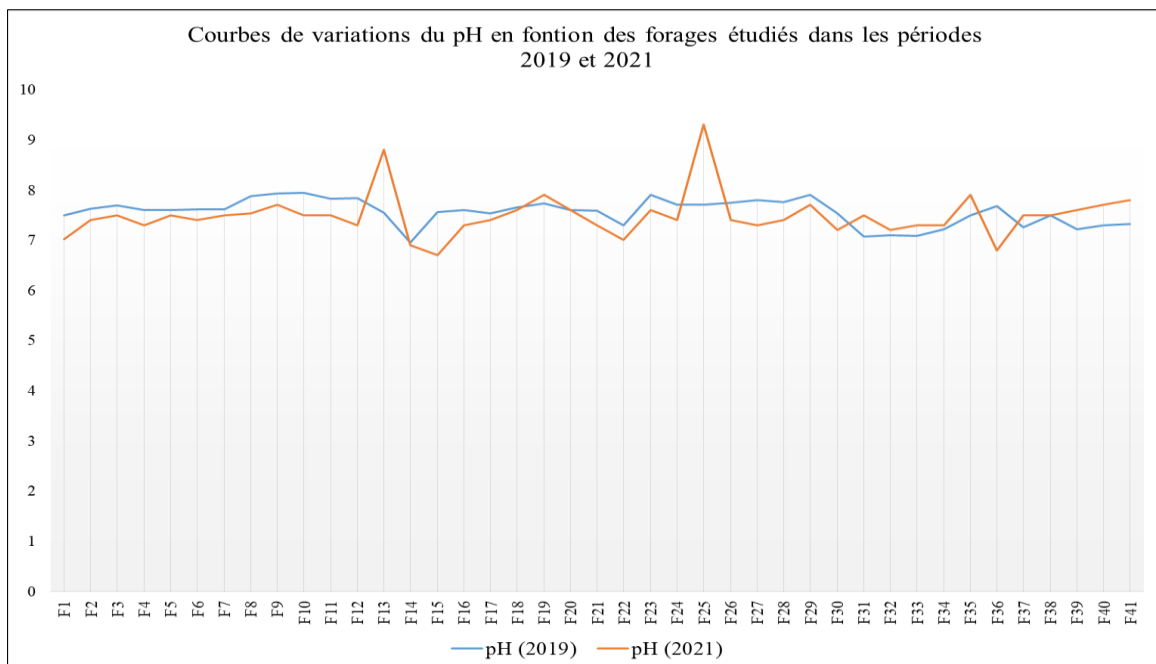


Fig n° (II-01) : Variation du pH en fonction des forages.

b) La Température (°C) :

La température à une grande importance dans l'étude et la surveillance des eaux souterraine ou superficielle, elle joue un rôle important dans l'augmentation de l'activité chimique et bactérienne, elle varie en fonction de la température extérieure (l'air), des saisons, de la nature géologique et de la profondeur du niveau d'eau par rapport à la surface du sol.

La mesure de la température sur le terrain permet d'ajuster les valeurs de la conductivité, d'apprécier l'origine plus ou moins profonde de l'eau et de calculer les équilibres de dissolution (Mudry, Zwahlen et al. 2014).

Le Tab n° (II-02) présente le résumé statistique de la température pour les échantillons des deux périodes 2019 et 2021 :

Tab n° (II-02) : Statistiques de la température dans la zone d'étude

Périodes	Minimum	Moyenne	Maximum	Ecart-type	Norme de potabilité(O MS)
2019	15,4	22,74	30,3	3,32	T ≤ 25°C
2021	14,5	23,44	32,8	4,57	

Le changement de température de l'eau est largement influencé par le climat général de la région avec des maximums dépassants les 30°C pour les deux périodes 2019 et 2021, mais la température moyenne reste dans la norme de potabilité fixée par la norme algérienne et celle de l'Organisation Mondiale de la Santé (O.M.S) de 25°C.

L'examen des paramètres statistiques de la température durant les périodes 2019 et 2021 montrent qu'il y a une ressemblance pour les paramètres de position (le maximum le minimum et la moyenne). Ainsi, l'examen du paramètre de dispersion (l'écart-type) montre que les valeurs de la température en 2021 sont plus dispersées autour de la moyenne qu'en 2019.

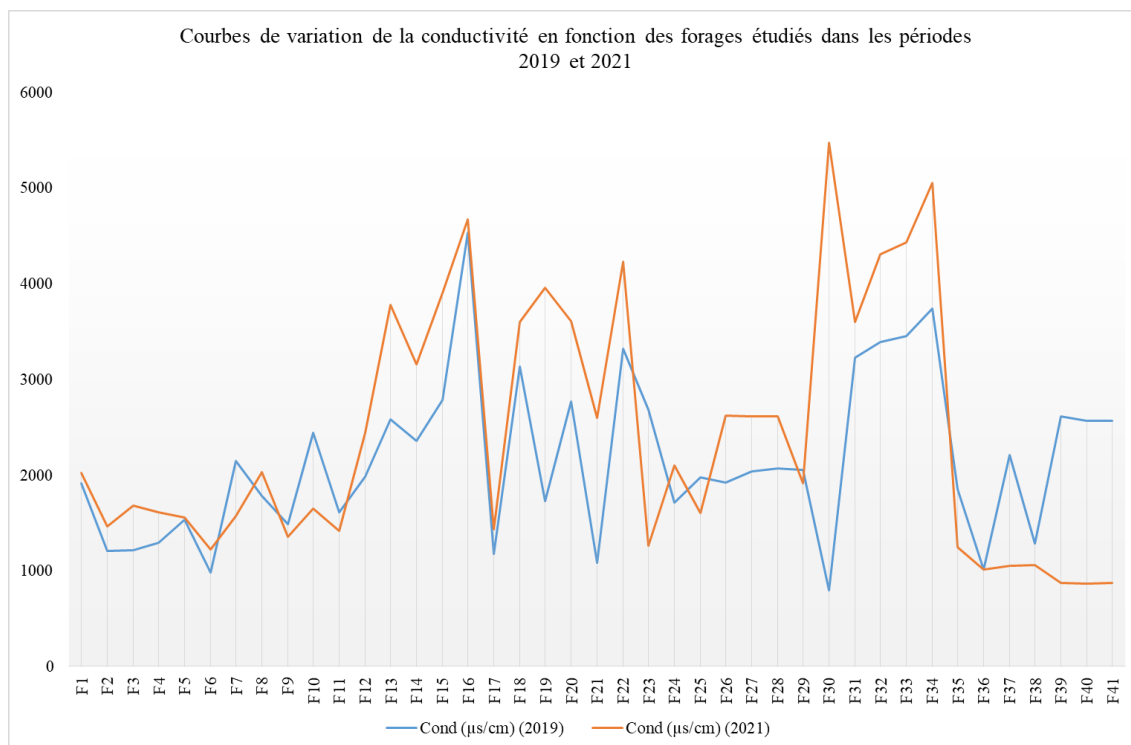
c) Conductivité électrique CE en (µs/cm) :

La conductivité électrique(en micro-siemens par cm) représente l'aptitude à laisser passer le courant électrique, d'où son nom, et traduit globalement la teneur d'une eau en sels dissous, elle est d'autant plus élevée que la minéralisation est importante.

Le Tab n° (II-03) présente le résumé statistique de la conductivité électrique pour les échantillons des deux périodes 2019 et 2021 :

Tab n° (II-03) : Statistiques de la conductivité électrique des eaux souterraines de la zone d'étude

Périodes	Minimum	Moyenne	Maximum	Ecart-type	Norme de potabilité(OMS)	% des points dépassant la norme
2019	797	2151,24	4530	845,61	CE \leq 2800 μ s/cm	17%
2021	862	2426,85	5470	1315,37		31%

**Fig n° (II-02) :** Variation de la conductivité en fonction des forages

L'examen des paramètres statistiques de la conductivité électrique durant les deux périodes montre qu'il y a une augmentation des paramètres de position (le maximum le minimum et la moyenne) et le paramètre de dispersion (l'écart-type) en 2021 par rapport à 2019 avec une dispersion très importante autour de la moyenne, ceci implique une augmentation importante de la minéralisation des eaux après une période d'une année. La variation durant ces deux périodes en fonction des forages reste plus ou moins harmonique comme indique la Fig n° (II-02). Le tableau des statistiques montre un dépassement des normes de potabilité pour les valeurs maximales, mais pour les moyennes, ils restent en dessous de la norme.

d) TDS (Total dissolved solids)

Ce paramètre est lié à la minéralisation des eaux, donc l'analyse reste presque identique à la conductivité électrique.

Le Tab n° (II-04) présente le résumé statistique de la variation du TDS pour les échantillons des deux périodes 2019 et 2021 :

Tab n° (II-04) : Statistiques du TDS des eaux souterraines de la zone d'étude

Périodes	Minimum	Moyenne	Maximum	Ecart-type	Norme de potabilité(OMS)	% des points dépassant la norme
2019	352	904,29	1780	348,06	TDS ≤1000 mg/l	36,6 %
2021	314	985,18	1888	505,94		41,46 %

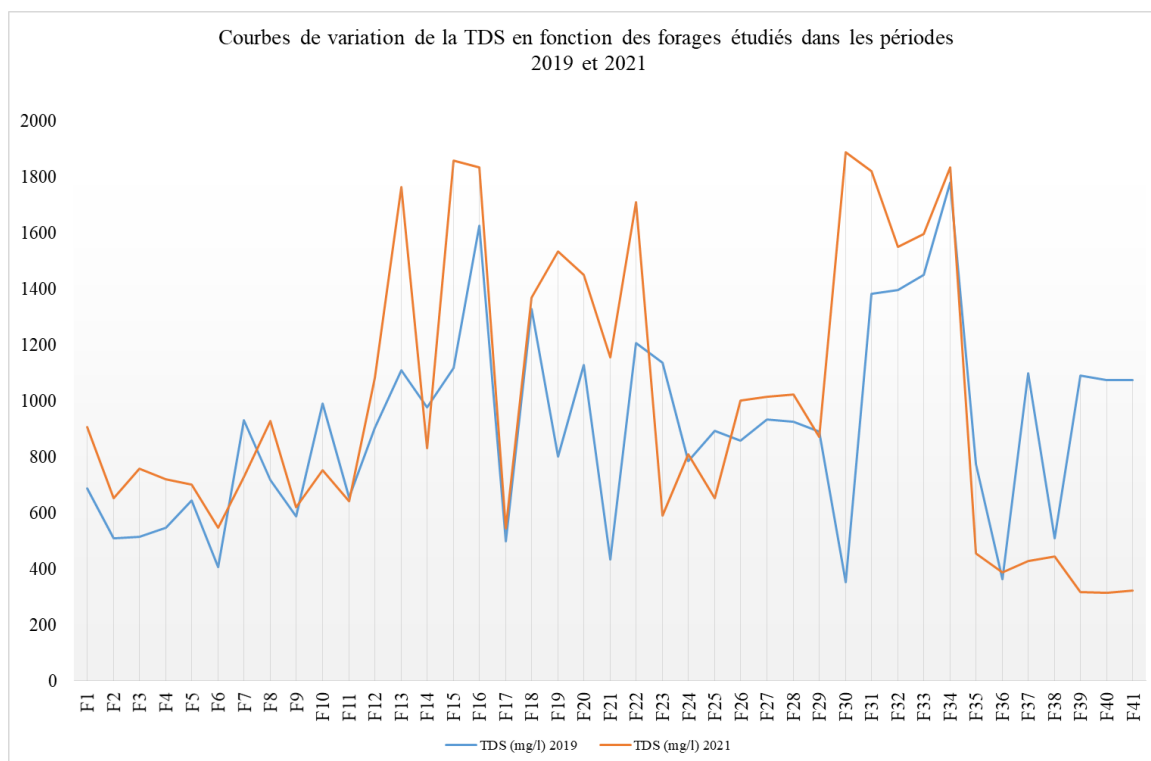


Fig n° (II-03) : Variation de la TDS en fonction des forages

II-2-2) Les paramètres chimiques :

a) Le calcium (Ca²⁺)

Le calcium est un élément très répandu dans les eaux souterraines, des quantités élevées de calcium ne présentent aucun risque pour la santé, mais elles peuvent néanmoins altérer le goût de l'eau et favoriser l'apparition des tartres.

Le Tab n° (II-05) présente le résumé statistique de la variation du Ca²⁺ pour les échantillons des deux périodes 2019 et 2021 :

Tab n° (II-05) :Statistiques du Ca^{2+} des eaux souterraines de la zone d'étude

Périodes	Minimum	Moyenne	Maximum	Ecart-type	Norme de potabilité(OMS)	% des points dépassant la norme
2019	96	209,94	491,2	92,57	$\text{Ca}^{2+} \leq 200 \text{ mg/l}$	42%
2021	24	177,06	360	84,12		34%

L'examen des paramètres statistiques de la variation du Ca^{2+} durant les deux périodes montre qu'il y a une diminution des paramètres de position (le maximum le minimum et la moyenne) ainsi que le paramètre de dispersion (l'écart-type) en 2021 par rapport à 2019. Le tableau des statistiques montre un dépassement des normes de potabilité pour les valeurs maximales, mais pour les moyennes, ils restent plus ou moins dans la norme.

b) Le Magnésium (Mg^{2+})

Le magnésium existe en abondance dans la nature avec le calcium, il contribue à la dureté de l'eau. Le pourcentage de magnésium ou danger de magnésium exprime la mesure de l'effet du magnésium dans l'eau d'irrigation. L'excès de magnésium affecte la qualité des sols qui peut se traduire en faible rendement des cultures (Ncibi, Gaaloul et al. 2016).

Le Tab n° (II-06) présente le résumé statistique de la variation du Mg^{2+} pour les échantillons des deux périodes 2019 et 2021 :

Tab n° (II-06) :Statistiques du Mg^{2+} des eaux souterraines de la zone d'étude

Périodes	Minimum	Moyenne	Maximum	Ecart-type	Norme de potabilité(OMS)	% des points dépassant la norme
2019	34,02	110,40	233,28	52,58	$\text{Mg}^{2+} \leq 150 \text{ mg/l}$	22%
2021	34,02	101,37	223,56	44,25		15%

L'examen des paramètres statistiques durant les deux périodes montre que les concentrations en ion Mg^{2+} sont en partie moins élevées que celles du Ca^{2+} , aussi, il y a une stabilité des paramètres de position (le maximum le minimum et la moyenne) et le paramètre de dispersion (l'écart-type) dans les deux périodes, avec une dispersion très importante autour de la moyenne. Le tableau des statistiques montre aussi un dépassement des normes de potabilité pour les valeurs maximales, mais pour les moyennes ils restent bien moins que la norme.

c) Le sodium (Na⁺) :

Le sodium pénètre dans l'aquifère par la pluie et par la dissolution des roches, en raison de ses effets sur les sols et les plantes, il est considéré parmi les principaux facteurs régissant l'eau d'irrigation. Le Na⁺ est un cation important qui se détériore au-delà de la structure du sol et réduit le rendement des cultures. Lorsque la concentration de Na⁺ est élevée dans l'eau d'irrigation, Na⁺ tend à être absorbé par les particules d'argile et sera remplacé par les ions de Mg²⁺ et Ca²⁺. Ce processus d'échange de Na⁺ dans de l'eau par Ca²⁺ et Mg²⁺ dans le sol réduit la perméabilité (Ncibi, Gaaloul et al. 2016). La concentration normalement trouvée dans l'eau de surface du sodium est inférieure à 20 mg/l, tandis qu'il n'y a pas une norme guide limité par OMS.

Le Tab n° (II-07) présente le résumé statistique de la variation du Na⁺ pour les échantillons des deux périodes 2019 et 2021 :

Tab n° (II-07) : Statistiques du Na⁺ des eaux souterraines de la zone d'étude

Périodes	Minimum	Moyenne	Maximum	Ecart-type
2019	7	130,29	425	81,87
2021	22	156,23	430	103,41

L'examen des paramètres statistiques durant les deux périodes montre que les concentrations en ion Na⁺ sont très élevées par rapport à la concentration normale trouvée dans des eaux de surface, et ceci touche l'ensemble des forages avec des concentrations variées, il y a une augmentation des paramètres de position (le maximum le minimum et la moyenne) et le paramètre de dispersion (l'écart-type) dans la période 2021, avec une dispersion très importante autour de la moyenne.

d) Le potassium (K⁺) :

Le potassium est un élément naturellement présent dans l'eau mais peut également provenir de l'activité humaine (exemples : mines de sel, industrie du verre, engrais). Pour la norme de l'OMS, la définition d'une valeur guide reposant sur des arguments sanitaires pour le potassium dans l'eau de boisson n'a pas été jugée nécessaire.

Le Tab n° (II-08) présente le résumé statistique de la variation du K⁺ pour les échantillons des deux périodes 2019 et 2021 :

Tab n° (II-08) : Statistiques du K⁺ des eaux souterraines de la zone d'étude

Périodes	Minimum	Moyenne	Maximum	Ecart-type
2019	2,1	4,42	8,9	1,96
2021	2	5,8	17,9	3,6

L'examen des paramètres statistiques durant les deux périodes montre que les concentrations en ion K^+ sont variées, il y a une légère augmentation des paramètres de position (le maximum le minimum et la moyenne) et le paramètre de dispersion (l'écart-type) dans la période 2021, avec une dispersion importante autour de la moyenne.

e) Le chlorure (Cl^-)

La concentration des chlorures dans l'eau peut être plus ou moins élevée en fonction de la géologie des sols (formations argileuses, marneuses et salifères triasiques) ou en fonction de l'exposition à la pollution (rejets d'origine industrielle ou activités agricoles), des fortes concentrations peuvent donner un goût désagréable et posent le problème de corrosion dans les canalisations et les réservoirs métalliques.

Le Tab n° (II-09) présente le résumé statistique de la variation du Cl^- pour les échantillons des deux périodes 2019 et 2021 :

Tab n° (II-09) : Statistiques du Cl^- des eaux souterraines de la zone d'étude

Périodes	Minimum	Moyenne	Maximum	Ecart-type	Norme de potabilité(OMS)	% des points dépassant la norme
2019	58,93	343,5	942,88	236,86	$Cl \leq 500 \text{ mg/l}$	21%
2021	71	226,72	710	160,26		7%

De même que les ions précédemment analysés, les paramètres statistiques montrent une dispersion très importante autour de la moyenne et un dépassement des normes de potabilité pour les valeurs maximales, quant aux moyennes restent inférieures à la norme.

f) Le Sulfate (SO_4^{2-})

Le sulfate est un composé naturel qui correspond à la présence de soufre dans l'eau. S'il est consommé à trop fortes doses (plus de 1000 milligrammes par litre) il peut avoir un effet laxatif (troubles gastro-intestinaux) c'est pourquoi la teneur de l'eau de distribution en sulfate est limitée à 500 (mg/l) (TITRAOUI and LAMANI 2020), aussi elles peuvent donner un goût désagréable à l'eau, ou créer des dépôts tenaces dans les chaudières.

Les sulfates contenus dans l'eau souterraine résultent de la dissolution du gypse, l'utilisation des engrais chimiques ou le lessivage des terrains argileux et marneux, elles proviennent également des eaux industrielles.

