

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : HYDRAULIQUE

N° : .....



DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

FILIERE : HYDRAULIQUE

OPTION : RESSOURCES HYDRAULIQUES

**Mémoire présenté pour l'obtention  
du diplôme de Master Académique**

Par: **AOUINA Samia**

et

**NEGUEZ Nawel**

**Intitulé**

**Etude de données physicochimiques des eaux  
souterraines de Hammam Dalaa – M'sila**

**Soutenu devant le jury composé de:**

Ghodbane Messaoud

Université de M'sila

Président

Merzouk Belkacem

Université de M'sila

Rapporteur

Guemache Abderezak

Université de M'sila

Examineur

**Année universitaire : 2022 / 2023**

# REMERCIEMENTS

*Nous remercions Allah le Tout Puissant de nous avoir donné la  
volonté et le courage  
afin de réaliser ce mémoire de fin d'études.*

*Nous tenons à remercier vivement notre encadreur Monsieur le  
Professeur Belkacem MERZOUK,  
d'avoir accepté de diriger ce travail et pour ses précieux conseils,  
sa générosité et ses encouragements durant le  
déroulement de ce travail.*

*Nos remerciements s'adressent à tous les membres du jury qui  
nous feront l'honneur d'examiner ce travail.*

*Nos remerciements vont également à tous les enseignants du  
Département de l'Hydraulique.*

*Nous tenons à remercier l'ensemble du Personnel de l'Algérienne  
Des Eaux (ADE) et de la Direction des Ressources en Eau (DRE) de  
la Wilaya de M'sila.*

*En fin, nous remercions toute personne ayant contribué de près  
ou de loin à l'élaboration de ce travail.*

**Aouina Samia & Neguez Nawel**

## Dédicace

Je dédie ce travail

A mes chers parents pour leur amour et sacrifice illimité.

A mon cher époux l'homme de ma vie de sa patience et son soutien.

A ma fille Leticia, que Dieu les protège.

A mes frères et soeurs pour leurs encouragements

A ma belle-mère, mes belles soeurs et mes beaux frères

A tous les membres de ma famille

A tous mes amis et mes collègues

A toutes les personnes qui m'ont soutenue de près ou de loin pour la réalisation de ce travail.

Merci à tous.

Samia

## *Dédicace*

Je dédie ce travail....

A mes chers parents, en qui j'ai trouvé le soutien immense dans les études et la vie, espérant que ce travail soit pour eux le témoignage

De ma profonde affection et mon grand respect ;

A Tous mes chers frères et chères sœurs ;

A Mes enseignants ;

A tous mes amis et mes collègues ;

A toutes les personnes qui m'ont soutenue de près ou de loin pour la réalisation de ce travail.

Mille merci .....

**NAWEL**

## **Résumé**

L'objectif principal de cette étude est d'essayer de discuter de la qualité des eaux souterraines et de leur aptitude à la consommation humaine et de proposer des techniques pour les rendre plus adaptées aux besoins humains afin d'éviter les problèmes de santé causés par une mauvaise qualité de l'eau.

Les ressources en eau en Algérie ont connu une exploitation spectaculaire ces dernières années, notamment les eaux souterraines qui sont considérées comme la principale ressource de la région du Chott El Hodna. Cette étude porte sur la qualité des eaux de six forages destinées à la consommation humaine de Hammam Dalaa durant la campagne 2019 - 2022. Globalement, la qualité de ces eaux est mauvaise, avec des TH > 50 °F et des teneurs en sulfates très élevées.

L'utilisation de graphiques chimiques (Piper, Schöeller-Berkaloff) et l'application d'analyses statistiques, telles que, l'Analyse en Composantes Principales (ACP), la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) et l'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) à l'aide du logiciel statistique XLSTAT (2014) ont montré que le bicarbonate de calcium et le sulfate de calcium sont dominants en raison de la nature géologique de la zone contenant du gypse et du calcaire.

***Mots clés :** Eaux souterraines, Hydrochimie, Hammam Dalaa, Méthodes statistiques.*

## **Abstract**

The main objective of this study is to try to discuss the quality of groundwater and its suitability for human consumption, and to propose techniques to make it more suitable for human needs in order to avoid health problems caused by poor water quality.

Water resources in Algeria have undergone spectacular exploitation in recent years, especially groundwater, which is considered the main resource of the Chott El Hodna region. This study focuses on the quality of water from six drillings intended for human consumption in Hammam Dalaa during the 2019 - 2022 campaign. Overall, the quality of this water is poor, with TH > 50°F and very high sulfate levels.

The use of chemical graphs (Piper, Schöeller-Berkaloff) and the application of statistical analyses (PCA, CAH, AFC) using the statistical program (XLSTAT 2014) showed that calcium bicarbonate and calcium sulfate are dominant due to the geological nature of the area containing gypsum and limestone.

***Keywords:** Groundwater, Hydrochemistry, Hammam Dalaa, Statistical methods.*

## ملخص

الهدف الأساسي من هذه الدراسة هو محاولة مناقشة نوعية المياه الجوفية ومدى صلاحيتها للاستهلاك البشري واقتراح تقنيات لجعلها أكثر تناسبا مع الحاجيات البشرية لتفادي المشاكل الصحية التي تسببها رداءة نوعية المياه.

الموارد المائية في الجزائر تعرف استغلالا مدهلا في السنوات الأخيرة وخصوصا المياه الجوفية التي تعتبر المورد الأساسي في منطقة شط الحضنة. هذه الدراسة التي تتناول نوعية المياه الجوفية وخصائصها الفيزيائية والكيميائية في منطقة حمام الضلعة والتي تم الحصول عليها من طرف وكالة الجزائرية للمياه وحدة المسيلة وذلك في الفترة الممتدة بين 2018 و 2022.

وهنا نلاحظ أن مياه المنطقة تتميز بكونها سيئة نوعا ما في معظم الآبار لاحتوائها على نسبة عالية من القساوة والسلفات.

أظهر استخدام الرسوم البيانية الكيميائية (بايير، شولر- بيركالوف) وتطبيق التحليلات الإحصائية (ACP، CAH، AFC) باستخدام البرنامج الإحصائي (XLSTAT 2014) أن بيكربونات الكالسيوم وسلفات الكالسيوم هي السائدة نظرا للطبيعة الجيولوجية للمنطقة التي تحتوي على الجبس والحجر الجيري.

*الكلمات المفتاحية: المياه الجوفية، الكيمياء المائية، حمام الضلعة، الطرق الإحصائية.*

# Liste des tableaux

## LISTE DES TABLEAUX

<b>N° du Tableau</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
Tableau I.1	Moyennes mensuelles et extrêmes des températures en °C (2006-2016)	03
Tableau I.2	Précipitations moyennes mensuelles en mm pendant la période (2006-2016) de la zone de Hammam Dalaa	04
Tableau I.3	Nombre de puits de la commune de Hammam Dalaa	05
Tableau I.4	Ouvrages de stockage des eaux de la commune Hammam Dalaa	05
Tableau I.5	Evaluation de la population de Dammam Dalaa à entre 1987 et 2008	05
Tableau I.6	Densité de la Population de la commune de Hammam Dalaa	05
Tableau I.7	Répartition de la Population selon le Sexe dans la commune de Hammam Dalaa	06
Tableau I.8	Paramètres géométriques du sous bassin versant	08
Tableau I.9	Répartition des différentes tranches d'altitude	08
Tableau I.10	Classification de l'ORSTOM	11
Tableau I.11	Principales caractéristiques morphométriques du bassin étudié	13
Tableau II.1	Inventaire et caractéristiques des points d'eau	18
Tableau II.2	Teneurs des ions majeurs des eaux des forages étudiés	19
Tableau III.1	Résultats du calcul de la balance ionique des eaux souterraines de de la zone d'étude	21
Tableau III.2	Potabilité des eaux souterraines de la zone d'étude	36
Tableau III.3	Résultats statistiques des variables physicochimiques des eaux souterraines de la zone d'étude	37
Tableau III.4	Matrice de corrélation entre les paramètres chimiques des eaux souterraines de la zone d'étude	38
Tableau III.5	Valeurs propres des axes et leurs contributions	39
Tableau III.6	Corrélation entre les variables et les facteurs	40
Tableau III.7	Nœuds successifs du dendrogramme	43
Tableau III.8	Barycentres des classes	45