Le Tab n° (II-10) présente le résumé statistique de la variation du SO_4^{2-} pour les échantillons des deux périodes 2019 et 2021 :

Tab n° (II-10) : Statistiques du SO_4^{2-} des eaux souterraines de la zone d'étude

Périodes	Minimum	Moyenne	Maximum	Ecart-type	Norme de potabilité(OMS)	% des points dépassant la norme
2019	0,00	586,86	1300	339,77	$\text{SO}_4^{2-} \leq 500 \text{ mg/l}$	66%
2021	0,00	655,83	1300	325,40		66%

Le tableau ci-dessus montre que les valeurs des paramètres de position et de dispersion sont très proches pour les deux périodes, avec une dispersion importante aux tours des valeurs moyennes, ainsi 66% des forages ont dépassés la norme de potabilité pour les deux périodes ce qui traduit des fortes concentrations en sulfates et révèle la nature sulfaté des eaux de la zone étudiée.

g) Le Bicarbonate (HCO_3^-)

Le bicarbonate fait partie des substances minérales présentes naturellement dans l'eau. L'eau peut contenir des quantités plus ou moins élevées de bicarbonate en fonction de types de sols qu'elle traverse par infiltration, ou sur lesquels elle s'écoule. Sans effet nocif pour la santé, le bicarbonate n'est soumis à aucune norme légale.

Le Tab n°(II-11) présente le résumé statistique de la variation du HCO_3^- pour les échantillons des deux périodes 2019 et 2021 :

Le tableau montre que les valeurs des paramètres de position et de dispersion ont diminué en 2021 par rapport à 2019, ces paramètres restent modérées pour les deux périodes.

Tab n° (II-11) : Statistiques du HCO_3^- des eaux souterraines de la zone d'étude

Périodes	Minimum	Moyenne	Maximum	Ecart-type
2019	244	418,51	671	87,26
2021	183	307,67	549	81,04

h) Le Nitrate (NO_3^-) :

Contrairement à d'autres éléments, l'azote ne provient en aucun cas de la dégradation chimique et physique des roches, mais bien de deux sources distinctes : l'atmosphère et les sources organiques. À cela, on doit rajouter depuis l'apparition de l'industrie chimique, l'azote sous forme d'engrais chimiques (SNOUSSI 2000). Le nitrate est une production naturelle créée au cours du cycle de l'azote. L'épandage excessif d'engrais sur les sols agricoles peut engendrer des risques d'une concentration élevée de nitrate dans l'eau, car ils sont hydrosolubles et la partie non assimilée par les plantes se diffuse et s'infiltré dans les sols pour atteindre les eaux souterraines. Il y a d'autres origines de nitrates comme l'élevage intensif des animaux, ou même la pollution d'origine domestique. C'est pour

quoi l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a fixé la concentration maximale de nitrate dans l'eau à 50 mg/l.

Le Tab n° (II-12) présente le résumé statistique de la variation du NO_3^- pour les échantillons des deux périodes 2019 et 2021 :

Tab n° (II-12): Statistiques du NO_3^- des eaux souterraines de la zone d'étude

Périodes	Minimum	Moyenne	Maximum	Ecart-type	Norme de potabilité(OMS)	% des points dépassant la norme
2019	0,0	16,42	100	18,92	$\text{NO}_3^- \leq 50 \text{ mg/l}$	2%
2021	0,0	21,77	99	21,69		10%

Le tableau ci-dessus montre que les valeurs des paramètres de position et de dispersion ont augmenté en 2021 par rapport à 2019, le nombre de point dépassant la norme à augmenter d'un seul point en 2019 (concerne le forage F34) à quatre points en 2021 (concerne les forages F2, F5, F30, F34), les régions contaminés sont : la partie sud d'Ouled Mansour, la partie nord de Hammam Dallaa, et la partie sud de Mtarfa.

II-2-3) Analyse et discussions des résultats :

Basés sur les valeurs moyennes de l'étude statistique des principaux ions exprimés milliéquivalent par litre (comme indique le Tab n° (II-13) ci-dessous), on peut classer la présence des ions dans l'ordre décroissant suivant pour les deux périodes 2019 et 2021 comme suit :

- Les cations: $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$;
- Les anions : $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$,
- Une domination parfaite des ions sulfates suivies par le calcium, chlorures et le magnésium.
- L'examen de l'écart-type des différents paramètres à montrer une grande dispersion de ces valeurs mesurés autour de leurs moyennes ce qui implique une grande variabilité hydrogéochimique des eaux souveraines.

Tab n° (II-13): Valeurs moyenne des ions en milliéquivalent par litre.

Le paramètre chimique	Ca^{+2}	Mg^{+2}	Na^+	K^+	Cl^-	HCO_3^-	SO_4^{-2}	NO_3^-
Valeur moyenne en (meq/l)	9,66	8,71	6,23	0,13	8,04	5,95	12,94	0,31

II -3) Analyse spatiale des cartes hydro-chimiques

II -3-1) Aperçu général sur la méthode d'interpolation spatiale dans le SIG :

L'interpolation spatiale est le processus d'utilisation des points avec des valeurs connues pour des valeurs estimées à d'autres points inconnus, en raison du coût élevé et des ressources limitées, la collecte de données est généralement menée que dans un nombre limité d'emplacements de points sélectionnés. Dans les SIG (Systèmes d'information géographique), l'interpolation spatiale de ces points peut être appliquée pour générer une carte continue, une méthode d'interpolation adaptée doit être utilisée pour estimer de manière optimale les valeurs à ces endroits où aucun des échantillons ou mesures ont été pris. Les résultats de l'analyse d'interpolation peuvent en suite être utilisés pour les analyses qui couvrent la zone entière et pour la modélisation.

Un logiciel SIG fournit généralement des outils d'analyses spatiales pour le calcul des entités statistiques et la réalisation des activités de géo-traitement comme interpolation des données, il existe plusieurs méthodes d'interpolation, nous présenterons, dans cette étude, une méthode largement utilisée, à savoir : la **Pondération par Distance Inverse (IDW)**.

II -3-2) Pondération par Distance Inverse (IDW) :

La pondération par distance inverse (PID) ou (en anglais, Inverse Distance Weighting IDW) est une méthode d'interpolation spatiale, c'est un processus permettant d'assigner une valeur à tout point d'un espace à partir d'un semis de points connus, les points d'échantillons sont pondérés durant l'interpolation de telle sorte que l'influence d'un point par rapport à un autre décline avec la distance du point inconnu que vous voulez créer (<https://docs.qgis.org/2.8/fr/docs/index.html>) (voir la Fig n° (II-04)).

Cette méthode est basée sur la distance pondérée d'un jeu de points (à gauche), Surface interpolée à partir de points d'élévation vecteur (à droite).

La pondération est appliquée à un échantillon de points par le biais de l'utilisation d'un coefficient de pondération qui contrôle comment l'influence de pondération diminuera quand la distance des nouveaux points augmente. Plus le coefficient de pondération est grand, moins les points auront d'effet s'ils sont loin du point inconnu durant le processus d'interpolation, quand le coefficient augmente, la valeur du point inconnu s'approche de la valeur du point d'observation le plus proche.

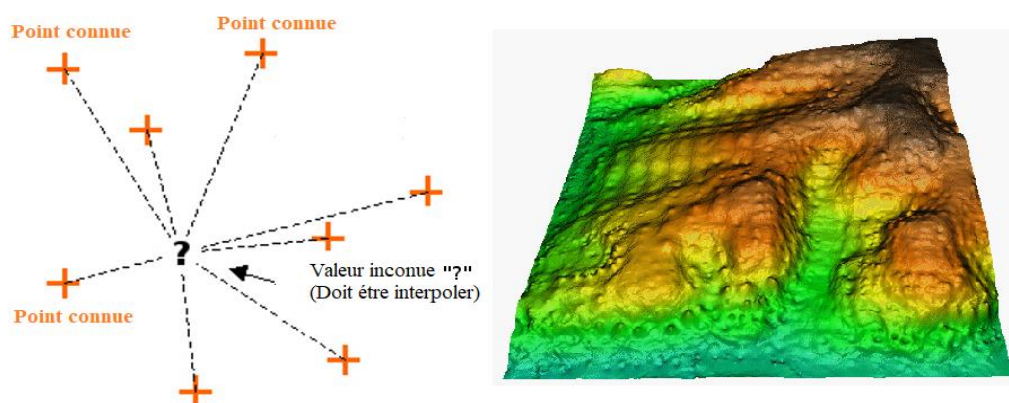


Fig n° (II-04) :Principe de la méthode IDW

II -3-3) Les cartes de la répartition spatiale hydro-chimique :

La carte de la conductivité électrique (Fig n° (II-05)) montre qu'il y a une grande augmentation des valeurs de la conductivité en 2021 par rapport à 2019, cette augmentation concerne les forages d'Ouled Mansour et Hammam Dhalaa (partie amont de la zone d'étude), la répartition est descendante du Nord vers le Sud et de l'Ouest vers l'Est et l'évolution se fait vers l'Est. Une grande partie de la zone d'étude appartient à la 5^{ème} classe (entre 3600 et 5500 mg/l).

La carte de répartition du calcium (Fig n° (II-06)) montre une diminution des valeurs en 2021, la répartition est descendante du Nord vers le Sud l'évolution se fait vers l'Est. La 5^{ème} classe concerne les forages d'Ouled Mansour.

La carte de répartition du magnésium (Fig n° (II-07)) montre une stabilisation des valeurs dans les deux périodes, la répartition s'évolue de l'Ouest vers l'Est. La 5^{ème} classe concerne les forages d'Ouled Mansour et l'extrême nord de M'sila.

La carte de répartition du sodium et de potassium (Fig n° (II-08) et (II-09)) montre une augmentation des surfaces de la 5^{ème} classe en 2021 (250 à 430 mg/l), la répartition s'évolue de l'Ouest vers le Nord-Est, cette partie concerne les forages d'Ouled Mansour et Hammam Dhalaa.

La carte de répartition du chlorure (Fig n° (II-10)) montre une diminution des valeurs en 2021, et une évolution ascendante de l'Est vers l'Ouest, la 5^{ème} classe (760 à 940 mg/l) se concentre dans les forages d'Ouled Mansour.

La carte de répartition du bicarbonate (Fig n° (II-11)) montre une diminution des valeurs en 2021, et une évolution ascendante de Sud vers le nord.

La carte de répartition du sulfate (Fig n° (II-12)) montre une évolution ascendante vers le nord de la zone d'étude, la 5^{ème} classe (1000 à 1300 mg/l) se concentre dans les forages d'Ouled Mansour et Hammam Dhalaa.

La carte de répartition du nitrate (Fig n° (II-13)) des faibles concentrations dans toute l'étendue de la surface de la zone d'étude, avec une concentration pointu dans le forage F34 en 2019, et le forage F30 en 2021.