# Liste des figures

## LISTE DES FIGURES

N° de la figure	Titre	Page
Fig. I.1	Localisation géographique de la zone d'étude	02
Fig. I.2	Moyennes mensuelles et extrêmes des températures moyennes en °C enregistrées	03
Fig. I.3	Précipitations moyennes mensuelles en mm pendant la période (2006-2016) de la commune de Hammam Dalaa	04
Fig. I.4	Périmètre et surface du bassin versant Hammam Dalaa	06
Fig. I.5	Courbe hypsométrique du bassin versant	08
Fig. I.6	Carte des tranches d'altitudes du bassin	09
Fig. I.7	Réseau hydrographique de la zone d'étude	12
Fig. II.1	Carte géologique de la région du Hodna	15
Fig. II.2	Carte pédologique de la zone du Hodna	16
Fig. II.3	Colonne stratigraphique synthétique du Bassin du Hodna	17
Fig. II.4	Carte de positionnement des forages étudiés	19
Fig. III.1	Corrélation entre les cations et les anions	21
Fig. III.2	Carte isovaleurs du TH	22
Fig. III.3	Carte isovaleurs du pH	23
Fig. III.4	Carte isovaleurs de la conductivité	23
Fig. III.5	Carte isovaleurs des températures	24
Fig. III.6	Carte isovaleurs du TAC	25
Fig. III.7	Carte isovaleurs des bicarbonates $\text{HCO}_3^-$	25
Fig. III.8	Carte isoteneurs des $\text{Cl}^-$	26
Fig. III.9	Carte isoteneurs des $\text{NO}_3^-$	27
Fig. III.10	Carte isoteneurs des $\text{SO}_4^{2-}$	27
Fig. III.11	Carte isoteneurs du $\text{Ca}^{2+}$	28

Fig. III.12	Carte isoteneurs du $Mg^{2+}$	29
Fig. III.13	Carte isoteneurs du $Na^+$	30
Fig. III.14	Carte isoteneurs du $K^+$	30
Fig. III.15	Carte isovaleurs de la turbidité	31
Fig. III.16	Carte isovaleurs de la salinité	32
Fig. III.17	Diagramme de Schöeller-Berkaloff	33
Fig. III.18	Classification des eaux pour l'irrigation selon la méthode de Riverside	34
Fig. III.19	Diagramme de Piper	35
Fig. III.20	Valeurs propres des axes et leurs contributions	39
Fig. III.21	Cercle de corrélation des variables sur le plan factoriel (F1 et F2)	40
Fig. III.22	Projection des individus sur le plan factoriel (F1-F2)	41
Fig. III.23	Diagramme des niveaux	43
Fig. III.24	Hiérarchie des partitions obtenues par CAH	44
Fig. III.25	Hiérarchie des partitions (intra-classes et interclasses) obtenues par CAH	44
Fig. III.26	Graphique symétrique	46
Fig. IV.1	Appareil de décarbonatation à la chaux	50
Fig. IV.2	Appareil de décarbonatation à la soude	52
Fig. IV.3	Procédé d'adoucissement et de la régénération utilisé en échange des ions	53
Fig. IV.4	Méthode de l'osmose inverse	54
Fig. IV.5	Procédé de la chloration de l'eau	56

# Sommaire

# SOMMAIRE

<b>Introduction générale</b> .....	01
------------------------------------	----

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

I.1. Introduction .....	02
I.2. Aperçu géographique .....	02
I.2.1. Situation géographique de commun d'étude .....	02
I.2.2. Clima de la zone de Hammam Dalaa .....	03
I.2.3. Ressources hydrique .....	05
I.2.4. Population .....	05
I.3. Caractéristiques morphométriques et physiques du bassin versant d'étude .....	06
I.3.1. La surface .....	06
I.3.2. Le périmètre .....	06
I.3.3. La forme .....	07
I.3.4. Les dimensions du rectangle équivalent .....	07
I.3.5. Altimétrie et courbe hypsométrique .....	08
I.4. Les caractéristiques du réseau hydrographique .....	11
I.4.1. Densité de drainage .....	11
I.4.2. Temps de concentration .....	11
I.4.3. Vitesse d'écoulement de l'eau .....	11
I.4.4. Densité hydrographique .....	12
I.4.5. Coefficient de torrentialité .....	12
I.4.6. Réseau hydrographique .....	12
I.5. Conclusion partielle .....	13

## **Chapitre II : Aperçu sur la géologie et l'hydrogéologie de la région**

II.1. Introduction .....	14
II.2. Aperçu géologique du champ captant de Hammam Dalaa .....	14
II.2.1. La géologie .....	14
II.2.2. La pédologie .....	15
II.2.3. La litho-stratigraphie .....	16
II.3. Inventaire des points d'eau .....	18
II.4. Caractéristiques des points d'eau étudiés .....	18
II.5. Conclusion partielle .....	19

## Chapitre III : Etude hydrochimique des eaux

III.1. Introduction.....	20
III.2. Calcul de la balance ionique.....	20
III.3. Corrélation entre les cations et les anions.....	21
III.4. Etude des paramètres physicochimiques.....	22
III.4.1. Carte du titre hydrotimétrique.....	22
III.4.2. Carte du pH.....	22
III.4.3. Carte de conductivité.....	23
III.4.4. Carte de la température.....	24
III.4.5. Carte du titre alcalimétrique complet.....	24
III.4.6. Carte des bicarbonates.....	25
III.4.7. Carte des chlorures.....	26
III.4.8. Carte des Nitrates.....	26
III.4.9. Carte des sulfates.....	27
III.4.10. Carte du calcium.....	28
III.4.11. Carte du magnésium.....	28
III.4.12. Carte de sodium.....	29
III.4.13. Carte de potassium.....	30
III.4.14. Carte de la turbidité.....	31
III.4.15. Carte de la salinité.....	31
III.5. Représentation graphique des faciès chimiques.....	32
III.5.1. Diagramme de Schöeller-Berkaloff.....	32
III.5.2. Classification de Wilcox.....	33
III.5.3. Diagramme de Piper.....	34
III.6. Norme de l'eau potable.....	35
III.6.1. Définition.....	35
III.6.2. Les normes de consommation d'une eau potable.....	35
III.7. Qualité chimique des eaux.....	36
III.7.1. Potabilité des eaux.....	36
III.8. Etude statistique des données hydrochimiques.....	36
III.8.1. Statistique descriptive.....	36
III.8.2. Analyse en composantes principales (ACP).....	38

III.8.3. Classification Ascendante Hiérarchique (CAH).....	42
III.8.4. Analyse factorielle des correspondances (AFC).....	45
III.9. Conclusion partielle.....	47

## **Chapitre IV : Risques sanitaires liés à l'eau**

IV.1. Introduction.....	48
IV.2. Problèmes biologiques et sanitaires en relation avec la constitution des eaux ...	48
IV.2.1. Problèmes liés à la dureté de l'eau.....	48
IV.2.2. Problèmes liés au calcium.....	48
IV.2.3. Problèmes liés au magnésium.....	49
IV.2.4. Problèmes liés au sodium.....	49
IV.2.5. Problèmes liés aux sulfates.....	49
IV.2.6. Problèmes relatifs aux nitrates.....	49
IV.3. Procédés utilisés pour réduire la concentration de quelques éléments chimiques	49
IV.3.1. Réduction de la dureté totale.....	49
IV.3.2. Les critères de choix de la technique d'adoucissement .....	53
IV.3.3. Comment éliminer les sulfates présents dans l'eau.....	53
IV.4. Chloration de l'eau .....	55
IV.4.1. Nature des composés chlorés utilisés.....	55
IV.4.2. Les procédés de la chloration de l'eau.....	55
IV.5. Conclusion partielle.....	56
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>57</b>

# *Introduction générale*

## **Introduction générale**

L'eau est une ressource naturelle essentielle à l'homme et à l'économie et ce pour des usages multiples, telles que, la consommation humaine, l'irrigation, l'industrie, etc.

Les eaux souterraines sont une source de consommation très importante dans la plupart des régions du monde, en particulier lorsque les précipitations sont faibles. Elles représentent une part importante de l'eau potable dans les régions arides et semi-arides. La qualité de ces eaux se diffère d'une région à une autre selon plusieurs critères, dont le plus important est la nature géologique de l'aquifère. Cette qualité peut être aussi affectée par les activités anthropiques dues par l'être humain.

Au niveau de M'sila et ses environs, l'eau souterraine reste la source unique et exploitable. A présent avec l'accélération du développement démographique et économique ainsi que, l'évolution du mode de vie nous obligent à prendre en considération l'étude de la qualité et de la quantité de cette ressource destinée à l'alimentation en eau potable.

L'objectif de ce présent travail est l'étude de données physico-chimiques acquises entre janvier 2018 et décembre 2022 des eaux souterraines destinées à l'alimentation en eau potable dans la région Hammam Dalaa, avec pour intention une meilleure compréhension de la qualité de ces eaux selon leurs faciès chimiques et les phénomènes qui se produisent dans les systèmes aquifères.

Cette étude est divisée en quatre chapitres :

- Le premier chapitre portera sur la présentation de la zone d'étude.
- Le deuxième chapitre présente un aperçu sur la géologie et l'hydrogéologie de la région.
- Le troisième chapitre sera consacré à l'étude hydrochimique des eaux à l'aide des diagrammes (Piper, Schöeller-Berkaloff, Wilcox), et l'application des méthodes statistiques en utilisant le logiciel XLSTAT, telles que l'Analyse en Composantes Principales (ACP), la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) et l'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC).
- Le quatrième chapitre décrit quelques problèmes sanitaires liés à la composition des eaux, et les procédés utilisés pour réduire la concentration de quelques éléments chimiques.

En fin, nous terminerons cette étude par une conclusion générale récapitulant les principaux résultats obtenus et quelques recommandations.

# **Chapitre I**

## ***Présentation de la zone d'étude***

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

### I.1. Introduction

La connaissance de la zone à étudier est primordiale avant toute étude d'un projet. Dans ce chapitre nous donnerons un aperçu géographique, démographique, climatique, de la zone d'étude.

### I.2. Aperçu géographique

La zone d'étude est localisée au Nord de la ville de M'sila. Cette zone est limitée au Nord par El M'hir, à l'Est par Maadid, à l'Ouest par Ouanougha et au Sud par la commune de M'sila (Figure I.1).

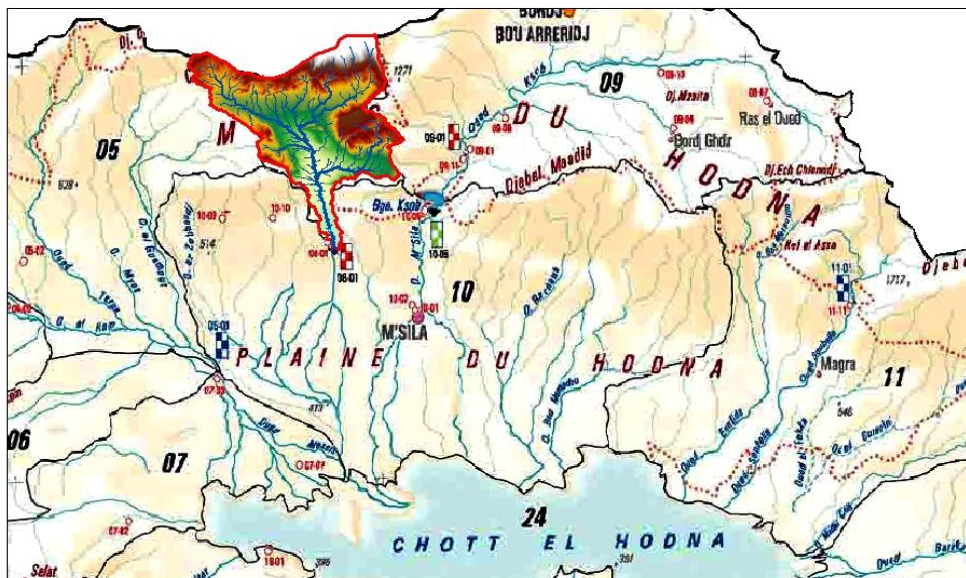


Figure I.1: Localisation géographique de la zone d'étude

#### I.2.1. Situation géographique de la commune d'étude

La commune de Hammam Dalaa est située géographiquement entre la série d'atlas tellien à côté du Nord et la chaîne des montagnes du Hodna à l'Est, et entre les lignes longitudinales (4° 56' - 5° 33') et latitude (22° - 34°).

Elle est située au Nord-Ouest du chef-lieu de la wilaya de M'sila à environ 30 km. Elle occupe une superficie de 325 km<sup>2</sup> et elle est limitée par :

- La wilaya de Bordj Bou Arreridj au Nord.

- La région de M'sila au Sud-Est.
- La région d'Ouled Madhi au Sud.
- La région d'Ouanougha à l'Ouest.

### I.2.2. Climat de zone de Hammam Dalaa

Hammam Dalaa se caractérise par un climat aride ; qui distingué par un forts froid en hiver, une chaleur élevé et sécheresse en été [1].

#### a. Température

La température est un élément essentiel pour déterminer le climat d'une région ; elle joue un rôle essentiel dans l'étude de l'évaporation et l'evatranspiration [2]. L'étude de la température est faite à partir des données recueillies de la station météorologique de M'sila (Ghzel) durant la période (2006-2016) [3].

Tableau I.1: Moyennes mensuelles et extrêmes des températures en °C (2006-2016)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
T° moyenne max	35.63	31	22.02	16.95	17.16	19.05	25.08	29.53	34.17	38.27	<b>41.07</b>	40.45
T° moyenne min	-0.23	-0.71	-1.22	-2	-3	<b>-3.35</b>	-0.95	3.1	7.5	12.71	17.7	18.27
T° moyenne	24.33	18.93	12.43	7.43	6.73	7.63	11.23	16.03	20.73	26.23	30.23	29.83

Source : Station météorologique de M'sila

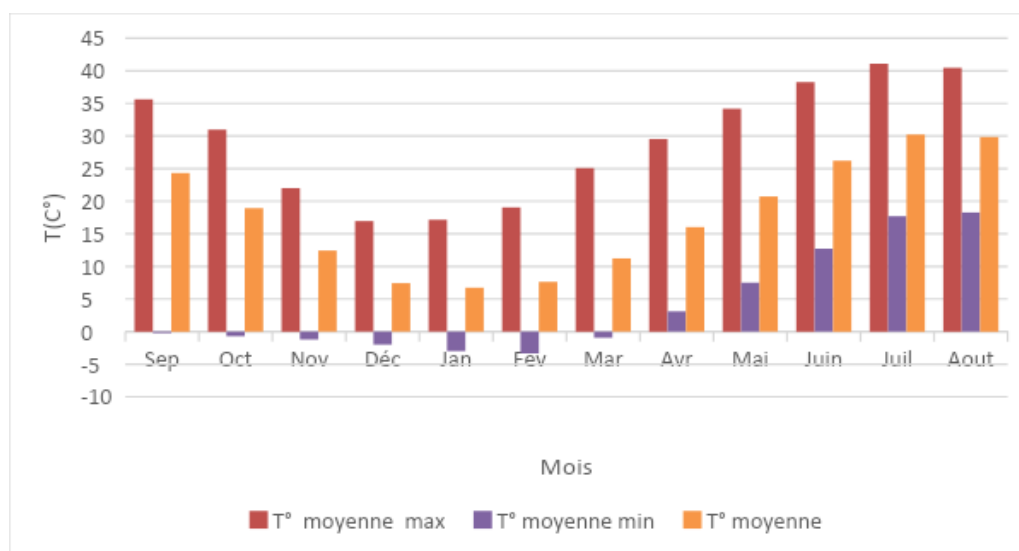


Figure I.2 : Moyennes mensuelles et extrêmes des températures en °C (2006-2016)

#### a.1) Températures extrêmes

D'après les données des températures (Tab. I.1 et Fig. I.2), il parait que parmi le mois les plus chaud dans la région d'étude, Juillet en premier rang avec une température moyenne maximale

de 41.07 °C, alors que le mois de février a enregistré la valeur la plus basse avec une température de -3.35 °C [4].