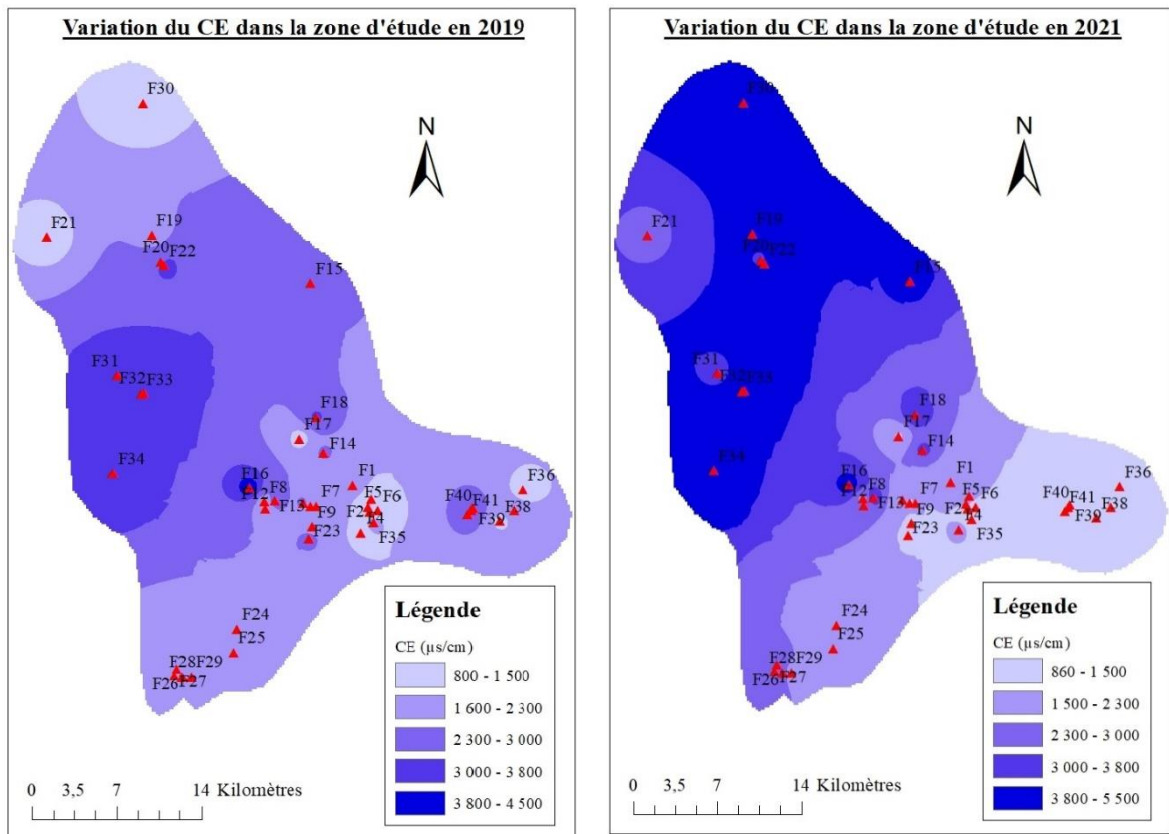


Fig n° (II-05) :Variation de la conductivité électrique entre 2019 et 2021

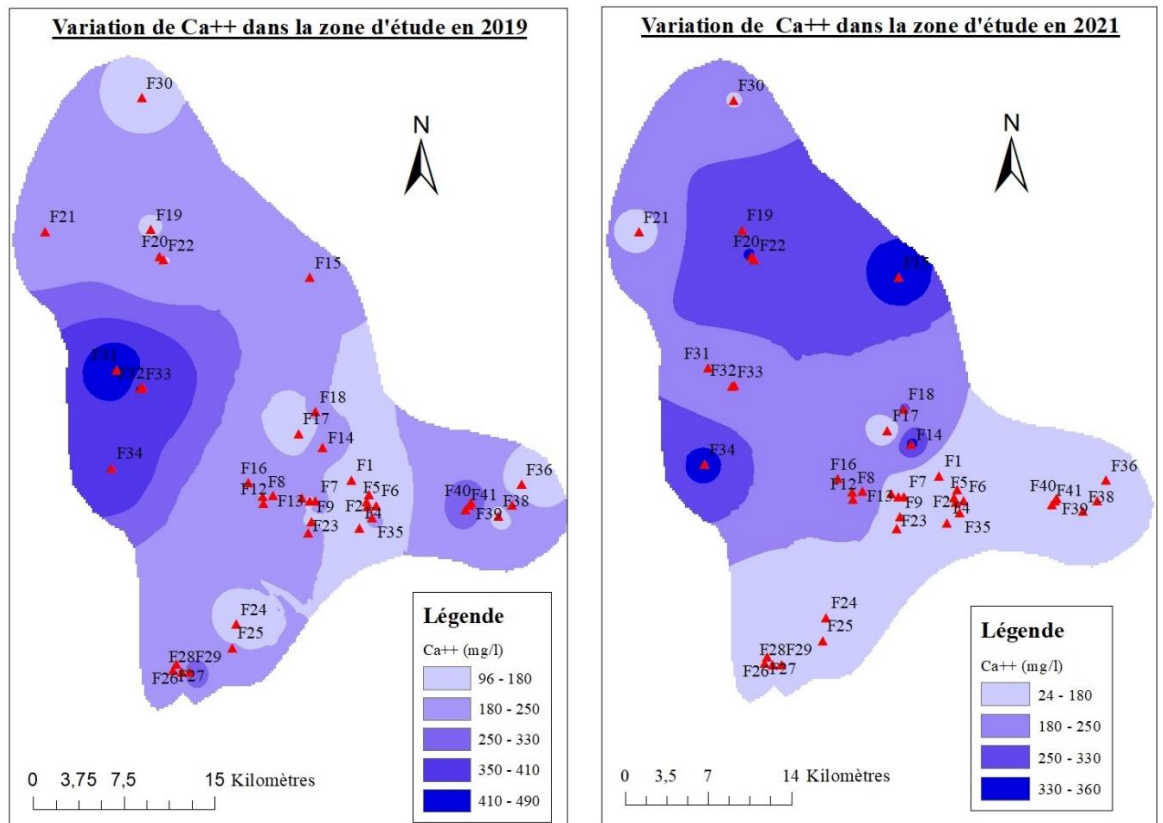


Fig n° (II-06) :Variation du calcium entre 2019 et 2021

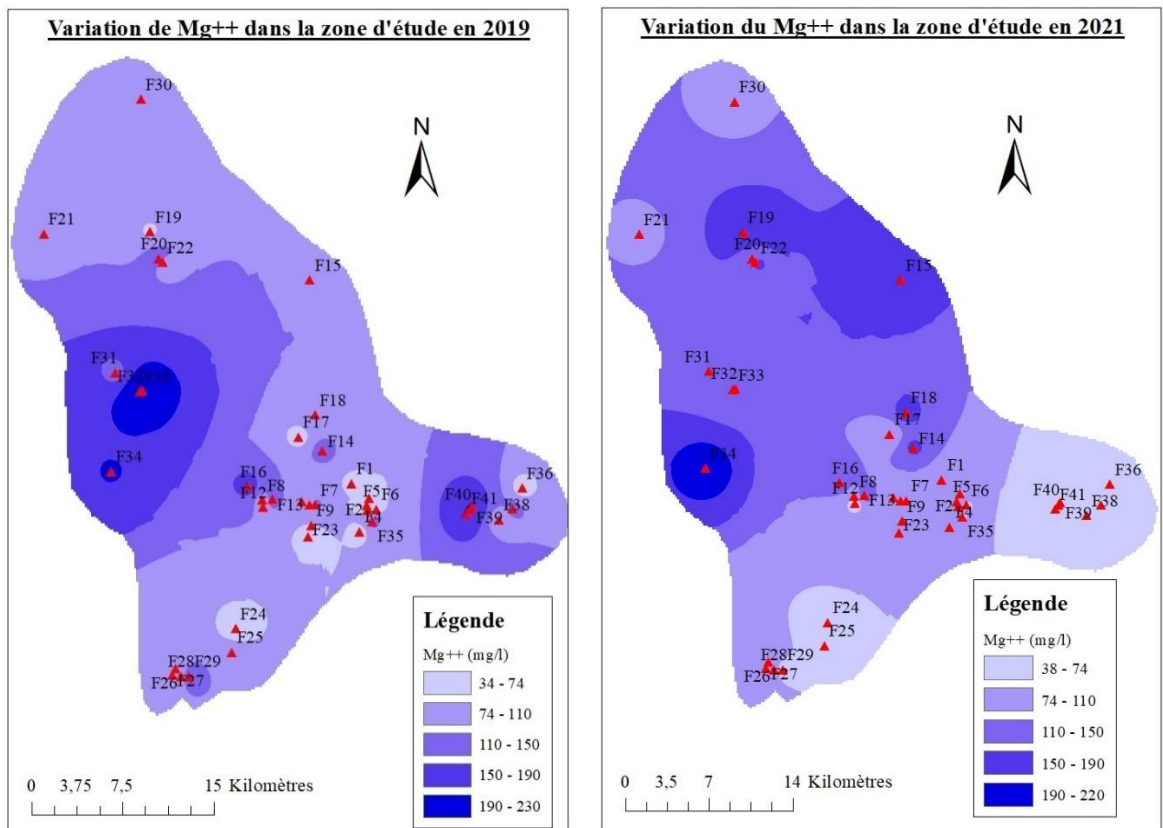


Fig n° (II-07) :Variation du magnésium entre 2019 et 2021

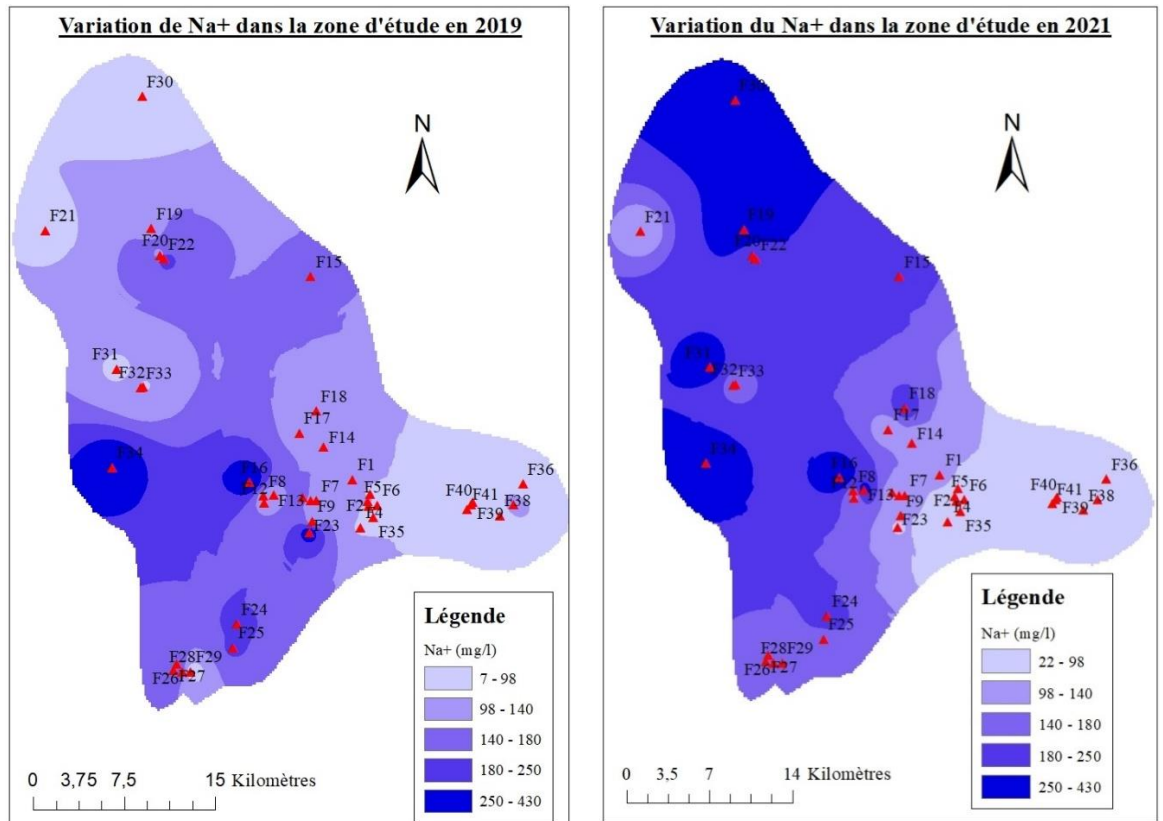


Fig n° (II-08) :Variation du sodium entre 2019 et 2021

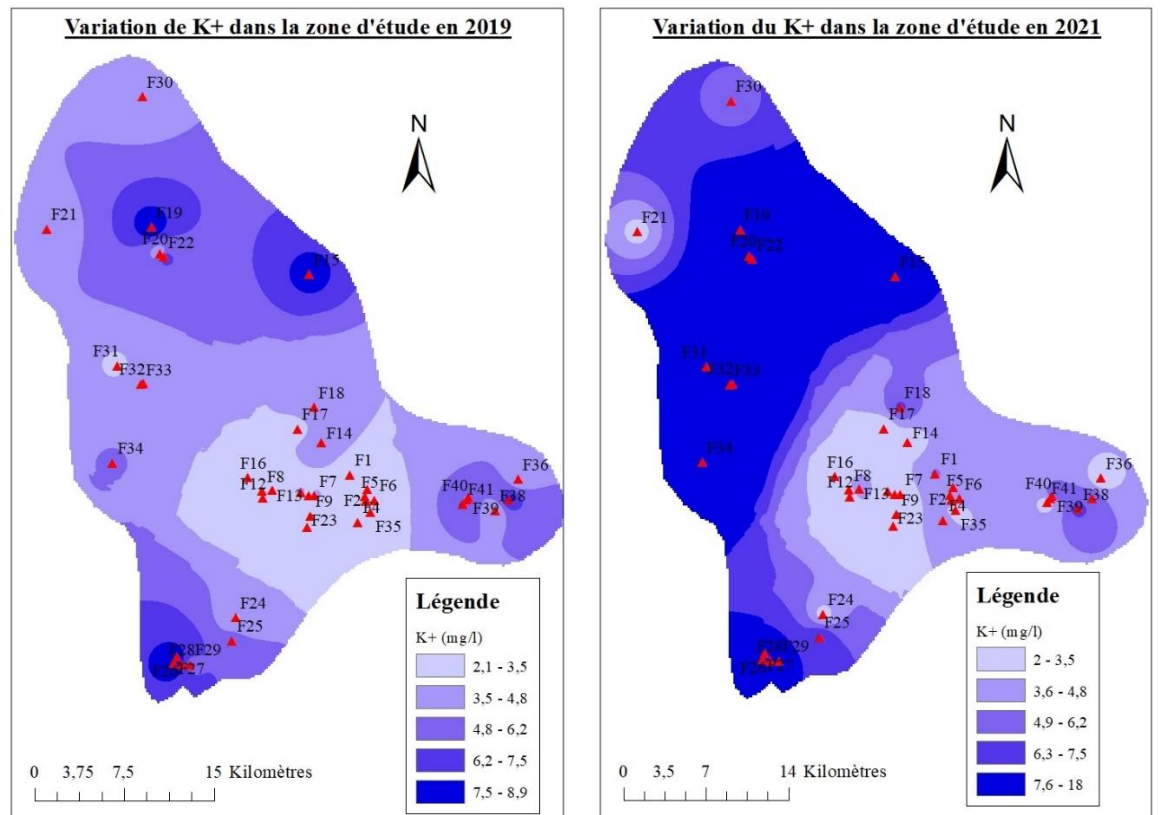


Fig n° (II-09) :Variation du potassium entre 2019 et 2021

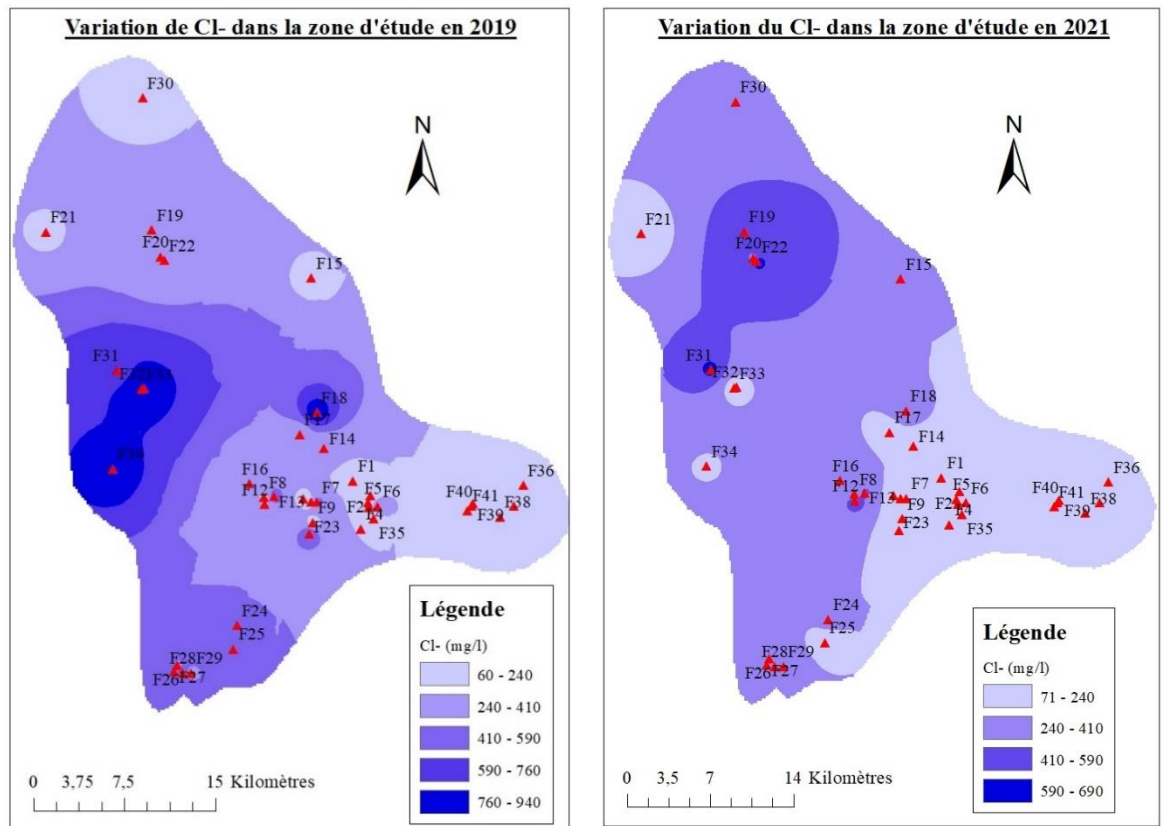


Fig n° (II-10) :Variation du chlorure entre 2019 et 2021

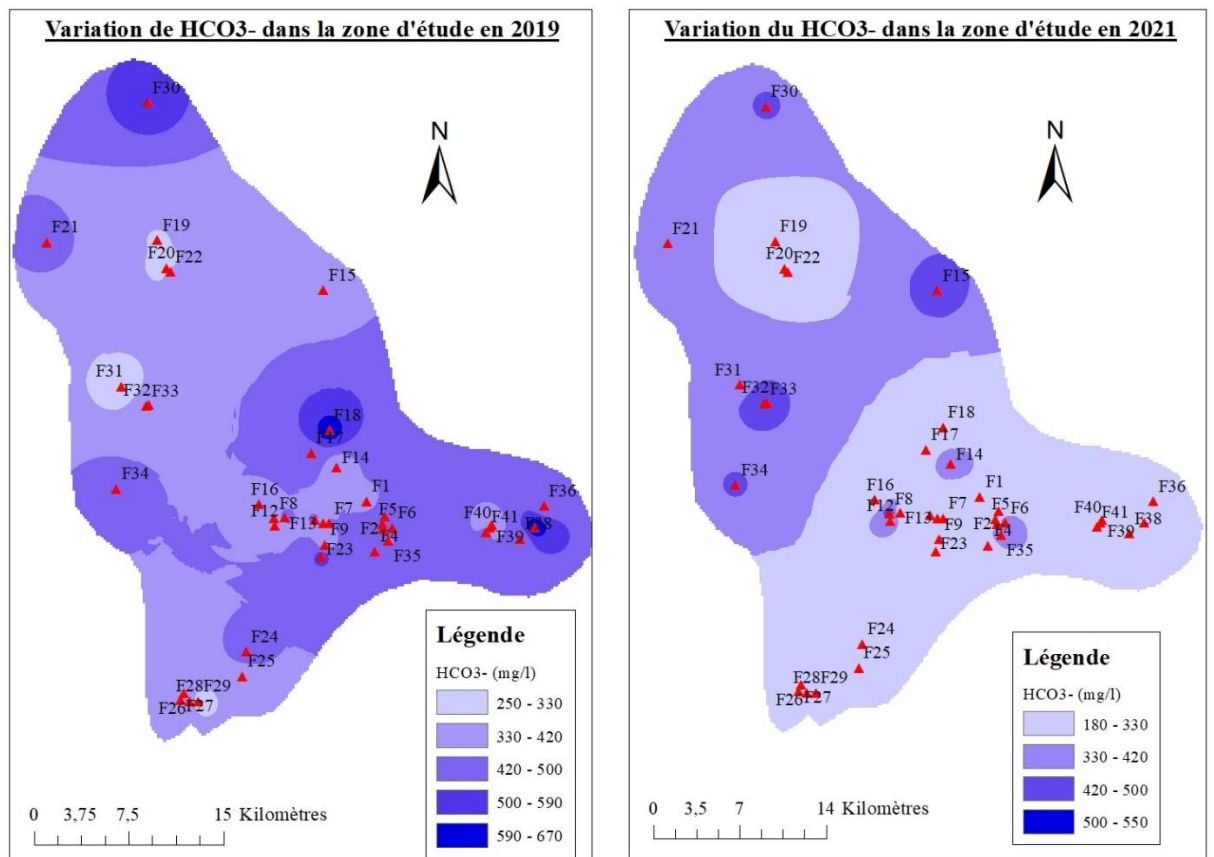


Fig n° (II-11) :Variation du bicarbonate entre 2019 et 2021

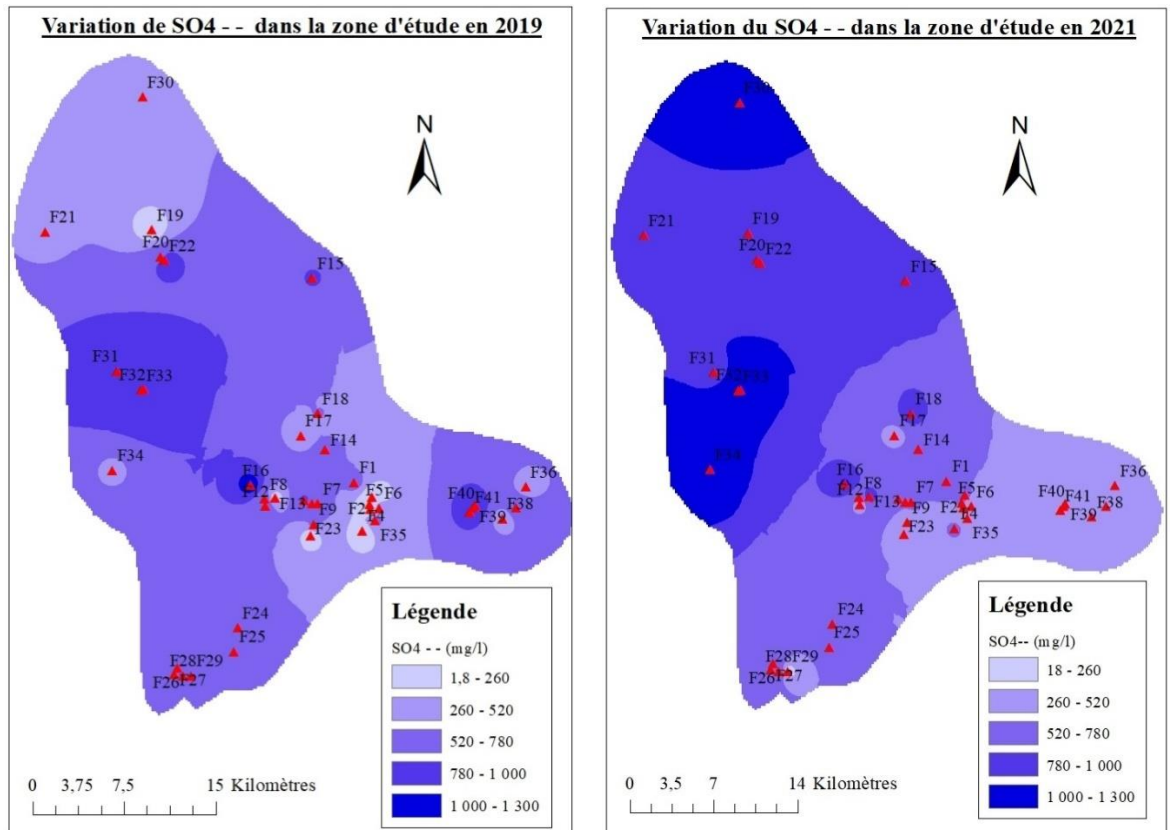


Fig n° (II-12) :Variation de sulfate entre 2019 et 2021

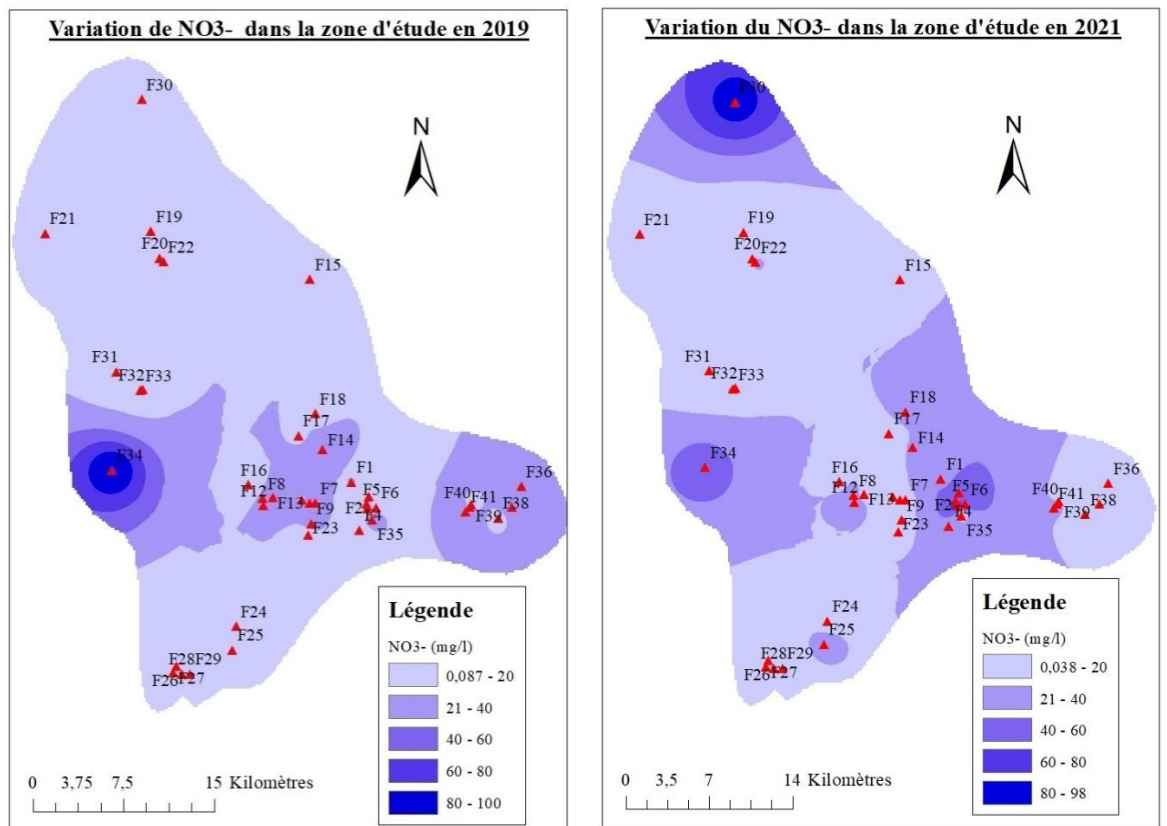


Fig n° (II-13) :Variation de nitrate entre 2019 et 2021

II-4) Faciès hydro-chimiques

II-4-1) Outil de traitement :

La classification hydrogéochimique des eaux a été réalisée par les diagrammes de **Piper** et de **Schoeller**, ces derniers sont fréquemment utilisés pour la typologie des eaux.

Le principal outil utilisé est le logiciel **DIAGRAMMES** créé par Roland Simler du Laboratoire d'hydrogéologie d'Avignon. C'est un logiciel d'hydrochimie en distribution libre facilitant l'exploitation d'analyse d'eau.