### a.2) Températures moyennes mensuelles

Les valeurs des températures moyennes mensuelles enregistrées dans la station météorologique de M'sila durant la période allant de 2006 à 2016 varient d'un maximum de 30.23 °C pour le mois de Juillet alors que le mois de Janvier enregistre une valeur minimale de 6.73°C [4].

### b. Précipitations

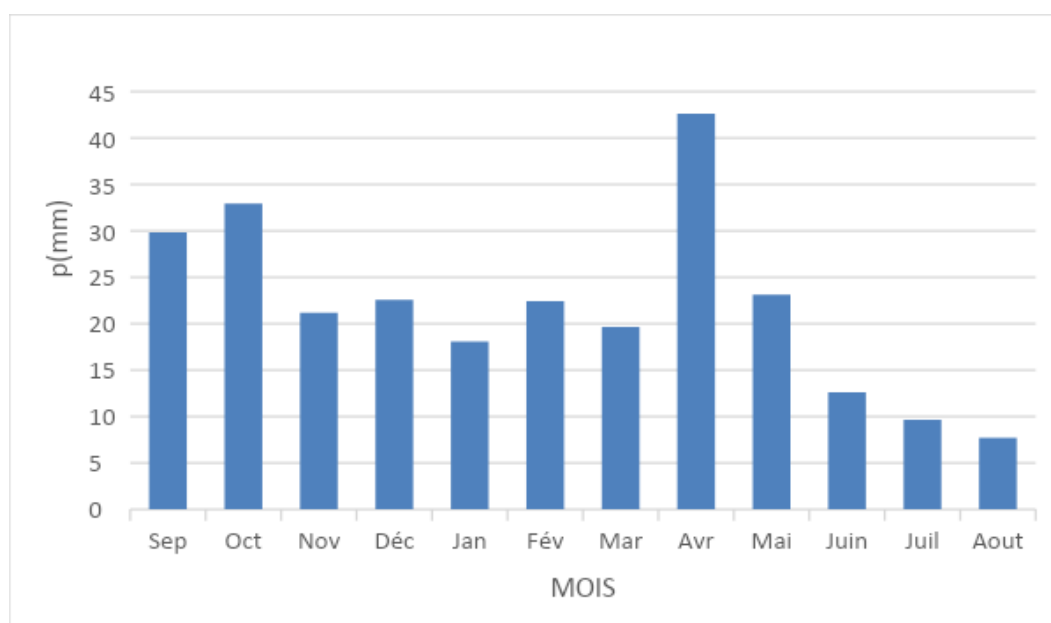
La pluie (précipitation) est un facteur climatique très important qui caractérise le climat de la région d'étude ; elle joue un rôle prépondérant dans le comportement hydraulique des cours d'eau et dans l'alimentation des nappes souterraines.

La pluviosité augmente avec l'altitude et diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la mer. [3].

**Tableau I.2 : Précipitations moyennes mensuelles en mm pendant la période (2006-2016) de la zone de Hammam Dalaa**

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Total
P (mm)	29.85	32.93	21.16	22.56	18.08	22.42	19.62	42.6	23.12	12.61	4,27	6.13	255.32 (mm)
Saison	Automne			Hiver			Printemps			Eté			
	83.94			63.06			85.34			22.98			

Source : Station météorologique de M'sila



**Figure I.3: Précipitation moyenne mensuelle en mm pendant la période (2006-2016) de la commune de Hammam Dalaa**

### c. Topographie

La commune de Hammam Dalaa est positionnée sur une zone de hauteur moyenne, parsemée d'une gamme de hautes terres et de zones en pente, en particulier dans les régions du Nord. La commune peut être divisée en termes d'aspect de la surface en deux parties principales.

- La partie Nord représente les zones montagneuses jusqu'à 1200 mètres d'altitude.
- La partie Sud correspond aux zones plates, en particulier dans l'extrême Sud, où l'altitude est de 700 mètres au-dessus du niveau de la mer [5].

#### I.2.3. Ressource hydriques

Les ressources en eau disponibles se résument aux nappes souterraines [6].

**Tableau I.3: Nombre de puits de la commune de Hammam Dalaa**

Nombre de puits	Puits profonds	Puits traditionnels	Total
<b>Hammam Dalaa</b>	152	30	182

Source : D.S.A (2022)

**Tableau I.4: Ouvrages de stockage des eaux de la commune Hammam Dalaa [7]**

Commune	Réservoirs		Châteaux d'eau	
	Nbre	Capacité (m <sup>3</sup> )	Nbre	Capacité (m <sup>3</sup> )
<b>Hammam Dalaa</b>	17	12 350	4	700

Source : D.R.E (2022).

#### I.2.4. Population

Lors du recensement de 1998, la population totale de Hammam Dalaa s'élevait à 34778 habitants, alors que lors du recensement de 2008, elle atteignait 39734 habitants, avec un taux de croissance estimé à 1.34 %. Le tableau suivant montre de manière précise et détaillée l'évolution de la population de la commune [8].

**Tableau I.5: Evaluation de la population de Hammam Dalaa entre 1987 et 2008**

Année	1987	1998	2008	Taux de croissance	
				1987/1998	1998/2008
<b>Hammam Dalaa</b>	27088	34778	39734	2.30	1.34

Source : La mairie de Hammam Dalaa (2021)

A travers ce tableau précédent, on constate que les taux de croissance entre le recensement 87 /98 et 98 /08 sont en baisse, comme on le constate :

La commune de Hammam Dalaa à est passée de 2.30 à 1.34.

**Tableau I.6: Densité de la Population de la commune de Hammam Dalaa**

Commune	Superficie(Km <sup>2</sup> )	Population (hab)	Densité (hab/km <sup>2</sup> )
<b>Hammam Dalaa</b>	321	49524	154.28

Source : La mairie de Hammam Dalaa (2021)

Selon l'annuaire statistique de la wilaya de M'sila (2021), la densité de la population de la commune de Hammam Dalaa est à environ 154 (hab/km<sup>2</sup>), sur une superficie de 321 (km<sup>2</sup>).

Tableau I.7: Répartition de la population selon le sexe dans la commune de Hammam Dalaa

Commune	Population		Population totale
	Masculin	Féminin	
Hammam Dalaa	25006	24518	49524

Source : La mairie de Hammam Dalaa (2022)

### I.3. Caractéristiques morphométriques et physiques du bassin versant d'étude

#### I.3.1. La surface

Le bassin versant (BV) est l'aire de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau. Les débits vont donc être en partie reliés à sa surface, correspondant à l'aire délimitée par l'ensemble des points les plus hauts qui constituent la ligne de partage des eaux. Sa surface (A) exprimée en  $\text{km}^2$ , peut être déterminée à l'aide d'un planimètre ou par les techniques de digitalisation (Global Mapper – Map Info, ArcGis...). La surface du bassin versant étudié a été mesurée en utilisant le logiciel ArcGis. Elle est de l'ordre  $325 \text{ km}^2$ .

#### I.3.2. Le périmètre

Le périmètre représente toutes les irrégularités du contour ou de la limite du bassin versant. Il est exprimé en km. Le contour du bassin est constitué par une ligne joignant tous les points les plus élevés. Il n'influence pas l'état d'écoulement du cours d'eau au niveau du bassin versant. Le périmètre peut être mesuré à l'aide d'un curvimètre ou automatiquement par des logiciels cités précédemment. Le périmètre mesuré par ArcGis est de 117 km.

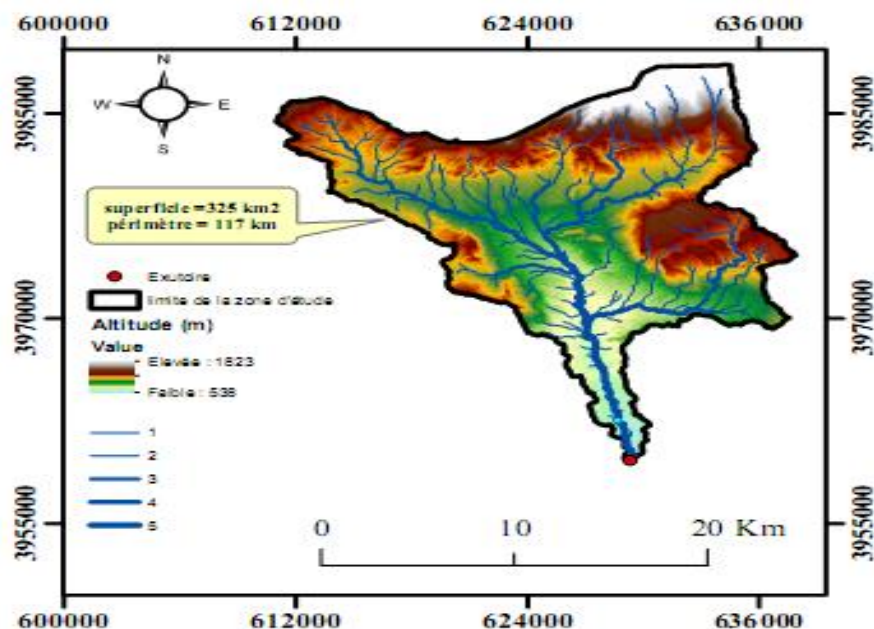


Figure I.4 : Périmètre et surface du bassin versant Hammam Dalaa

### 1.3.3. La forme

L'indice le plus utilisé pour déterminer la forme d'un bassin versant est l'indice de compacité de Gravelius ( $K_G$ ). La forme d'un bassin a une grande influence sur l'écoulement global du cours d'eau, et surtout sur l'allure de l'hydrogramme à l'exutoire du bassin, résultant d'une pluie donnée. Il est établi en comparant le périmètre du bassin ( $P$ ) à celui d'un cercle qui aurait la même surface. Cet indice est donné par la relation suivante [9].

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0.28 * \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Où

$K_G$  : Indice de compacité de Gravelius.

$P$ : Périmètre du bassin versant en km.

$A$ : Superficie du bassin en  $\text{km}^2$ .

- Si  $K_G$  est proche de **1**, le bassin versant est de forme quasiment circulaire

- Si  $K_G$  est supérieur à **1**, le bassin versant est de forme allongée.

Pour notre cas,  $K_G = 1.82 \Rightarrow$  le bassin versant est de forme allongée.

### 1.3.4. Les dimensions du rectangle équivalent

C'est le rectangle de longueur  $L$  et de largeur  $l$  qui a la même surface et le même périmètre que le bassin versant. Le bassin versant rectangulaire résulte d'une transformation géométrique du bassin réel dans laquelle on conserve la même superficie, le même périmètre (ou le même coefficient de compacité), et donc par conséquent la même répartition hypsométrique. Les courbes de niveau deviennent des droites parallèles au petit côté du rectangle. La climatologie, la répartition des sols, la couverture végétale et la densité de drainage restent inchangées entre les courbes de niveau. En 1963, *Roche* a établi deux relations relatives aux dimensions du rectangle équivalent, dont les dimensions sont données par les relations suivantes [10].

$$L_r = \frac{K_G \cdot \sqrt{A}}{1.12} \left[ 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1.12}{K_G} \right)^2} \right]$$

$$l_r = \frac{K_G \cdot \sqrt{A}}{1.12} \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{1.12}{K_G} \right)^2} \right]$$

Avec

$L_r$  : Longueur du rectangle équivalent en km

$l_r$ : Largeur du rectangle équivalent en km.

$k_g$ : Indice de compacité.

$A$  : Superficie du bassin versant en  $\text{km}^2$ .

Pour notre cas, nous obtenons :

$$L_r = 52.28 \text{ km}$$

$$l_r = 6.21 \text{ km.}$$

### I.3.5. Altimétrie et courbe hypsométrique

#### I.3.5.1. Hypsométrie du bassin

La topographie du bassin joue un rôle très important en hydrologie. Elle conditionne le ruissellement, l'infiltration et l'évaporation.

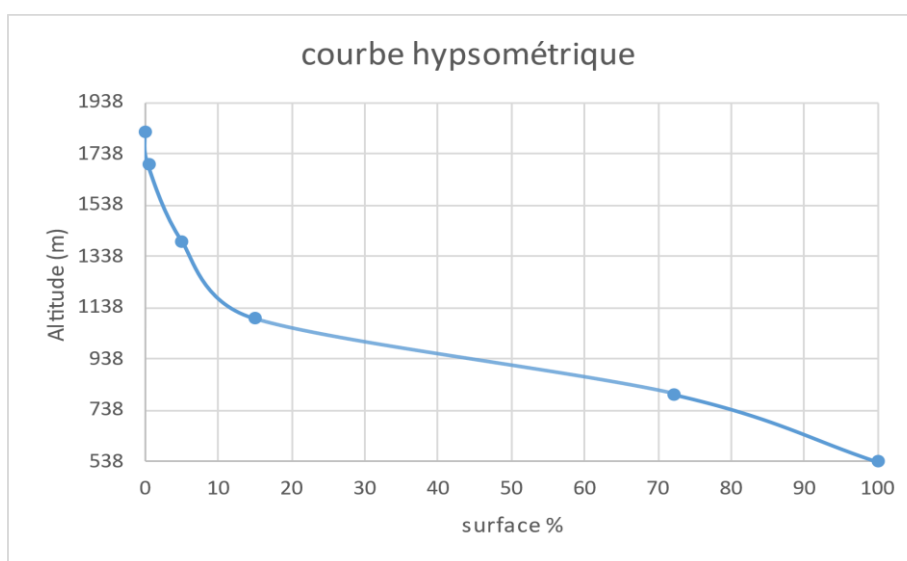
Les résultats d'une telle application sont donnés dans les tableaux suivants. Les fréquences altimétriques sont représentées dans le [Tableau \(I.8\)](#) et par la courbe hypsométrique ([Fig. I.5](#)).

**Tableau I.8: Paramètres géométriques du sous bassin versant**

Paramètre	Unité	Valeur
A	km <sup>2</sup>	325
P	km	117
K <sub>G</sub>	/	1.82
L <sub>r</sub>	km	52.28
l <sub>r</sub>	km	6.21

**Tableau I.9 : Répartition des différentes tranches d'altitude**

Tranche d'altitude	Surface (km <sup>2</sup> )	Surface (%)	Surface cumulée (%)	(%) au- dessus de la limite inférieure	Altitude (m)
538 - 800	90.06767415	27.71131017	27.71131017	100	538
800 - 1100	187.0144814	57.53913763	85.2504478	72.28868983	800
1100 - 1400	31.41684407	9.666086292	94.91653409	14.7495522	1100
1400 - 1700	15.13143306	4.655519739	99.57205383	5.083465909	1400
1700 - 1823	1.390916414	0.42794617	100	0.42794617	1700
<b>Total</b>	<b>325,0213491</b>	<b>100</b>			<b>1823</b>



**Figure I.5 : Courbe hypsométrique du bassin versant**

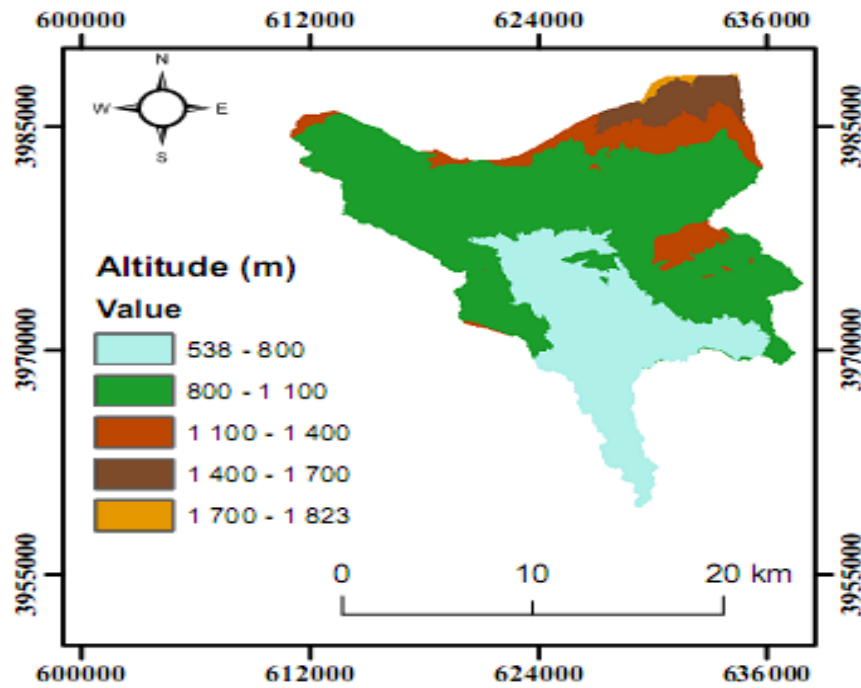


Figure I.6 : Carte des tranches d'altitudes du bassin

### I.3.5.2. Caractéristiques des altitudes

#### 1) Altitude moyenne ( $H_{moy}$ )

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

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

Où

$H_i$  : Altitude moyenne de chaque classe en mètre

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

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

Pour notre bassin versant,  $H_{moy} = 1326.62$  m.