Les éléments chimiques considérés pour ce traitement concernent les cations Ca^{2+} , Mg^{2+} , $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ et les anions HCO_3^- , CO_3^- , $(\text{Cl}^- + \text{NO}_3^-)$ et SO_4^{2-} , après conversion en milliequivalents par litre. La précision analytique de mesure des ions est déterminée en calculant l'erreur absolue en équilibre ionique (la balance ionique) pour vérifier la fiabilité des mesures, qui se trouve dans tous les échantillons dans la norme limite de 5%, par la formule suivante :

$$E (\%) = [(\Sigma \text{ cations} - \Sigma \text{ anions}) / (\Sigma \text{ cations} + \Sigma \text{ anions})] * 100.. \text{ (Ncibi, Gaaloul et al. 2016)}$$

Ainsi, les faciès géochimiques des eaux sont obtenus en fonction de la prédominance des cations et des anions dans la solution.

II-4-2) Classification de Piper :

Le diagramme de Piper comporte un losange et deux triangles équilatéraux dont les côtés sont divisés en cent parties égales correspondantes à des pourcentages d'ions par rapport à la concentration des ions de même signe. Ce diagramme permet une classification simple des eaux.

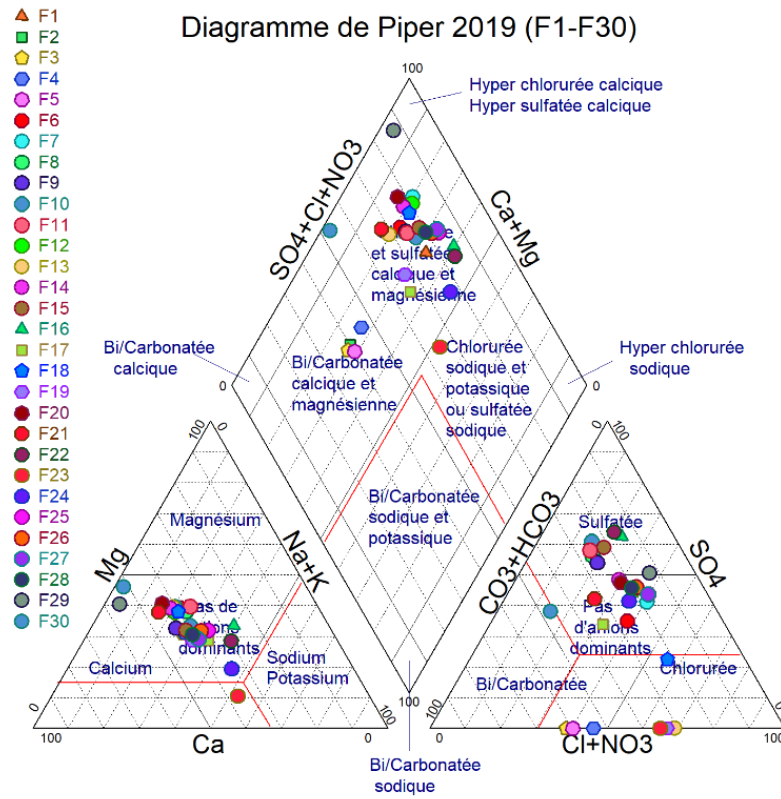


Fig n° (II-14) :Diagramme de PIPER de la zone d'étude (compagnie2019 F1-F30)

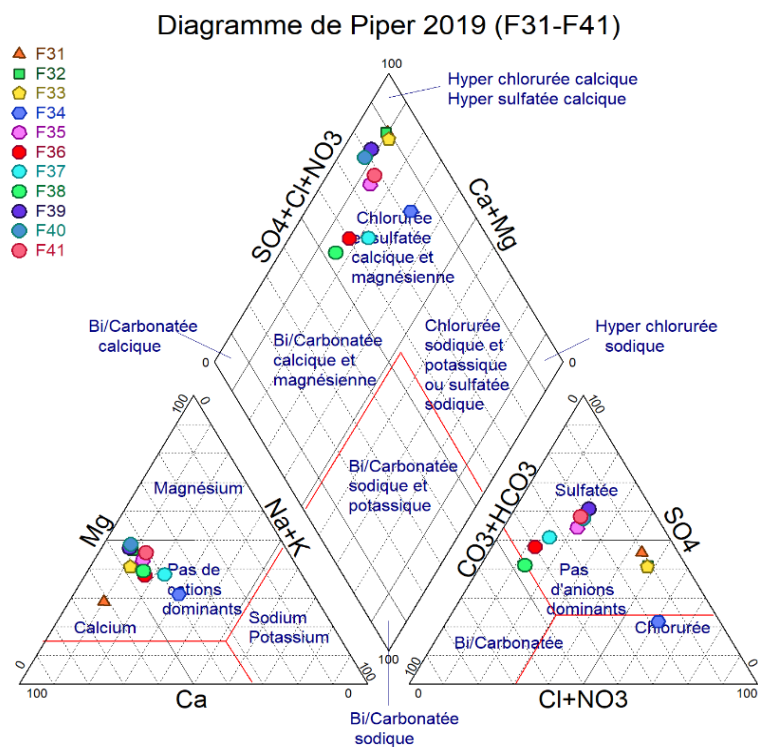


Fig n° (II-15) :Diagramme de PIPER de la zone d'étude (compagnie2019 F31-F41)

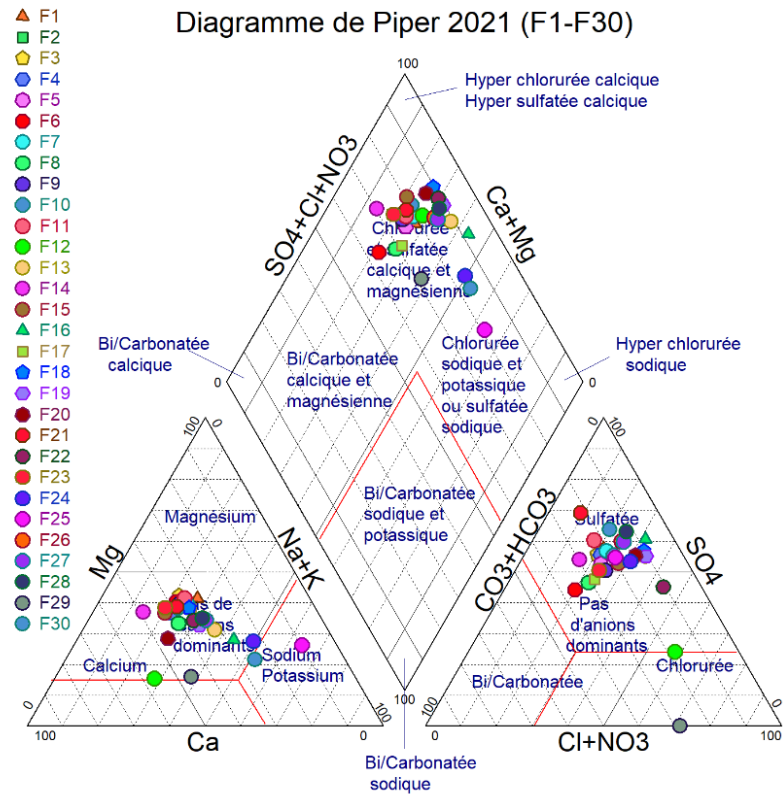


Fig n° (II-16) :Diagramme de PIPER de la zone d'étude (compagnie2021 F1-F30)

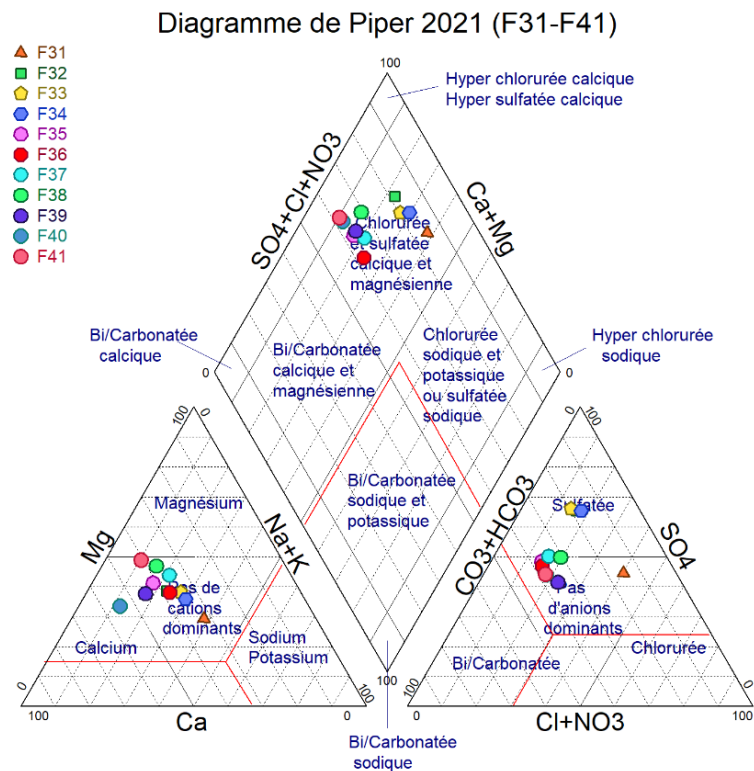


Fig n° (II-17) :Diagramme de PIPER de la zone d'étude (compagnie2021 F31-F41)

L'examen des diagrammes de Piper de la période 2019 (Fig n° (II-14) et (II-15)) montrent que les faciès chimiques se subdivisent en trois groupes :

Un groupe dominant, appelé groupe des salifères : présente un faciès chlorurée sulfatée calcique et magnésien, qui caractérise la plupart des eaux souterraines analysées et englobe 88% des forages.

Un groupe, appelé groupe des carbonatés : présente un faciès bicarbonatée calcique et magnésienne, (cas des forages F2, F3, F4, et F5) représentent 10% des forages, ces points se situent au Sud-Est de la commune de M'tarfa, les apports de ces éléments chimiques peuvent être liés à la dissolution des carbonates par les eaux météoriques. Ce type d'eaux se situent surtout dans des zones préférentielles de recharge car les aquifères à nappe libre renferment généralement des eaux souterraines moins âgées et moins minéralisées que les aquifères à nappe captive.

Un groupe composé d'un seul forage (cas de F23) représente 2% des forages, présente un faciès chloruré sodique et potassique situé au sud de la commune de M'sila, ce sont des eaux plus anciennes et profondes, leur temps de séjour leur confère une salinité élevée caractéristique des saumures, d'où il a la même origine que le premier groupe.

L'examen des diagrammes de Piper de la période 2021 (Fig n° (II-16) et (II-17)) montrent la dominance du faciès chlorurée sulfatée calcique et magnésien, et qui caractérise la quasi-totalité des eaux souterraines sauf un seul point (cas de F25) qui présente un faciès chloruré sodique et potassique situé au à l'extrême Sud de la zone d'étude.

II-4-3) Classification de Schoeller et Berkloff :

Le diagramme de Schoeller et Berkloff permet entre autres de reconnaître simplement le faciès d'une eau souterraine, en utilisant les concentrations des éléments majeurs et en les reportant sur un graphique en colonnes à échelles logarithmiques. Les résultats des analyses chimiques ont été portés sur les diagrammes où chaque composition chimique sera représentée par une ligne figurative, l'examen de la forme et de la position de cette ligne permettra de définir le faciès chimique d'une eau et de comparer les échantillons entre eux.

On remarque bien que les diagrammes de Schoeller-Berkloff dans les deux périodes 2019 (Fig n° (II-18), (II-19) et (II-20)) donnent une classification très proche de celle obtenue par la classification de piper et permet de distinguer la dominance des ions suivants :

- Des ions de Calcium et magnésium pour les cations.
- Des ions de chlorures et sulfate pour les anions.

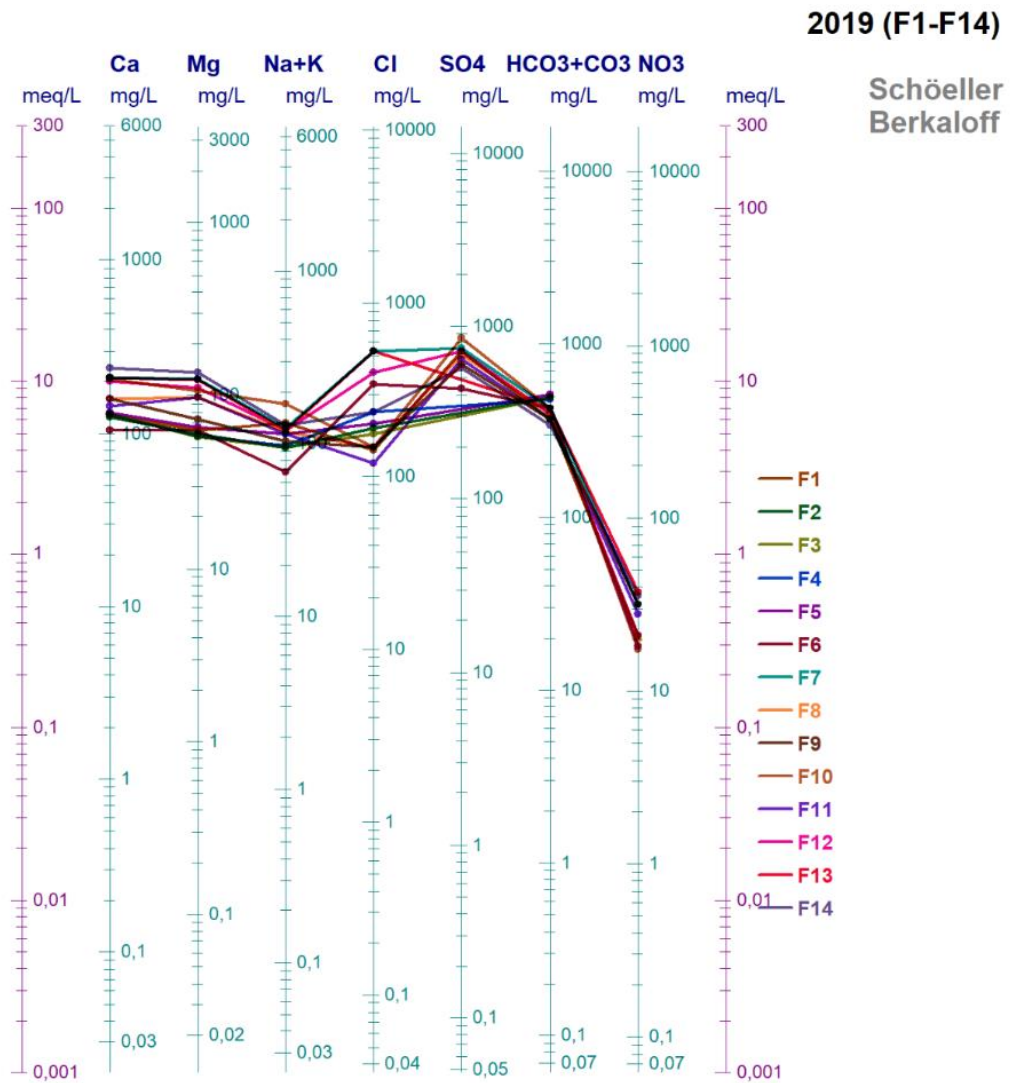


Fig n° (II-18) : Diagramme de Schoeller-Berkaloff appliqué aux eaux souterraines de la région d'étude(compagnie 2019 de F1 à F14)

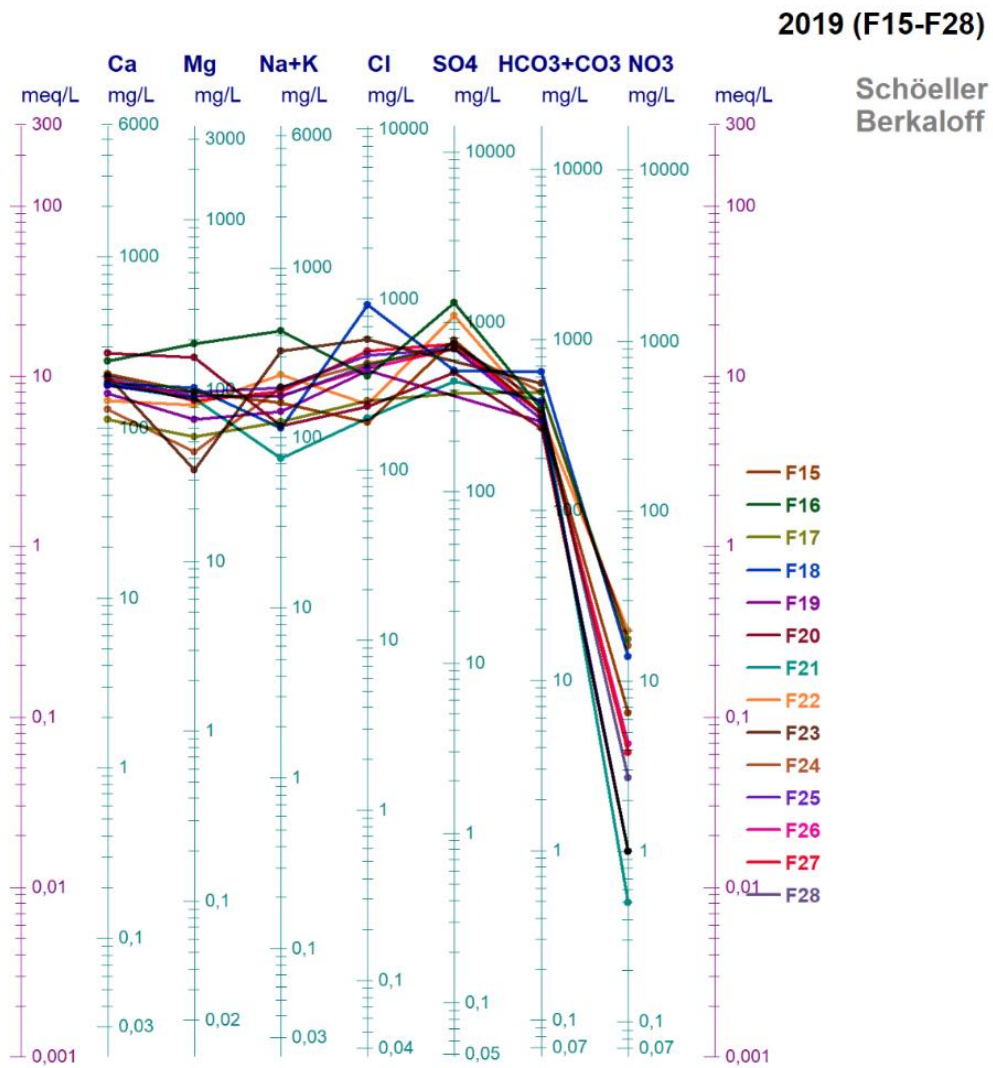


Fig n° (II-19) : Diagramme de Schoeller-Berkaloff appliqué aux eaux souterraines de la région d'étude (compagne 2019 de F15 à F28)