#### 2) Altitude médiane ( $H_{50}$ )

Elle Correspond au point d'abscisse 50 % sur la courbe hypsométrique,  $H_{50} = 905$  m.

#### 3) Altitudes extrêmes

Les principales altitudes extrêmes sont les suivantes :

- L'altitude minimale est :  $H_{min} = 538$  m

- L'altitude maximale est :  $H_{max} = 1823$  m.

- La hauteur à 5 % de la surface totale est :  $H_{5\%} = 1390 \text{ m}$
- La hauteur à 95 % de la surface totale est :  $H_{95\%} = 596 \text{ m}$ .

#### 4) Dénivelée simple (D)

Sur la courbe hypsométrique tracée, on prend la distance verticale en (m), qui sépare les altitudes ayant 5 % et 95 % de la surface totale du sous bassin versant.

$$D = H_{5\%} - H_{95\%} = 794 \text{ m.}$$

#### I.3.5.3. Indices de pente

Le but de ces indices est de caractériser les pentes d'un bassin versant et de permettre des comparaisons et des classifications. On trouve généralement :

##### a) Indice de pente globale ( $I_g$ )

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

$$I_g = D/L_r$$

Avec

$D$  : Dénivelée simple (m).

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

$$\Rightarrow I_g = 15.19 \text{ m/km} = 0.01519$$

$I_g < 0.002$ .....	relief très faible
$0.002 < I_g < 0.005$ .....	relief faible
$0.005 < I_g < 0.010$ .....	relief assez faible
$0.010 < I_g < 0.020$ .....	relief modéré
$0.020 < I_g < 0.050$ .....	relief assez fort

D'après la classification du relief par L'ORSTOM (*Office de Recherche Scientifique de Territoire d'Outre-Mer*),  $I_g$  étant compris entre 10 et 20 m/km, le sous bassin versant présente un relief modéré [10].

##### b) Dénivelée spécifique ( $D_s$ )

La dénivelée spécifique permet de se prononcer sur le relief suivant la classification d'ORSTOM (Tab. I.10). L'indice  $I_g$  décroît pour un même bassin, lorsque la surface augmente, il est donc difficile de comparer des bassins de taille différente, d'où la nécessité d'introduire le paramètre ( $D_s$ ).

$$D_s = I_g * [A]^{1/2} \Rightarrow D_s = 273.80 \text{ m}$$

D'après la deuxième classification de l'ORSTOM, la dénivelée spécifique du BV se trouve dans la classe  $R_6$ , caractérisée par un relief fort.

**Tableau I.10 : Classification de l'ORSTOM**

$R_1$	Relief très faible	$05 < DS < 10$ m
$R_2$	Relief faible	$10 < DS < 25$ m
$R_3$	Relief assez faible	$25 < DS < 50$ m
$R_4$	Relief modéré	$50 < DS < 100$ m
$R_5$	Relief assez fort	$100 < DS < 250$ m
<b><math>R_6</math></b>	<b>Relief fort</b>	<b><math>250 &lt; DS &lt; 500</math> m</b>
$R_7$	Relief très fort	$500 < DS < 750$ m

#### I.4. Les caractéristiques du réseau hydrographique

##### I.4.1. Densité de drainage ( $D_d$ )

La densité de drainage peut donner un aperçu sur la lithologie du bassin versant et permet de comparer l'écoulement superficiel au niveau de plusieurs bassins. Elle est donnée par la relation suivante :

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{A} \quad (\text{km/km}^2)$$

Où

$L_i$  : Longueur des talwegs en km.

$$\Rightarrow D_d = 0.913 \quad (\text{km/km}^2)$$

##### I.4.2. Temps de concentration ( $T_c$ )

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

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5 * L_p}{0.8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}}$$

$L_p$  = Longueur du talweg principal (km)

$$\Rightarrow T_c = 4.42 \text{ h}$$

##### I.4.3. Vitesse d'écoulement de l'eau ( $v_e$ )

Elle est donnée par l'expression suivante.

$$v_e = L_p / T_c$$

Avec

$L_p$ : Longueur du talweg principal = 18.15 km

$T_c$  : Temps de concentration (h).

$$\Rightarrow v_e = 4.10 \text{ km/h} = 1.14 \text{ m/s}$$

#### I.4.4. Densité hydrographique ( $F$ )

La densité hydrographique représente le nombre de canaux d'écoulement par unité de surface. Elle est donnée par la relation :

$$F = \sum \frac{N_i}{A} \dots\dots\dots (\text{km}^{-2})$$

$N_i$  : nombre de cours d'eau (409).

$$\Rightarrow F = 409/325 = 1.26 \text{ km}^{-2}$$

#### I.4.5. Coefficient de torrentialité ( $C_T$ )

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

$$C_T = \frac{N_1}{A} * D_d$$

$N_1$  : nombre de cours d'eau d'ordre 1 ( $N_1 = 195$ )  $\Rightarrow C_T = 0.55 (\text{km}^{-3})$ .

#### I.4.6. Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique du bassin étudié est très dense. Les principaux Oueds du sous bassin versant sont : Oued Loughemane, Oued El Hammam et Oued El Haourane.

L'Oued Loughemane se jette dans l'Oued M'sila, prolongement de Oued K'sob, à l'aval de M'sila (FAO, 1971) (Fig. I.7).

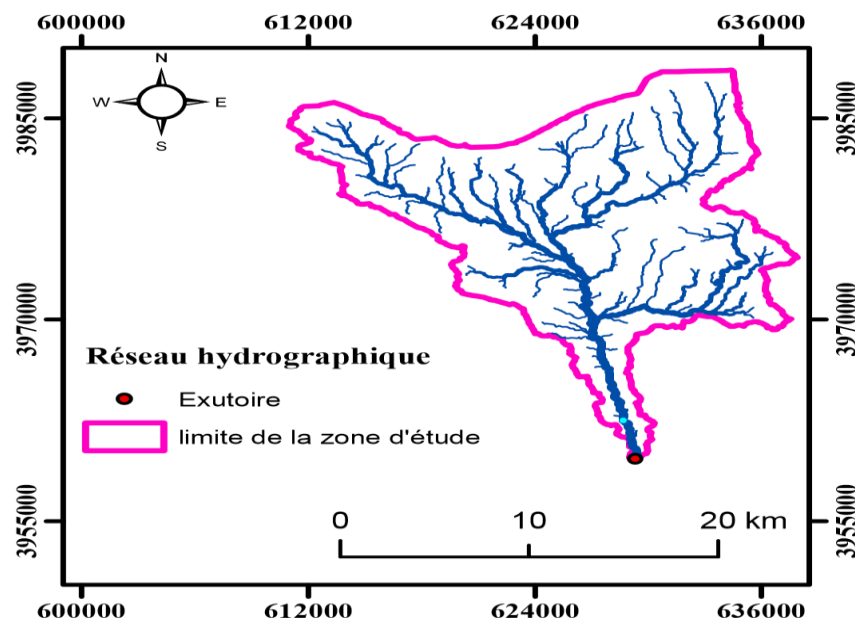


Figure I.7 : Réseau hydrographique de la zone d'étude

Le tableau suivant nous résume les caractéristiques principales du bassin versant Hamam Dalaa.