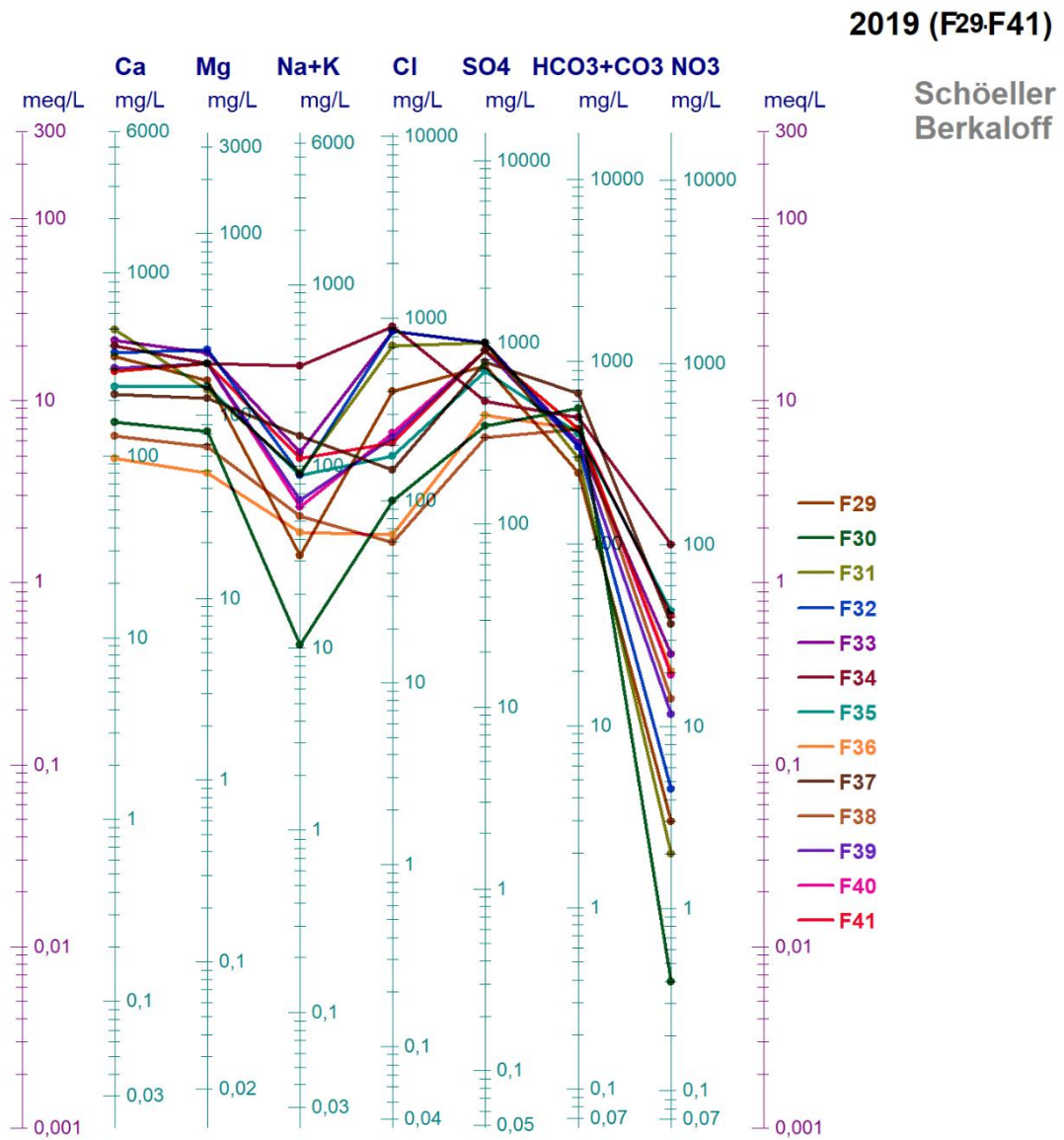


Fig n° (II-20) : Diagramme de Schoeller-Berkaloff appliqué aux eaux souterraines de la région d'étude(compagnie 2019 de F29 à F41)

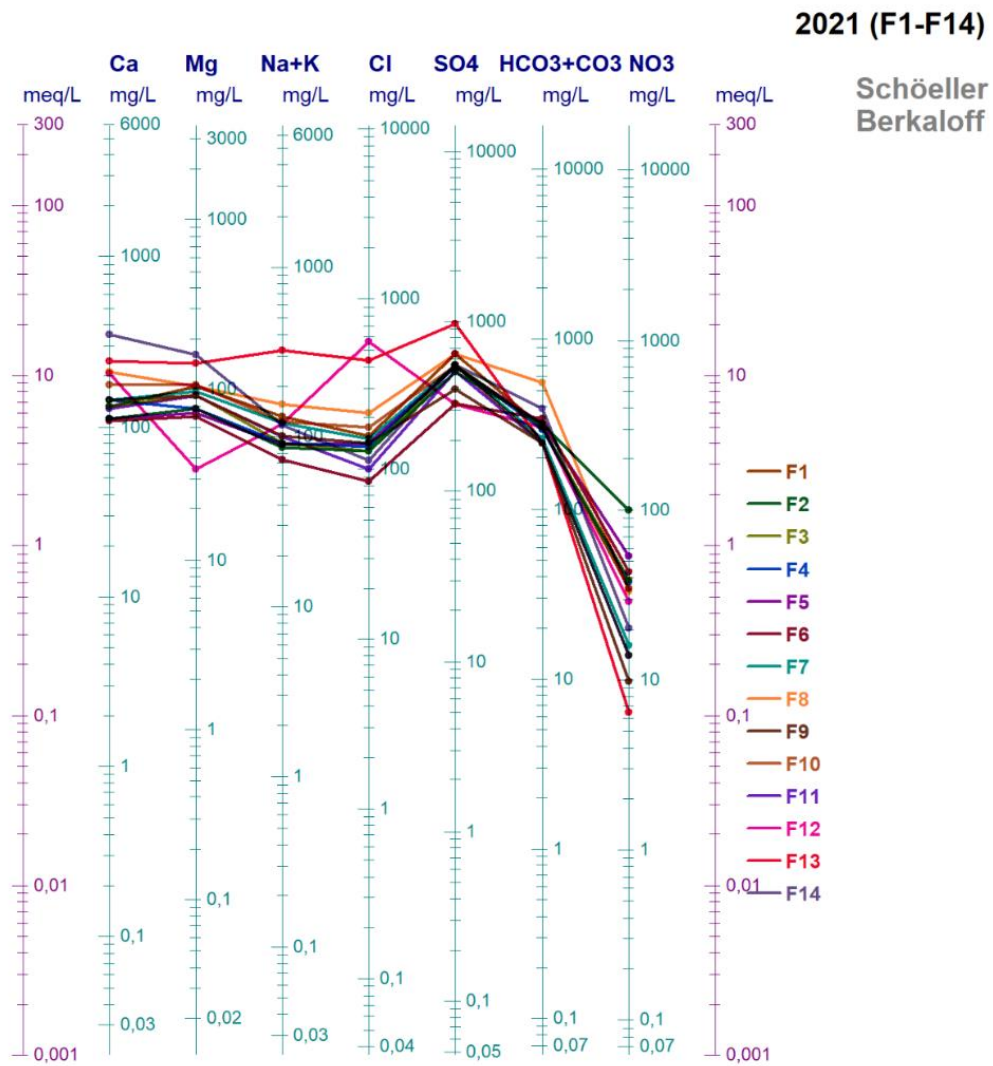


Fig n° (II-21) :Diagramme de Schoeller-Berkaloff appliqué aux eaux souterraines de la région d'étude(compagnie 2021 de F1 à F14)

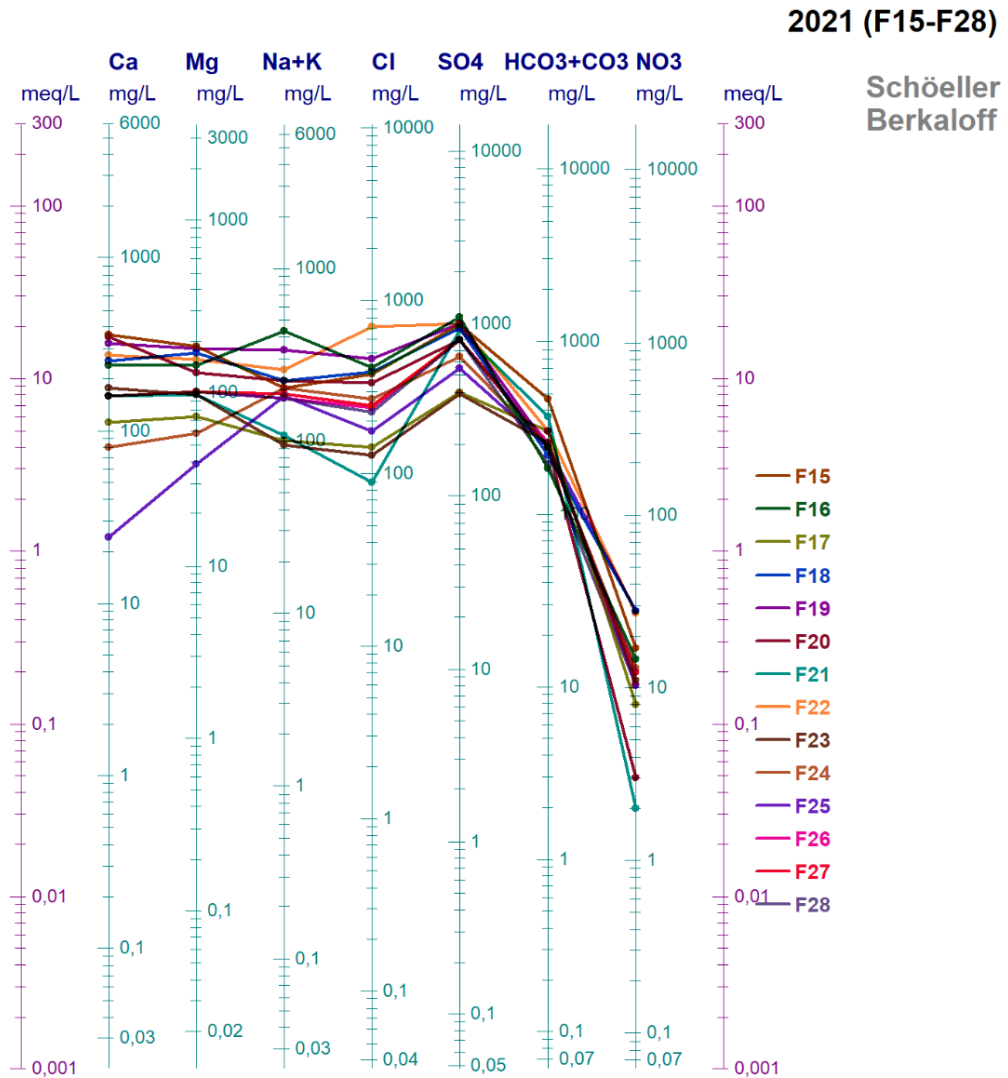


Fig n° (II-22) : Diagramme de Schoeller-Berkaloff appliqué aux eaux souterraines de la région d'étude(compagnie 2021 de F15 à F28)

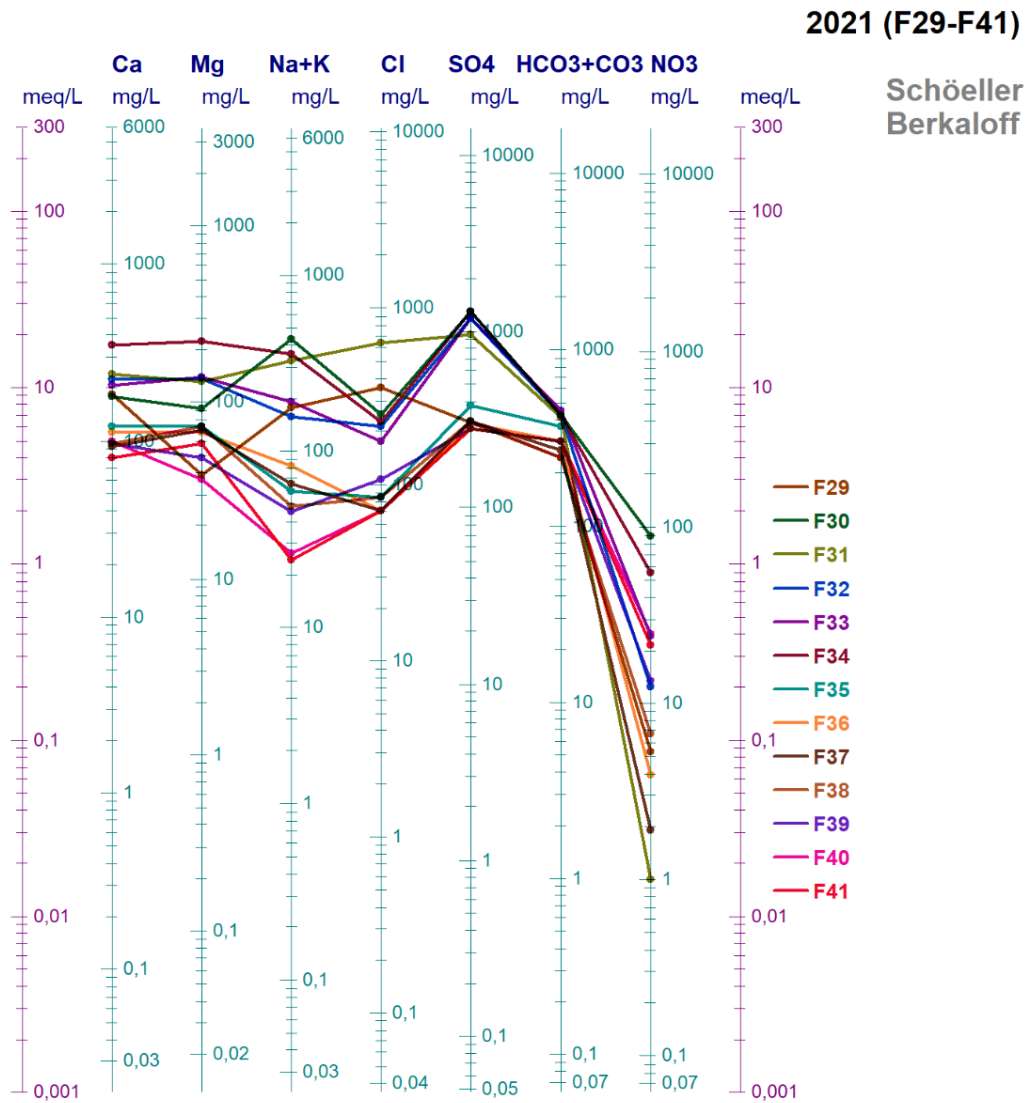


Fig n° (II-23) : Diagramme de Schoeller-Berkaloff appliqué aux eaux souterraines de la région d'étude(compagnie 2021 de F29 à F41)

Analyse et discussions des résultats :

Selon le diagramme de Schoeller- Berkaloff, le faciès chimique des eaux de la zone d'étude indique la dominance des ions Cl^- et SO_4^{2-} , Ca^{2+} et Mg^{2+} , ces résultats confirment la classification faite sur le diagramme de Piper, les faciès chimiques des eaux de forages analysés se regroupent en une seule famille dominante qui est le chlorurée sulfatée calcique et magnésien pour les deux périodes 2019 et 2021.

II-4-4) Indices de saturation et équilibres chimiques :

Les éléments tels que Ca, Mg, Na, SO_4 , Cl peuvent provenir de plusieurs types de minéraux évaporitiques, nous citons à titre d'exemple, la halite (Na, Cl), les gypses (CaSO_4), l'Epsomite (Mg SO_4), La mirabilite (Na_2SO_4) etc....

L'indice de saturation (IS) est un paramètre très important dans l'étude des équilibres eaux- minéraux. Une valeur de IS est égale à zéro, indique que l'eau est à l'équilibre (saturée) par rapport à la phase minérale. Une valeur négative indique une sous-saturation (dissolution du minéral est possible), et une valeur positive indique une sursaturation (précipitations du minéral est possible).

L'IS est déterminé par la formule suivante :

$$\text{IS} = \text{Log} (\text{PAI} / \text{Pks}) \dots \text{(Ncibi, Gaaloul et al. 2016)}$$

Avec : **PAI** : le produit d'activité ionique des espèces chimiques en solution ;

Pks : produit de solubilité d'équilibre en phase solide à la température spécifiée.

L'utilisation du programme **Phreeq C** intégré dans le logiciel **Diagramme**, nous a permis de calculer les indices de saturation des minéraux d'origine évaporitique à savoir : l'halite, l'anhydrite, le gypse, et des minéraux d'origine carbonatés à savoir : l'aragonite, la dolomite, et la calcite. Par la suite nous avons tracé les courbes affichées dans les fig n° (II24, II25).

Pour les deux périodes (2019 et 2021), l'**IS** indique une sursaturation, et donc une tendance à la précipitation des minéraux de type carbonatés (aragonite, calcite, dolomite), Par contre, les minéraux évaporitiques (halite, anhydrite, gypse) se trouvent sous-saturés, notamment l'halite.

II-4-5) Origine des minéraux évaporitiques :

Pour connaître l'origine des minéraux évaporitiques, nous avons vérifié quelles sont les cations dominants dans les minéraux sulfatés et ceux chlorurés par la combinaison des sulfates avec les éléments : Ca, Mg et Na, et de même que le Cl avec le Na (nous avons tracé les courbes en binômes, la période 2021 est plus significante).

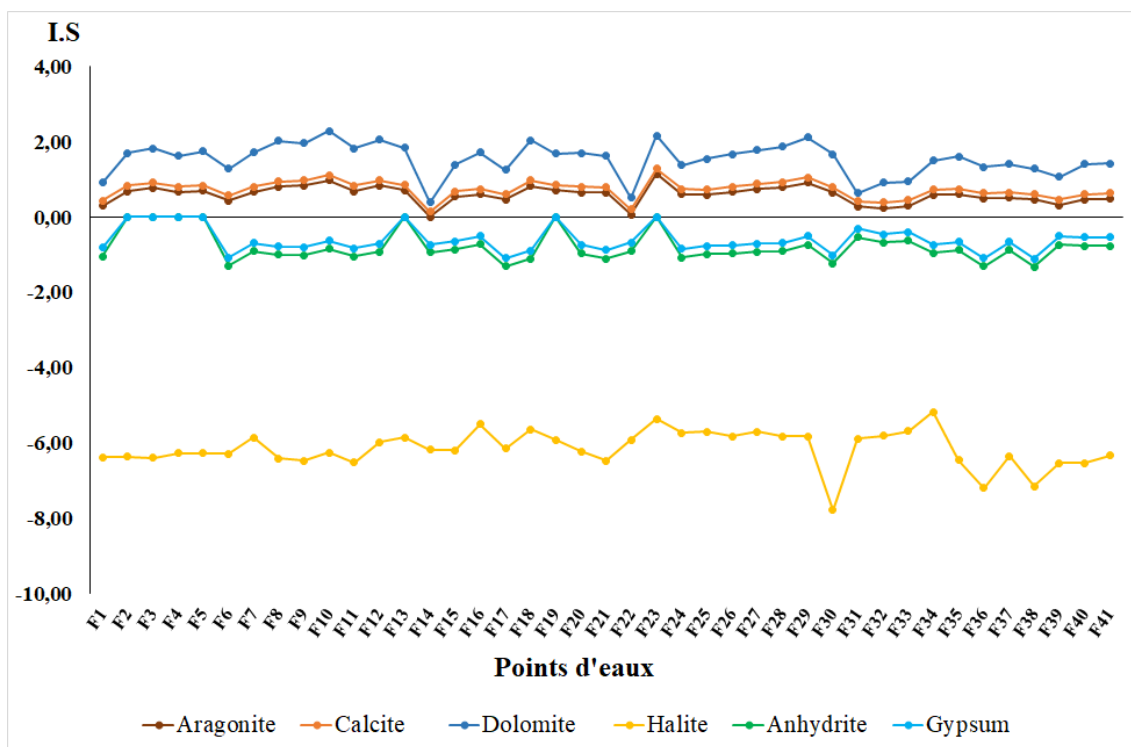


Fig n° (II-24) : Variation de l'indice de saturation des minéraux évaporitiques et carbonatés (Période 2019)

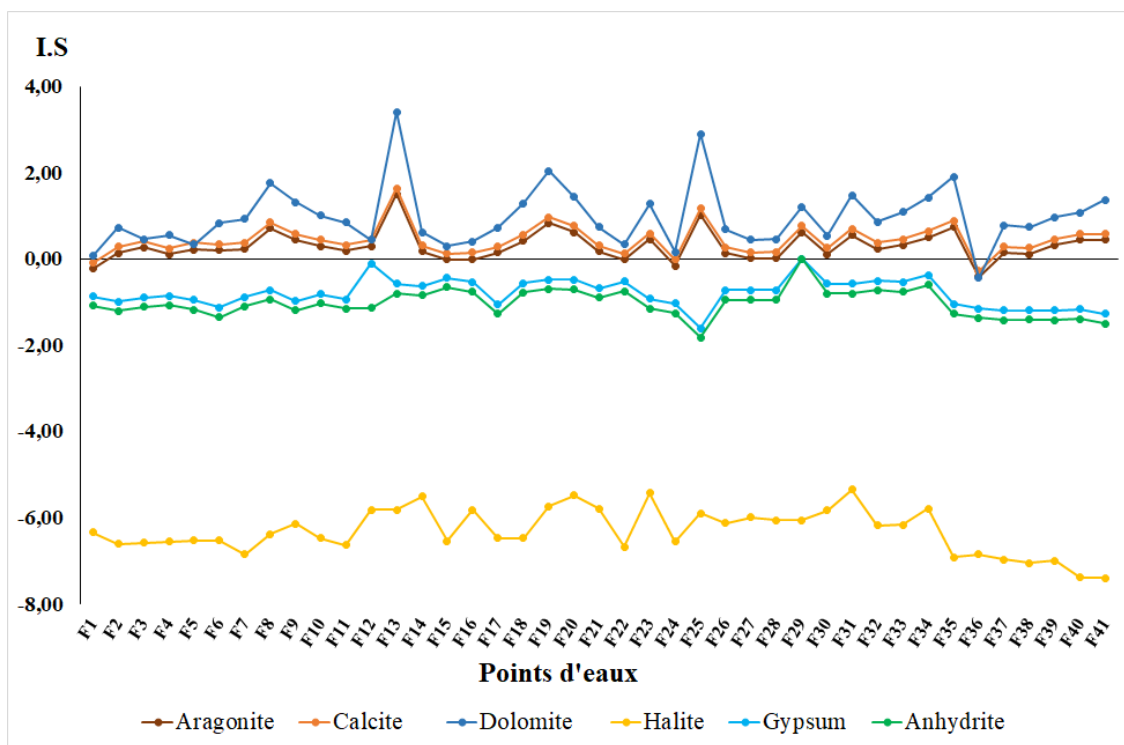


Fig n° (II-25) : Variation de l'indice de saturation des minéraux évaporitiques et carbonatés (Période 2021)

L'observation des Fig n° (II-26, II-27, II-28) montre avec que le calcium est celui qui suit à certain limite l'évolution des sulfates, alors que le magnésium et le sodium présentent des fluctuations plus ou moins différentes à celle des sulfates. Il est clair donc, que parmi les minéraux évaporitiques sulfatés, c'est bien le gypse ($\text{CaSO}_4+2\text{H}_2\text{O}$) qui caractérise la minéralisation des eaux étudiées.

Concernant les minéraux évaporitiques chlorurés, il paraît clairement Fig n° (II-29) que le sodium évolue bien avec les chlorures, les deux courbes sont presque harmoniques. On peut dire qu'en dépit des 10% que représente le faciès chloruré dans les eaux de la région, la seule source de ces deux éléments reste sans doute l'halite (NaCl).

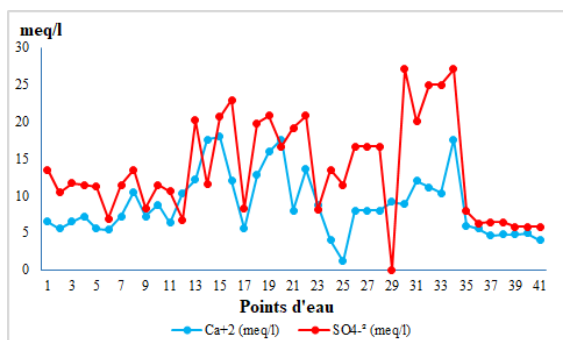


Fig n° (II-26) : $(\text{Ca}) = f(\text{SO}_4)$

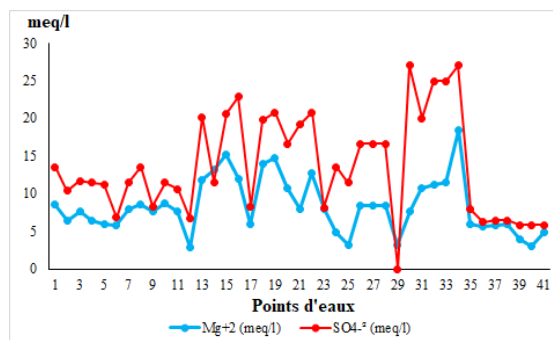


Fig n° (II-27) : $(\text{Mg}) = f(\text{SO}_4)$

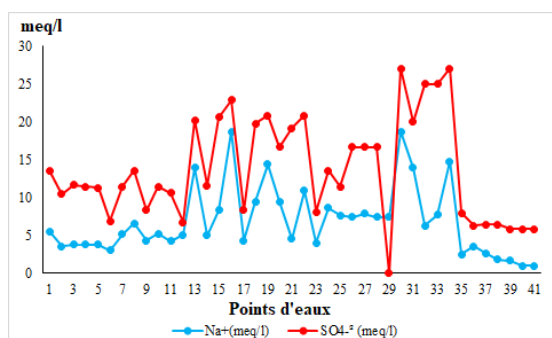


Fig n° (II-28) : $(\text{Na}) = f(\text{SO}_4)$

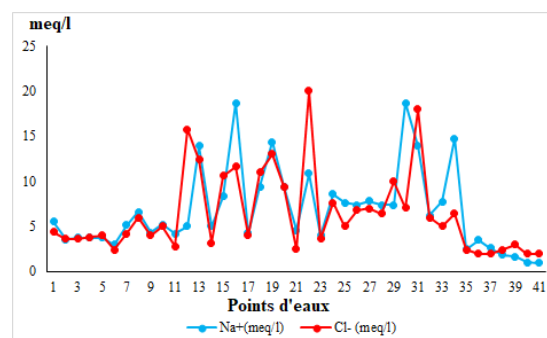
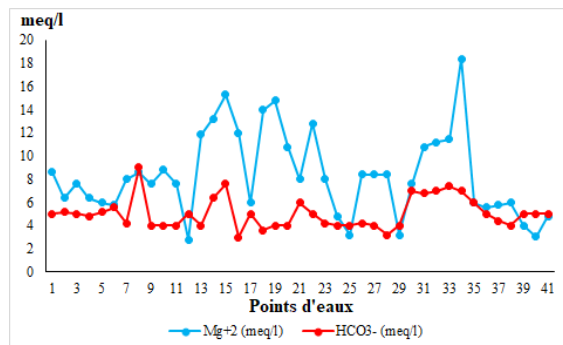
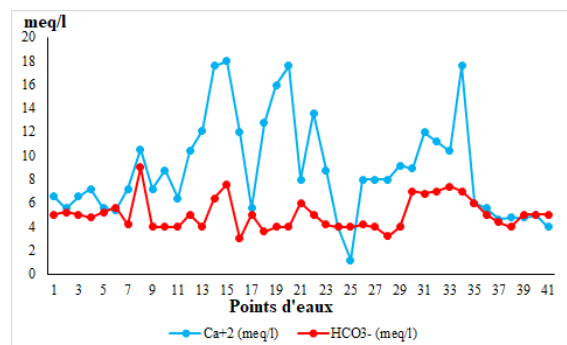


Fig n° (II-29) : $(\text{Na}) = f(\text{Cl})$

II-4-6) Origine des minéraux carbonatés :

Parmi les minéraux caractéristiques des roches carbonatés nous citons : la calcite (CaCO_3) et la dolomite ($\text{Ca Mg}(\text{CO}_3)_2$). Nous avons vérifié l'évolution des bicarbonates avec le calcium et le magnésium. Les Fig n° (II-30) et (II-31) ne montrent pas une évolution simultanée nette des bicarbonates avec les deux ions, mais on remarque un certain rapprochement commun de quelques échantillons avec le magnésium, d'où un phénomène de dolomitisation est probable.

Fig n° (II-30) : (Mg) = f (HCO₃)Fig n° (II-31) : (Ca) = f (HCO₃)

II -4-7) Analyse et discussions des résultats :

Le calcul et la représentation graphique de l'indice de saturation nous a montré que les eaux souterraines de la zone d'étude sont influencées à la fois par les minéraux des roches évaporitiques et ceux des roches carbonatées. Ces deux types de roches constituent l'essentiel des aquifères exploités dans la région. Le groupe évaporitique est dominant suite à la dissolution du gypse et de l'halite. Le groupe des eaux carbonatées issue de la dissolution des calcaires, d'où un phénomène de dolomitisation est probable.

II-5) Analyses statistiques multivariées des variables physico-chimiques :

II-5-1) L'Analyse en composantes principales (ACP) :

II-5-1-1) Principe de l'ACP :

Le principe de cette technique est qu'elle permet de résumer à quelques axes factoriels le maximum d'informations contenues dans la masse de données. La projection des individus sur un plan factoriel offre l'avantage d'appréhender la similitude ou l'opposition entre les caractéristiques des individus et les sources de leur variabilité. Le nuage des points formés par le regroupement de certains ions impose une étude bi-variable afin d'apprécier l'apport de chaque ion dans la minéralisation des eaux.

II-5-1-2) Méthodologie :

L'analyse statistique en composantes principales des résultats de mesures et analyses physicochimiques pour la campagne 201 a été réalisée avec 11 paramètres (conductivité électrique (CE), la minéralisation totale (TDS), le pH, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^-) à l'aide du logiciel XLSTAT,

II-5-1-3) Les résultats d'application de L'ACP sur des données chimiques:

a) Matrice de corrélation

Le premier résultat de l'ACP qui apparaît, est le coefficient de corrélation qui est couramment utilisé pour estimer la relation entre deux variables.

La corrélation des éléments est distinguée par une matrice carrée caractérisée selon un coefficient de corrélation entre les variables deux à deux (degré d'association entre deux variables). Les différentes corrélations entre les variables peuvent être déterminées sur la base du coefficient de corrélation significatif (critique), dans les Tab n° (II-14) et (II-15), les valeurs en gras sont différentes de 0, et ont un niveau de signification $>5\%$.

Tab n° (II-14) : Matrice de corrélation pour la période de 2019

Variables	PH	Cond	TDS	Ca^{+2}	Mg^{+2}	Na^+	K^+	Cl^-	HCO_3^-	SO_4^{2-}	NO_3^-
PH	1										
Cond	-0,432	1									
TDS	-0,444	0,975	1								
Ca^{+2}	-0,563	0,699	0,754	1							
Mg^{+2}	-0,587	0,703	0,716	0,836	1						
Na^+	0,068	0,600	0,586	0,099	0,071	1					
K^+	-0,111	0,193	0,262	0,085	0,088	0,172	1				
Cl^-	-0,260	0,600	0,687	0,589	0,410	0,334	0,118	1			
HCO_3^-	0,060	-0,192	-0,130	-0,366	-0,318	0,095	-0,079	0,006	1		
SO_4^{2-}	-0,310	0,589	0,533	0,500	0,610	0,199	0,223	0,162	-0,393	1	
NO_3^-	-0,320	0,237	0,317	0,253	0,336	0,205	-0,027	0,178	0,139	0,126	1

Tab n° (II-15) : Matrice de corrélation pour la période de 2021

Variables	PH	Cond	TDS	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻²	NO ₃ ⁻
PH	1										
Cond	-0,192	1									
TDS	-0,146	0,963	1								
Ca+2	-0,297	0,764	0,763	1							
Mg+2	-0,251	0,771	0,761	0,854	1						
Na+	0,043	0,867	0,876	0,587	0,614	1					
K+	-0,080	0,619	0,585	0,468	0,557	0,411	1				
Cl-	-0,006	0,627	0,731	0,581	0,428	0,680	0,315	1			
HCO3-	-0,335	0,298	0,281	0,287	0,253	0,051	0,285	-0,028	1		
SO4 ⁻²	-0,155	0,916	0,894	0,606	0,780	0,781	0,606	0,461	0,317	1	
NO3-	-0,137	0,148	0,093	-0,072	-0,012	0,118	0,053	-0,104	0,310	0,173	1

D'après les résultats obtenus on peut distinguer dans le Tab n° (II-16), selon les coefficients de corrélations les ensembles des couples cationiques corrélés suivants :

Tab n° (II-16) : Couples corrélés des périodes 2019 et 2021

Période	2019	2021
Ensemble des couples corrélés	Calcium : (Ca ²⁺ /Mg ²⁺) ; (Ca ²⁺ /Cl ⁻) ; (Ca ²⁺ /HCO ₃ ⁻) ; (Ca ²⁺ /SO ₄ ²⁻)	Calcium : (Ca ²⁺ /Mg ²⁺) ; (Ca ²⁺ /Na ⁺) ; (Ca ²⁺ /K ⁺) ; (Ca ²⁺ /Cl ⁻) ; (Ca ²⁺ /SO ₄ ²⁻)
	Magnésium : (Mg ²⁺ / Cl ⁻) ; (Mg ²⁺ / HCO ₃ ⁻) ; (Mg ²⁺ / SO ₄ ²⁻) ; (Mg ²⁺ / NO ₃ ⁻)	Magnésium : (Mg ²⁺ /Na ⁺) ; (Mg ²⁺ /K ⁺) ; (Mg ²⁺ /Cl ⁻)
	Sodium : (Na ⁺ / Cl ⁻)	Sodium : (Na ⁺ / K ⁺) ; (Na ⁺ / Cl ⁻) ; (Na ⁺ / SO ₄ ²⁻)
	/	Potassium : (K ⁺ / Cl ⁻) ; (K ⁺ / SO ₄ ²⁻)
	/	Chlorure : (Cl ⁻ /SO ₄ ²⁻)
	Bicarbonate : (HCO ₃ ⁻ / SO ₄ ²⁻)	Bicarbonate : (HCO ₃ ⁻ / SO ₄ ²⁻) ; (HCO ₃ ⁻ / NO ₃ ⁻)

La disparité entre les corrélations de la matrice des deux campagnes de mesures 2019 et 2021 peut-être due à la solubilité des sels minéraux et la dilution durant les périodes des hautes et basses eaux et les périodes sèches et humides, surtout avec les fluctuations des températures et des précipitations causer par le phénomène de changement climatique qui a connu la région pendant les dernières années, et son influence sur le climat.

L'Analyse du cercle de corrélation de la période 2019 (Fig n° (II-32)) montre que la corrélation des variables étudiés avec les variables synthétiques (les axes factoriels F1 et F2) est moyennement faible, mais présente des corrélations fortes entre certains groupes de variables à savoir :

- Corrélation positif forte entre le groupe (Ca^{2+} , Mg^{2+} et SO_4^{2-}) avec l'axe factoriel F1, ceci indique l'origine commune de ces ions.
- Corrélation positif forte entre le groupe (K^+ , NO_3^- et Cl^-) avec l'axe factoriel F1, ceci indique qu'il y a une probabilité que les chlorures et les nitrates ont une origine d'activités anthropiques telles que l'épandage des engrais agricoles.
- Corrélation positif faible entre les variables (Na^+ , HCO_3^-) avec l'axe factoriel F2, ceci indique une probabilité qu'il y a une réaction chimique liant ces deux ions.

L'Analyse du cercle de corrélation de la période 2021 (Fig n° (II-33)) montre que les valeurs de la CE et le TDS présentent une grande corrélation positive (de 0,619 à 0,963) avec le groupe des ions (SO_4^{2-} , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ , Cl^- , K^+) sur l'axe factoriel F1, ceci traduit la participation de ces éléments à l'acquisition la charge saline des eaux souterraines.

L'axe factoriel F1 représente 53,91 % de la variance dans l'ensemble de données, ce dernier se rapporte essentiellement à la plupart de la minéralisation des eaux souterraines, car il est corrélé avec la plupart des éléments, la contribution du potassium dans la salinité est négligeable par rapport à celle des autres éléments, alors que la relation faible avec les bicarbonates indique que ces derniers n'ont pas le rôle déterminant dans la minéralisation. La corrélation positive forte entre les ions SO_4 , Ca, Mg, ainsi que la corrélation positive entre Na et Cl confirme la dissolution du gypse et de l'halite simultanément.

Le second facteur F2 représente 14,31 % de la variance des données, il représente le pôle des bicarbonates. Le plan F1-F2 représente ainsi 68,22% de la variance totale. Il est par conséquent suffisamment représentatif de la variabilité des données.

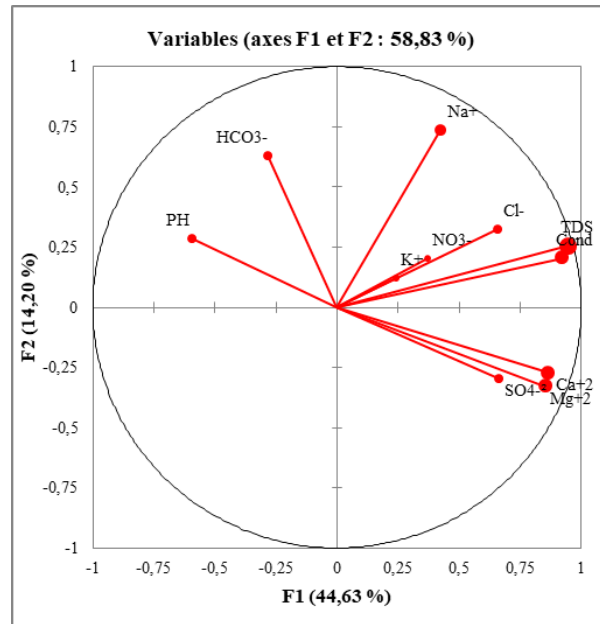


Fig n° (II-32) : Cercle de corrélation des variables sur le plan (F1 et F2) de la période 2019

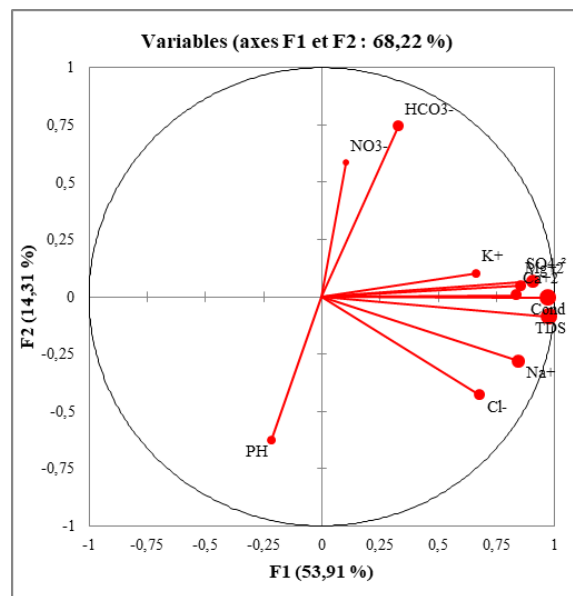


Fig n° (II-33) : Cercle de corrélation des variables sur le plan (F1 et F2) de la période 2021

b) Etudes des individus (Observations) :

D'après les Fig n° (II-34) et (II-35), la répartition des individus sur le plan factoriel (F1, F2) a permis d'identifier les groupes suivants :

Pour la période 2019 :

- Un groupe G1 qui regroupe 05 forages et représente ceux qui sont majoritairement minéralisés par les chlorures, avec des concentrations faibles en potassium et les nitrates.
- Un groupe G2 qui regroupe 10 forages et représente ceux qui comportent des teneurs plus ou moins élevées en sodiums, et les bicarbonates.
- Un groupe G3 qui regroupe 18 forages et représente ceux qui comportent des teneurs en minéraux modérées équilibrées et qui ont subi des dilutions pendant les fluctuations des hautes eaux.
- Un groupe G4 qui regroupe 08 forages et représente ceux qui comportent des teneurs en minéraux riches en calcium, magnésium et les sulfates.