**Tableau I.11: Principales caractéristiques morphométriques du bassin étudié**

Paramètre	Symbole	Unité	Valeur
Aire	A	km <sup>2</sup>	325
Périmètre	P	km	117
Indice de compacité	K <sub>G</sub>	/	1.82
Altitude maximale	H <sub>max</sub>	m	1823
Altitude minimale	H <sub>min</sub>	m	538
Altitude moyenne	H <sub>moy</sub>	m	1326.62
Indice de pente globale	I <sub>g</sub>	/	0.01519
Largeur du rectangle équivalent	l <sub>r</sub>	km	6.21
Longueur du rectangle équivalent	L <sub>r</sub>	km	52.28
Dénivelée	D	m	794
Dénivelée spécifique	D <sub>s</sub>	m	273.80
Altitude à 5 %	H <sub>5%</sub>	m	1390
Altitude à 95 %	H <sub>95%</sub>	m	596
Densité de drainage totale	D <sub>d</sub>	km/km <sup>2</sup>	0.913
Temps de concentration	T <sub>c</sub>	heure	4.42
Densité hydrographique	F	l/km <sup>2</sup>	1.26
Coefficient de torrentialité	C <sub>T</sub>	km/km <sup>4</sup>	0.55
Vitesse d'écoulement de l'eau	(v <sub>e</sub> )	m/s	1.14

### I.5. Conclusion partielle

La connaissance de la région d'étude est très importante avant toute étude d'un bassin versant. Dans ce chapitre, nous avons représenté la situation géographique, le climat la population de Hammam Dalaa et les caractéristiques morphométriques de son bassin versant. Ce dernier a une superficie 325 km<sup>2</sup>, un périmètre de 117 km, une dénivelée de 794 m, une altitude moyenne de 1326.62 m et un relief fort.

# **Chapitre II**

*Aperçu sur la géologie et  
l'hydrogéologie de la région*

## Chapitre II: Aperçu sur la géologie et l'hydrogéologie de la région

### II.1. Introduction

L'étude géologique et hydrogéologique nous permet d'identifier les formations perméables détritiques et les formations résistantes fissurées ou karstiques susceptibles d'être aquifères, ainsi que les formations imperméables qui constituent soit le toit, soit le substratum de ces formations, leurs épaisseurs et leurs étendues.

L'étude tectonique nous renseigne sur la géométrie des différents aquifères de la région. Les familles de failles entraînant la formation de fossés d'effondrement ou de soulèvement modifient ainsi la géométrie des couches qui va caractériser chaque type de nappe et permettent la communication probable entre les aquifères.

La cartographie de l'aquifère a pour but de représenter sa configuration, sa structure et de schématiser la fonction du réservoir et son comportement hydrodynamique [1].

### II.2. Aperçu géologique du champ captant de Hammam Dalaa

#### II.2.1. La géologie

La géologie constitue la base fondamentale de toute étude notamment en hydrogéologie. Elle détermine les formations susceptibles ou non de constituer des aquifères à partir de leur lithologie ; ainsi que la détermination des relations pouvant exister entre eux.

D'après la carte géologique de la région du Hodna (Fig. II.1), on remarque la présence des formations suivantes.

- *Crétacé* : des marnes calcaires et grès.
- *Nummulitique*.
- *Miocène inférieur* : marnes gypseuses avec calcaire gréseux.
- *Pontien* : des marnes gréseuses et quelques conglomérats gypseux.
- *Quaternaire* : Il est d'origine continentale ; les formations quaternaires sont discordantes sur un substratum *Néogène* et parfois *Paléogène* et sont souvent protégées par des croûtes calcaireuses gypseuses [11].

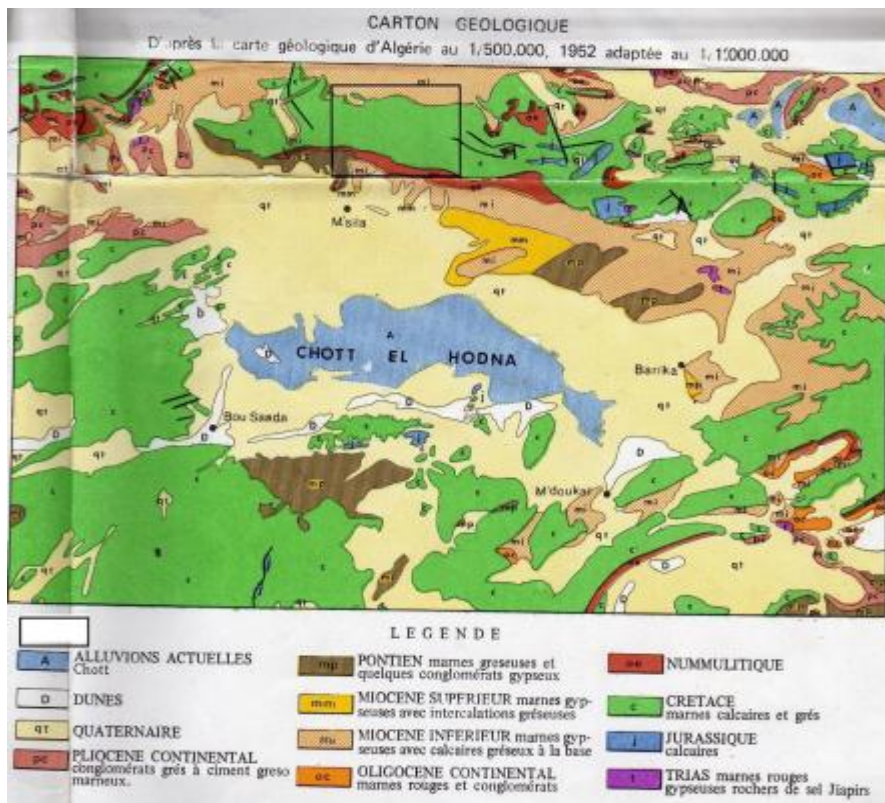


Figure II.1 : Carte géologique de la région du Hodna [12]

### II.2.2. La pédologie

Selon la carte pédologique de la région du Hodna (Fig. II.2), notre zone d'étude est caractérisée par les types des sols suivants.

- Sols bruns calcaires.
- Lithosols et sols à encroutement calcaire.
- Siérozems.
- Sols peu évolués alluviaux.
- Sols à encroutement calcaire [4].

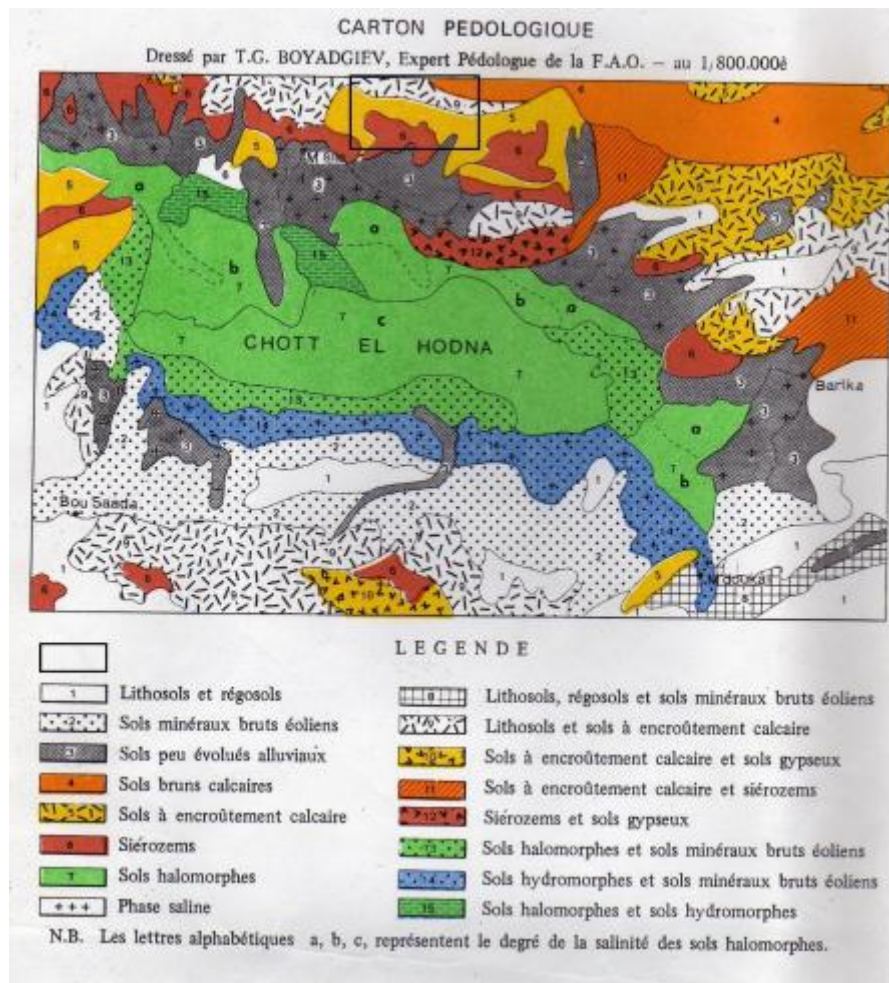


Figure II.2 : Carte pédologique de la zone du Hodna [12]

### II.2.3. La litho-stratigraphie

#### a) Le trias

Représenté par du gypse et argiles bariolées, cargneules, roches éruptives. On le distingue dans le Sud et l'Est.