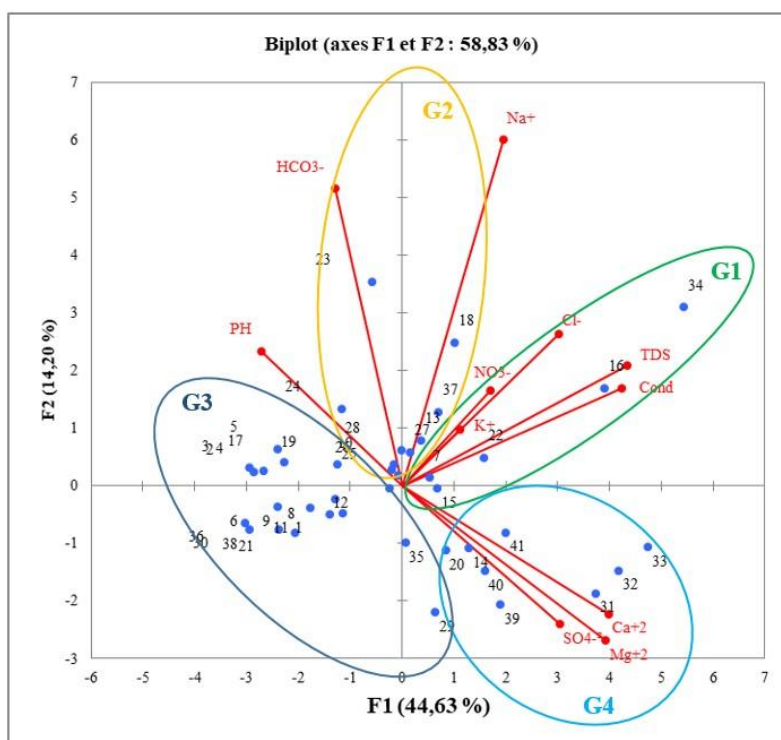


Fig n° (II-34) : Répartition des individus sur le plan (F1 et F2) de la période 2019

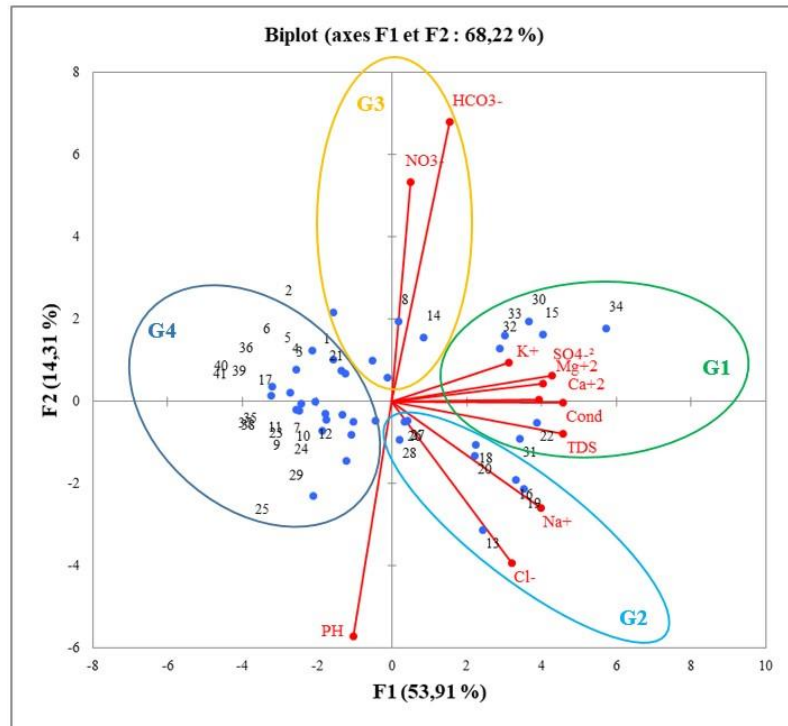


Fig n° (II-35) : Répartition des individus sur le plan (F1 et F2) de la période 2021

Pour la période 2021 :

- Un groupe G1 qui regroupe 05 forages et représente ceux qui sont majoritairement minéralisés par les chlorures, avec des faibles concentrations en les nitrates.
- Un groupe G2 qui regroupe 09 forages il représente le pôle des bicarbonates et du sodium.
- Un groupe G3 qui regroupe 19 forages et qui représente les forages de minéralisation modérée, et plus ou moins équilibrée, et celles qui ont subies des dilutions pendant les fluctuations des hautes eaux.
- Un groupe G3 qui regroupe 08 forages et qui représente les forages qui comportent des teneurs en minéraux riches en calcium, magnésium et les sulfates.

II-5-2) L'analyse par la méthode de classification ascendante hiérarchique (CAH) :**II-5-2-1) Principe de la (CAH) :**

La classification ascendante hiérarchique (CAH) est une méthode de classification itérative dont le principe est simple, on commence par le calcul de la dis-similarité des (N) objets, puis on regroupe les deux objets dont le groupement minimise un critère d'agrégation donné, créant ainsi une classe comprenant ces deux objets.

On calcule ensuite la dis-similarité entre cette classe et les N-2 autres objets en utilisant le critère d'agrégation. Puis on regroupe les deux objets ou classe d'objets dont le regroupement minimise le critère d'agrégation.

On continue ainsi jusqu'à ce que tous les objets soient regroupés, ces regroupements successifs produisent un arbre binaire de classification (dendrogramme), dont la racine correspond à la classe regroupant l'ensemble des individus. Ce dendrogramme représente une hiérarchie des partitions. On peut alors choisir une partition en tronquant d'arbre à un niveau donné, le niveau dépendant soit des contraintes de l'utilisateur, soit des critères de plus objectifs.

II-5-2-2) Avantages de la classification ascendante hiérarchique :

La méthode de classification hiérarchique (CAH) porte les avantages suivants :

- On travaille à partir des dis-similarités entre les objets que l'on veut regrouper, donc on peut choisir un type de dis-similarité adapté au sujet étudié et à la nature des données.
- L'un des résultats est le dendrogramme, qui permet de visualiser le regroupement progressif des données, on peut alors se faire une idée d'un nombre adéquat de classe dans les quelles les données peuvent être regroupées.

II-5-2-3) Les résultats d'application de la CAH sur des données chimiques:

Un schéma (dendrogramme) de classification est élaboré en mesurant la distance euclidienne (distance en ligne droite entre deux points dans l'espace c-dimensions défini par des variables c) pour la mesure de similarité, produit les groupes les plus distinctifs où chaque membre dans le groupe est plus similaire à ses membres que tout membre en dehors du groupe.

L'analyse de faisceau du dendrogramme a été employée pour déterminer si les échantillons peuvent être groupés dans les groupes hydro-chimiques statistiquement distincts qui peuvent être significatifs dans le contexte géologique.

Les comparaisons basées sur des paramètres multiples de différents échantillons ont été faites et les échantillons ont été groupés en fonction de leur 'similitude' entre eux.

Les huit variables hydro-chimiques mesurées pour chaque période (Ca, Mg, K, Na, HCO₃, Cl, SO₄ et NO₃) ont été classées en CAH et le résultat est présenté comme des dendrogrammes (Fig n° (II-36) et (II-37)).

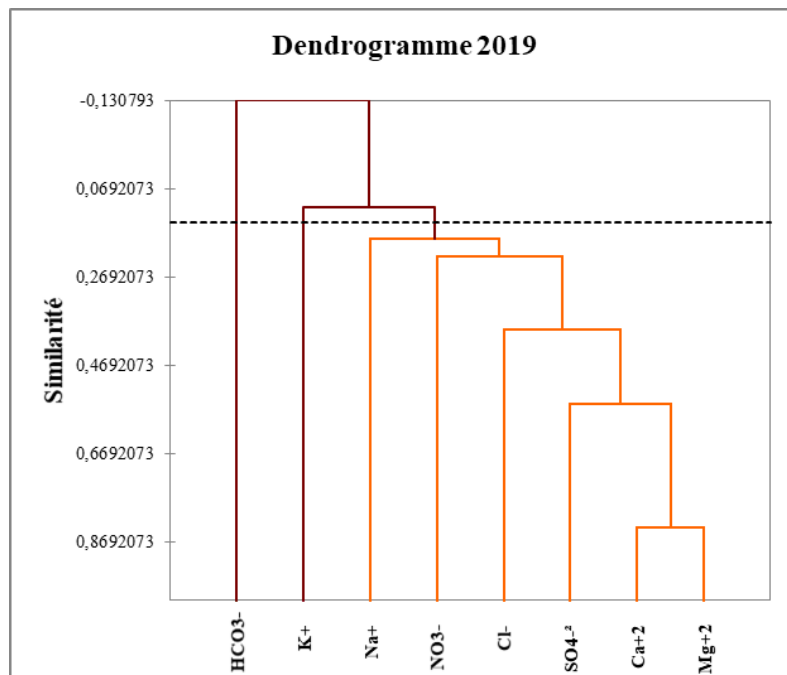


Fig n° (II-36) :Dendrogramme de l'analyse de faisceau hiérarchique (Q-mode) de la période 2019

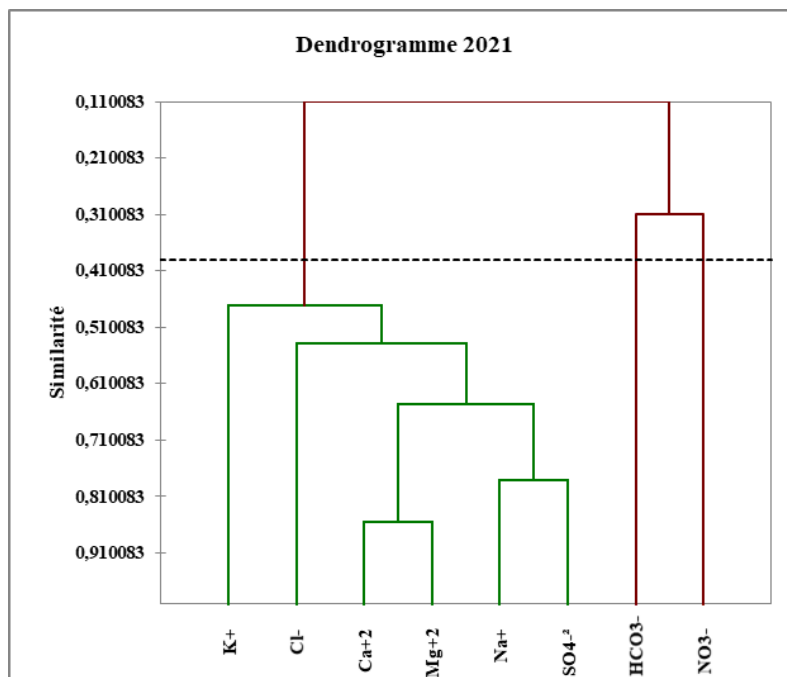


Fig n° (II-37) :Dendrogramme de l'analyse de faisceau hiérarchique (Q-mode) de la période 2021

Pour la période 2019 :

Cette analyse de groupement montre trois groupes d'eau souterraine comme le montre le dendrogramme Fig n° (II-36). Le groupe G1 formé par la (K^+ , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , SO_4^{2-}), il représente le groupe des minéraux d'origine évaporitique. Le groupe G2 formé par le NO_3^- qui caractérise les eaux polluées par les nitrates, et le groupe G3 qui comporte le HCO_3^- et qui représente le pôle des eaux carbonatés.

Pour la période 2021 :

Cette analyse de groupement montre trois groupes d'eau souterraine comme le montre le dendrogramme Fig n° (II-37). Le groupe G1 formé par le NO_3^- et représente ceux qui comportent des teneurs en nitrates, Le groupe G2 formé par le HCO_3^- et représente ceux qui sont caractérisé par des teneurs en minéraux d'origine carbonatés, le groupe G3, semble être le facteur majeur de distinction entre les groupes et représente ceux qui comporte le reste des ions à savoir (Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , et K^+).

II-6) Conclusion

Basés sur les valeurs des paramètres statistiques des échantillons, on peut classés la présence des ions dans les eaux analysés dans l'ordre décroissant suivant :

- Les anions : $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$,
- Les cations : $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$;

La comparaison des cartes d'analyses spatiales entre 2019 et 2021, montrent une augmentation des concentrations de certains ions, dans le sens de répartition de Sud vers le Nord et de l'Ouest vers l'Est.

Les faciès chimiques des eaux de forages analysés se regroupent en une seule famille dominante qui est le chlorurée sulfatée calcique et magnésien pour les deux périodes 2019 et 2021.

On se basant sur l'analyse multivariée de la période 2021, on peut déduire que les variables chimiques et les valeurs propres pour les deux premières composantes principales F1 et F2 peuvent être utilisés pour évaluer le processus hydrogéochemie dominant, la corrélation des variables montre l'existence de deux associations :

La première constituée de Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , K^+ , Na^+ et Cl^- ainsi que le TDS et la CE, cette association montre que les eaux sont influencées par une lithologie constituée des évaporites suite à la dissolution du gypse et de l'halite. La charge positive élevé de Ca^{2+} est un indicateur de l'existence des roches calcaires et par la suite la précipitation des minéraux de calcite. La charge positive des ions K^+ peut être la source de l'altération des minéraux de feldspath.

La deuxième est composée de HCO_3^- et NO_3^- : cette association est corrélée positivement avec le facteur F2. Elle représente les eaux fortement influencées par la précipitation de la dolomite, tandis que l'origine des nitrates est due à l'activité agricole dans la région.

Ces résultats ont été confirmés par l'analyse de la classification ascendante hiérarchique.

Chapitre III :
Indice de la qualité des eaux souterraines

III -1) Introduction :

L'indice de qualité de l'eau est l'un des outils les plus efficaces pour s'informer et évaluer la qualité de l'eau souterraines, il a été appliqué dans les dernières années en raison de son utilité à la compréhension des problèmes de qualité de l'eau en intégrant des données complexes et de générer un score qui décrit l'état de la qualité de l'eau (Cherif, Rachid et al. 2020).

III -2) Définition de l'indice de qualité des eaux souterraines (IQES) :

L'indice de la qualité des eaux souterraines (IQES) est défini comme une technique d'évaluation qui fournit l'influence de paramètre individuel de la qualité de l'eau sur la qualité globale de l'eau. Elle est calculée à partir du point de vue de la consommation humaine. L'indice de qualité des eaux souterraines visent à donner une valeur unique à la qualité d'une eau. On peut alors comparer les différents échantillons de la qualité sur la base de la valeur d'index de chaque échantillon.

Avec l'indice de qualité de l'eau, nous pouvons obtenir un nombre qui exprime la qualité globale de l'eau, en fonction de plusieurs paramètres de qualité, Pour déterminer la potabilité des eaux souterraines, l'indice de qualité de l'eau a été calculé à l'aide de la formule suivante :

$$IQES = \frac{\sum_{i=1}^n q_i \cdot w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \dots\dots\dots (Cherif, Rachid et al. 2020).$$

Où, W_i est un facteur de pondération calculé en utilisant l'équation ;

$$W_i = \frac{K}{S_i} \dots\dots\dots (Cherif, Rachid et al. 2020).$$

Où, S_i : Valeur normale du paramètre de qualité de l'eau i , pour notre étude se sont les normes et limites citées dans le **Décret exécutif Algérien n° 11-125** relatif à la qualité de l'eau de consommation humaine.

K : est une constante de proportionnalité, qui est considérée comme 1,0, n est le nombre total de paramètres de qualité de l'eau. L'indice d'évaluation de la qualité de chaque paramètre utilisé (q_i) est calculé par la formule ;

$$q_i = [(V_a - V_i)/(S_i - V_i)] \cdot 100 \dots\dots\dots (Cherif, Rachid et al. 2020).$$

Où, q_i : l'indice d'évaluation de qualité pour le paramètre de qualité de l'eau i ,

V_a : Valeur réelle du paramètre de qualité de l'eau i -ème obtenue à partir de l'analyse en laboratoire,

V_i : Valeur idéale du paramètre de qualité de l'eau i -ème obtenue à partir des tableaux standards, (V_i pour pH = 7 et pour les autres paramètres est équivalent à zéro).

Les valeurs de S_i, V_i et W_i sont données par le Tab n° (III-02).

III -3) Méthode de calcul de l'indice de qualité des eaux souterraines (IQES) :

Pour le calcul de l'indice de qualité de l'eau, nous avons utilisé les paramètres chimiques des 41 forages d'eaux de la zone d'étude pour la période de 2021. Les paramètres utilisés sont le; (pH, CE en/cm, TDS, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , HCO_3^- , NO_3^- , SO_4^-), la première étape dans la détermination de IQES consiste à calculer le facteur de pondération de chaque paramètre analysé, l'indice d'évaluation q_i est calculé sur la base des valeurs d'analysés faites dans le laboratoire pour chaque paramètre. Une fois le W_i et le q_i sont déterminés l'indice de la qualité des eaux souterraine est calculé par la formule, une classification sera faite suivant le Tab n° (III-01) :

Tab n° (III-01) : Statut de la qualité de l'eau basée sur IQES

Classes	Indice de qualité	Définition de la classe de qualité
01	0-25	Excellente qualité
02	26-50	Bonne qualité
03	51-75	Qualité pauvre
04	76-100	Très pauvre qualité
05	>100	Impropre à la consommation

Tab n° (III-02) : paramètres de qualité d'eau, valeurs standard, les valeurs idéales et facteurs de poids de l'eau.

Paramètres	Valeurs standards (Si)	Valeurs Idéal (Vi)	Poids relatif (Wi)
pH	9	7	0,111
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	2800	0	0,0004
TDS (mg/l)	1500	0	0,00067
Cl^- (mg/l)	500	0	0,002
SO_4^- (mg/l)	400	0	0,0025
Ca_2^+ (mg/l)	200	0	0,005
Na^+ (mg/l)	200	0	0,005
K^+ (mg/l)	12	0	0,0833
Mg_2^+ (mg/l)	50	0	0,02
HCO_3^- (mg/l)	400	0	0,0025
NO_3^- (mg/l)	50	0	0,02
Total			0,25237

L'analyse des résultats nous a fournis les information suivantes (Fig n° (III-01)) :

- 2,43 % des points d'eaux analysés (soit 01 points sur 41) présentent une qualité excellente à la consommation avec IQES =16,15 (celui du forage n°36 :Forage F 315/168 (S-P Djorf)).
- 56,10% des points d'eaux analysés (soit 23 points sur 41) présentent une bonne qualité à la consommation, les résultats sont logés dans le Tab n° (III-03) :

Tab n° (III-03) :L'indice de qualité pour la deuxième classe.

N°	Désignation de l'ouvrage	IQES	Classe	Qualité
F1	Forage F 256/168 Bis (S-P Khebab)	41,81	De 26 à 50	Bonne qualité
F3	Forage 224 Bis (S-P Khebab)	49,08		
F4	Forage 331/168 (Khebab 01) (S-P Khebab)	42,10		
F5	Forage 310 Bis (S-P Khebab)	45,80		
F6	Forage M04/14 (S-P Khebab)	42,81		
F7	Forage 250/168 bis (S-P Mezrir 01)	42,24		
F8	Forage 278/168 Bis (S-P Mezrir 01)	49,79		
F9	Forage 249/168 Bis (S-P Mezrir 01)	43,42		
F10	Forage 268/168 Bis (S-P Mezrir 01)	44,37		
F11	Forage F 311/168 (S-P Mezrir 01)	40,55		
F12	Forage M01/14 (S-P Mezrir 02)	30,61		
F14	Forage 255/168 Bis (Guerfala)	40,96		
F17	Forage 333/168 (Sidi Amara)	32,45		
F21	Forage Termount03 (S-P Lougmane)	37,34		
F23	Forage M'sila02 (Vers Douar Ghozal)	42,68		
F24	Forge Laamarate	34,03		
F29	Forage Feriha 03	49,33		
F35	Forage O-Derradj 01 Bis (Remplace F 213) (S-P Djorf)	41,29		
F37	Forage 321/168 (Renforcement 2) (S-P Djorf)	40,71		
F38	Forage Ouled Ben Saoucha (S-P Djorf)	45,60		
F39	Forage OuledDerradj 01	45,61		
F40	Forage OuledDerradj 02	37,13		
F41	Forage OuledDerradj 03	38,66		

- 29,27% (soit 12 points sur 41) présentent des qualités pauvres à la consommation humaine, les résultats sont logés dans le Tab n° (III-04) :

Tab n° (III-04) : L'indice de qualité pour la troisième classe

N°	Désignation de l'ouvrage	IQES	Classe	Qualité
F2	Forage 267/168 (F05 Bis) (S-P Khebab)	52,16	De 51 à 75	Qualité pauvre
F15	Forage 279/168 (Boukhmissa)	62,42		
F16	Forage 335/168 (Ghozal Bis)	51,34		
F18	Forage 328/168 (Lechiakh)	71,12		
F20	Forage Lougmane 01 Bis (S-P Lougmane)	64,86		
F22	Forage Lougmane (APC) (S-P Lougmane)	64,85		
F26	Forage Sidi Laoubi	56,06		
F27	Forage Feriha 01	55,05		
F28	Forage Feriha 02	55,03		
F30	Forage Haourane III (D'bil)	60,00		
F31	Forage OuledHaless 03	64,45		
F32	Forage Ouled Moussa 01	74,44		

- 9,76% (soit 4 points sur 41) présentent des qualités très pauvres à la consommation humaine, les résultats sont logés dans le Tab n° (III-05):

Tab n° (III-05) : L'indice de qualité pour la quatrième classe

N°	Désignation de l'ouvrage	IQES	Classe	Qualité
F13	Forage 283/168 bis (S-P Mezrir 02)	85,59	De 76 à 100	Très pauvre qualité
F19	Forage Lougmane 03 (Dokkara) (S-P Lougmane)	84,62		
F25	Forage El Guassia	85,92		
F33	Forage Ouled Moussa 02	79,39		

- 2,44% (soit 01 points sur 41) présentent une qualité impropre à la consommation, avec IQES =112,17 (celui du forage n°34 (Forage ferkoussa)).
- En général près de 60% des points d'eau analysés sont classés comme consommable.

Le Tab n° (III-06) donne l'état récapitulatif sur la qualité des eaux souterraines dans la zone d'étude.

Tab n° (III-06):Etat récapitulatif de la qualité des eaux souterraines

Classes (IQES)	Qualité Attribuée	de Nombre points	%
0 -25	Excellentes qualité	1	2,43 %
26 - 50	Bonne qualité	23	56,10%
51 – 75	Qualité pauvre	12	29,27%
76 - 100	Très pauvre qualité	4	9,76%
> 100	Impropres à la consommation	1	2,44%

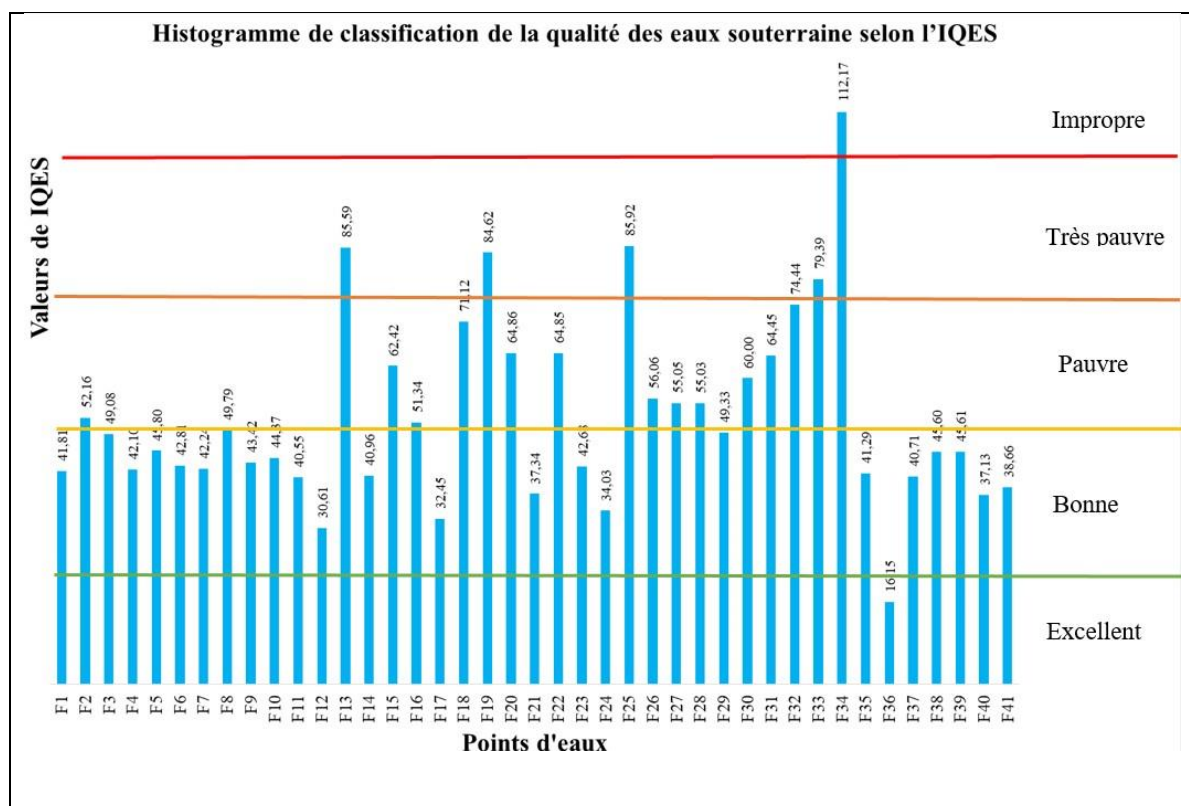


Fig n° (III-01) : Histogramme de classification de la qualité des eaux

III -4) carte de répartition spatiale de l'indice de qualité des eaux souterraine IQES de la période 2021

L'indice de la qualité des eaux souterraines(IQES) a été formulé à partir d'une formule basé sur 08 éléments chimiques cationiques et anioniques, ainsi que les pH, CE et TDS. Une classification cartographique par le biais de l'outil géostatistique (interpolation par Krigeage ordinaire comme indique la Fig n° (III-02)), a montré que la partie aval (sud-est) de la région d'étude est affectée par une excellente a bonne qualité d'eau ce qui présente près de60% des points analysés sur l'ensemble de 41 échantillons disponible pour la

période 2021, mais cette qualité ne représente que 31% de la surface totale de la zone étudiée (soit 373,5 km²/1211 km²). Alors que plus de 40 % sont classés dans la case du pauvre à très pauvre qualité d'eau. Donc la région de Sud-Est (une partie des communes de M'sila, Chellal et Ouled derradj) est la zone la plus prometteuse à l'exploitation des eaux souterraines ainsi qu'une partie de du centre de la plaine Nord-Ouest de la commune de M'sila.

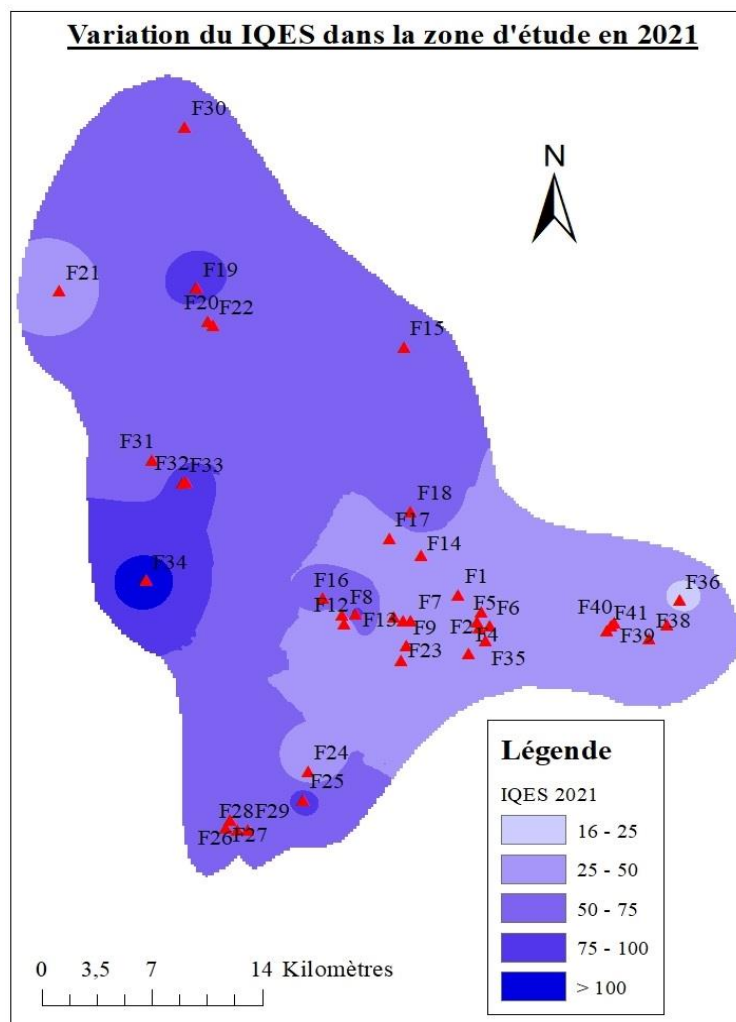


Fig n° (III-02) :Répartition spatiale de l'IQES en 2021

III -5) Conclusion :

Le calcul de l'indice de la qualité des eaux souterraines, et son représentation spatiotemporelle ont montré que la partie aval (Sud-Est) de la région d'étude est caractérisée par une excellente à bonne qualité d'eau, la qualité se diminue de l'aval vers l'amont, un forage est classé comme impropre à la consommation humaine, c'est celui du forage n°34 (Forage ferkoussa) situé dans la région d'Ouled Mansour.

Conclusion générale :

Tout au long de son cycle, l'eau est soumise à des processus successifs qui modifient sa composition chimique et affecte ainsi sa qualité. Les processus hydrogéochimiques sont généralement contrôlés ou influencés par différents facteurs tels que la dissolution de certains minéraux présents dans les roches et dans les sols, l'infiltration et l'écoulement de l'eau dans l'aquifère, et la salinisation des eaux lorsque l'eau souterraine est en contact prolongé avec des argiles. Plus le temps de séjour de l'eau dans un aquifère est long et plus elle atteint des couches profondes, plus elle sera chargée en minéraux dissous.

Dans cette étude nous avons essayé de caractériser les eaux souterraines de la zone d'étude située au cœur de la plaine de Hodna, à partir des analyses effectuées de 41 forages d'eaux, et nous avons trouvé les résultats suivants :

L'établissement des cartes de variation spatiale des éléments chimiques major dans l'aire de la zone d'étude a permis de faire la comparaison entre les résultats obtenus pour les deux campagnes 2019 et 2021, nous avons montré qu'il y a une augmentation des concentrations de certains ions en 2021, à savoir le Na^+ , K^+ et SO_4^{2-} . Le sens de répartition de l'ensemble des ions est ascendant de Sud vers le Nord et de l'Ouest vers l'Est.

L'exactitude et le degré de précision des cartes élaborées dépend du nombre de point d'eau ou d'échantillon utilisés, leurs répartition sur la région d'étude et le choix de la méthode d'interpolation, car plus on a un nombre suffisant de points et une répartition plus ou moins homogène, plus on aura une corrélation importante et une interpolation plus exacte.

Nous avons montrés aussi que les faciès chimiques des eaux de forages analysés se regroupent en une seule famille dominante qui est le chlorurée sulfatée calcique et magnésien pour les deux périodes 2019 et 2021.

L'analyse multivariée de la période 2021 à montrer l'influence de la lithologie sur la minéralisation des eaux, ceci a été traduit par l'existence de deux associations :

La première constituée de Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , K^+ , Na^+ et Cl^- ainsi que le TDS et la CE, cette association montre que les eaux sont influencées par une lithologie constituée des évaporites suite à la dissolution du gypse et de l'halite. La charge positive élevé de Ca^{2+} est un indicateur de l'existence des roches calcaires et par la suite la précipitation des minéraux de calcite. La charge positive des ions K^+ peut être la source de l'altération des minéraux de feldspath.

La deuxième est composée de HCO_3^- et NO_3^- : cette association est corrélée positivement avec le facteur F2. Elle représente les eaux fortement influencées par la précipitation de la dolomite, tandis que l'origine des nitrates est due à l'activité agricole dans la région.

Ces résultats ont été confirmés par l'analyse de la classification ascendante hiérarchique.

Le calcul de l'indice de la qualité des eaux souterraines, et son représentation spatiotemporelle ont montré que la partie aval (Sud-Est) de la région d'étude est caractérisée par une excellente à bonne qualité d'eau, la qualité se diminue de l'aval vers

Conclusion générale

l'amont, un forage est classé comme impropre à la consommation humaine, c'est celui du forage n°34 (Forage ferkoussa) situé dans la région d'Ouled Mansour.

Références bibliographiques

Aitadjedjou, D. (2015). "Apport des méthodes du potentiel a l'étude structurale de la région du Hodna."

AMROUNE, A. (2018). Etude de l'apport hydrochimique dans la connaissance du fonctionnement de la nappe alluviale de la région nord du Hodna (Sud-Est algérien), Université de Batna 2.

Ariech, M. (2018). Contribution à l'isolement et l'identification des archéobactéries hyper halophiles du chott el hodna (M'sila).

Aubert, G. (1976). "Les sols sodiques en Afrique du Nord."

BAHACHE, S. and F. BOUTCHICHA (2020). Modélisation de nappe par l'utilisation de MODFLOW, Univ M'sila.

Bakalowicz, M. (2005). "Karst groundwater: a challenge for new resources." Hydrogeology journal **13**(1): 148-160.

BOUDJELLAL, R. and M. MAIZA (2017). Contribution à la connaissance des caractéristiques physico-chimiques des eaux d'irrigation (les eaux souterrain) de la région de M'Sila–Wilaya de M'Sila, Université Mohamed BOUDIAF de M'Sila.

Boudjemline, F. and A. Semar (2018). "Assessment and mapping of desertification sensitivity with MEDALUS model and GIS–Case study: basin of Hodna, Algeria." Journal of water and land development.

BRAHIMI, D. (2015). Etude de la Variabilité spatiale de la salinité du sol de la pépinière de M'sila M'sila Algérie, Université Mohamed BOUDIAF de M'Sila.

Chadha, D. (1999). "A proposed new diagram for geochemical classification of natural waters and interpretation of chemical data." Hydrogeology journal **7**(5): 431-439.

Cherif, K., B. Rachid, et al. (2020). "Analyse Spatiale de l'Indice de la Qualité des Eaux Souterraines de la Plaine Alluviale du Haut Chélif." Algerian Journal of Geosciences and Remote Sensing.

Chotte, J.-L., R. Duponnois, et al. (2001). "Jachère et biologie du sol en Afrique tropicale."

Cugier, P. (1999). Modelisation du devenir a moyen terme dans l'eau et le sediment des elements majeurs (n, p, si,) rejetes par la seine en baie de seine, Caen.

Despois, J. (1953). "Le Hodna (Algérie)."

Edmunds, W., P. Shand, et al. (2003). "The natural (baseline) quality of groundwater: a UK pilot study." Science of the Total Environment **310**(1-3): 25-35.

Edmunds, W. M. and P. Shand (2009). Natural groundwater quality, John Wiley & Sons.

- El-Fadel, M., M. Tomaszekiewicz, et al. (2014). "GIS-based assessment for the development of a groundwater quality index towards sustainable aquifer management." Water resources management **28**(11): 3471-3487.
- FELOUSSIA, L. and B. KHALFALLAH (2013). "RÉALITÉ URBAINE ET PLANIFICATION-CAS DU POS (HAMMAM DALAA)-M'SILA-ALGÉRIE." Analale Universitatii Bucuresti. Seria Geografie.
- Fetter, C. W. (2018). Applied hydrogeology, Waveland Press.
- Hamlat, A. and A. Guidoum (2018). "Assessment of groundwater quality in a semiarid region of Northwestern Algeria using water quality index (WQI)." Applied Water Science **8**(8): 1-13.
- Hodna, B. d., R. d'El, et al. "Contribution à l'étude de la pollution des eaux des zones humides des régions Arides d'Algérie."
- KAABECHE, M. (1990). Les groupements vegetaux de la region de bou saada (algerie); essai de synthese sur la vegetation steppique du maghreb, Paris 11.
- Kebiche, M. (1994). "Le bassin versant du Hodna (Algérie): Ressources en eau et possibilités d'aménagement." Travaux de l'Institut de Géographie de Reims **85**(1): 25-34.
- Kouassi, A. M., K. E. Ahoussi, et al. (2016). "Analyse comparative entre la distribution des fréquences de conductivité électrique et les faciès géochimiques des eaux des aquifères de socle (Côte d'Ivoire)." International Journal of Biological and Chemical Sciences **10**(1): 435-446.
- Longley, P. A., M. F. Goodchild, et al. (2005). Geographic information systems and science, John Wiley & Sons.
- Maggioni, L. A., D. Fontaneto, et al. (2009). "Evaluation of water quality and ecological system conditions through macrophytes." Desalination **246**(1-3): 190-201.
- Mebarka, B. and T. Somia (2020). Etude de variabilité spatio-temporelle des précipitations moyennes annuelles dans le bassin versant de chott El Hodna.
- MERIEEM, G. W. R. (2020). Caractéristiques physico-chimiques de l'eau potable de la région de M'sila (Dréat, Souamaa, Newara), UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA.
- Mudry, J., F. Zwahlen, et al. (2014). H2Karst Research in Limestone Hydrogeology, Springer.
- Mysiak, J., C. Giupponi, et al. (2005). "Towards the development of a decision support system for water resource management." Environmental modelling & software **20**(2): 203-214.

Nas, B. and A. Berktaç (2010). "Groundwater quality mapping in urban groundwater using GIS." Environmental monitoring and assessment **160**(1): 215-227.

Ncibi, K., N. Gaaloul, et al. (2016). "Contribution de l'analyse multivariée et des SIG pour la caractérisation hydrochimique de la nappe phréatique de la plaine de Sidi Bouzid (Tunisie centrale)/[Contribution of the multivariate analysis and the GIS for Hydrochemical characterization of phreatic aquifer to the plain of Sidi Bouzid (Central Tunisia)]." International Journal of Innovation and Applied Studies **15**(3): 667.

Nova, N. (2009). Les médias géolocalisés, FYP éditions.

Poonam, T., B. Tanushree, et al. (2013). "Water quality indices-important tools for water quality assessment: a review." International Journal of Advances in chemistry **1**(1): 15-28.

Saadia, Y., R. Nedjai, et al. (2019). "Contribution of GIS in Mineral Exploration through Mineralization Distribution Characterization: Application to The Sétifien/Hodna Massifs and The Eastern Saharan Atlas (NE Algeria)."

Sila, O. N. a. (2019). "Physico-chemical and bacteriological quality of water sources in rural settings, a case study of Kenya, Africa." Scientific African **2**: e00018.

SNOUSSI, S. A. (2000). Valorisation des eaux salines pour la nutrition minérale des plantes cultivées, INA.

SORO, G., D. NOUFE, et al. (2018). "SENSITIVITY ANALYSIS OF A GLOBAL HYDROLOGICAL MODEL TO THE ESTIMATES OF AVERAGE RAINFALL AND POTENTIAL EVAPOTRANSPIRATION: APPLICATION TO THE MARAHOUE BASIN IN COTE D'IVOIRE." LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782(33): 155-168.

TITRAOUI, I. and O. LAMANI (2020). CARACTERISATION STATISTIQUE DE LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES DE PLAINE HODNA, Univ M'sila.

Verruijt, A. (2016). Theory of groundwater flow, Macmillan International Higher Education.