#### b) Le Jurassique

Constitué par des masses dolomitiques et calcaire-dolomitiques que surmontent des calcaires, des marnes ou calcaires marneux.

#### c) Le crétacé

Représenté par le Valanginien, l'Hauterivien, le Barrémien, l'Aptien, l'Albien, le Cénomaniens, le Turonien, le Sénonien.

#### d) L'éocène

On distingue de façon classique :

- L'Eocène inférieur "calcaire" (Yprésien).
- Le Lutétien supérieur lagunaire (marne, argiles, gypse).
- Les grès rouges (série continentale Lutétien supérieur à Oligocène).

e) Le Miocène

Il est représenté par des grès calcaireux, puis par une série très épaisse marneuse à petites intercalations gréseuses. Ces niveaux de base du Miocène sont constitués par des grès calcaireux fins à débris surmontant des conglomérats de base du premier cycle ; l'extension de ces grès de base et moins importante que celle des calcaires à Lithotomies accompagnés fréquemment de calcaires à polypiers.

L'épaisseur de cette série de base du premier cycle du Miocène inférieur est très variable d'un point à un autre (3 à 20 m). Les calcaires à silex sont dominants dans toute la série qui débute par une micro-brèche phosphatée marquant à l'Est dans la région du Ksob. Seul l'yprésien supérieur serait donc représenté dans la zone qui nous intéresse [13].

La Figure II.4 nous résume la colonne stratigraphique du bassin du Hodna.

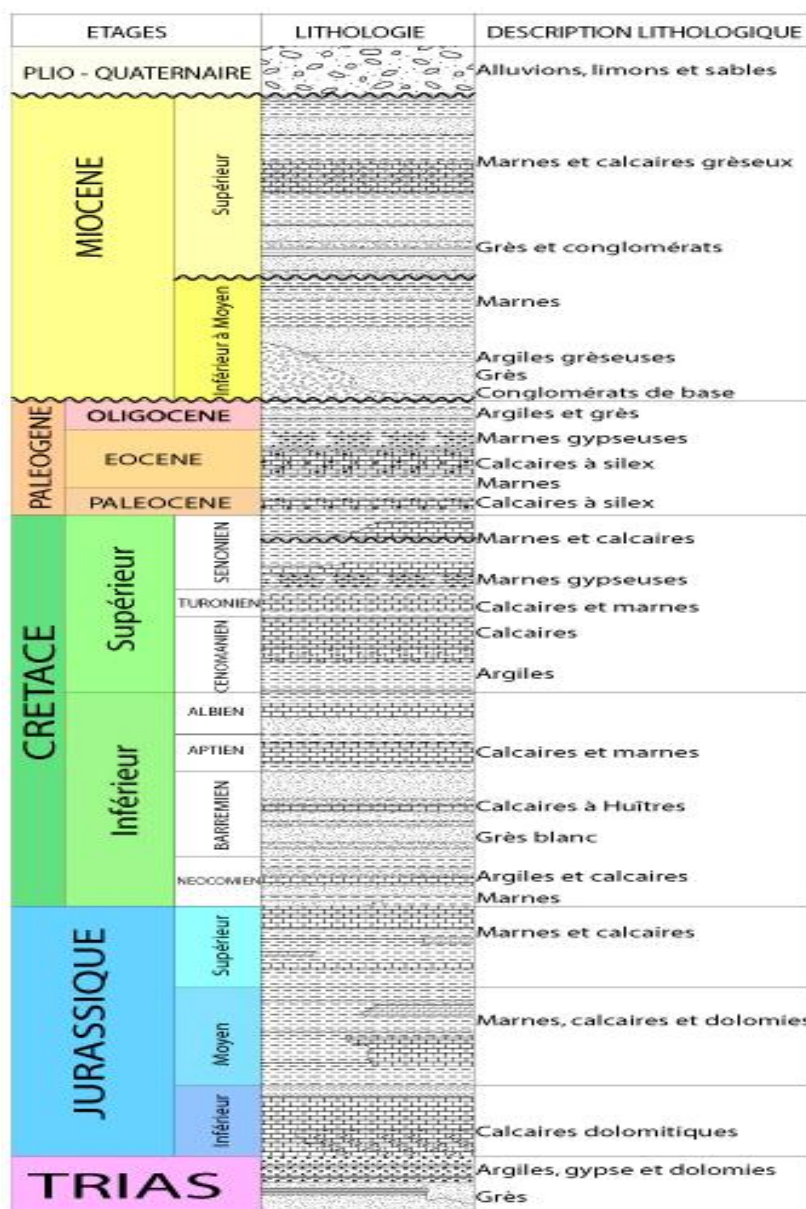


Figure II.3 : Colonne stratigraphique synthétique du Bassin du Hodna (SONATRACH, 2005)

### II.3. Inventaire des points d'eau

La nature chimique et la concentration des eaux souterraines dépendent en partie des propriétés des eaux de recharge (Eaux de surface et eaux des précipitations), mais surtout des processus physicochimiques qui existent dans l'aquifère. Ces processus physicochimiques augmentent ou diminuent la concentration des substances dissoutes dans l'eau le long de son cheminement souterrain. Les proportions de ces variations chimiques de la concentration des substances dissoutes varient avec la nature pétrographique et physique de l'aquifère, avec la température et les propriétés chimiques de l'eau, ainsi qu'avec le temps de séjour de l'eau et les influences anthropogènes.

Les variations saisonnières des conditions chimiques et hydrauliques des recharges d'eau provoquent des fluctuations saisonnières du chimisme dans les eaux souterraines. De plus, des impacts humains sur la qualité des eaux souterraines peuvent influencer ou accélérer les processus naturels.

Il est évident que le chimisme des eaux souterraines dépend, principalement, de la composition lithologique des couches traversées et du temps de séjour des eaux. Cette interaction influe sur la teneur des éléments majeurs.

### II.4. Caractéristiques des points d'eau étudiés

Les données utilisées pour notre étude sont les résultats des analyses effectuées sur l'eau de six (06) forages par les services de l'Algérienne Des Eaux (ADE) et de la Direction des Ressources en Eau (DRE) de la Wilaya de M'sila durant la campagne 2018-2022.

Leurs caractéristiques principales sont les suivantes (Tabs. II.1, II.2 et Fig. II.4).

**Tableau II.1: Inventaire et caractéristiques des points d'eau**

Nom	N°	Long. (m)	Latit. (m)	Z (m)	T (°C)	pH	Cond. (µS/cm)	Turb (NTU)	TAC (°F)	TH (°F)	Salin. (mg/L)
Haourane 3	F1	626595	3978508	805	18.22	7.45	719.5	3	80	127.4	0.33
Hammam Dalaa 1	F2	626585	3978896	822	18.36	7.22	1581	0.31	111.66	191.33	1.1
Haourane 2	F3	626044	3978539	819	19.1	7.39	723	14.7	36.25	61.5	0.35
Bouira	F4	618122	3978734	837	21.85	7.41	2207	0.79	141.5	510	1.1
Hammam Dalaa 2	F5	619150	3980138	897	17.85	6.7	2775	0.2	195	644	1.7
Haourane	F6	626936	3978669	815	31.4	7.39	979.66	2.73	171	180.66	0.35

Tableau II.2: Teneurs des ions majeurs des eaux des forages étudiés

N°	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> (mg/L)	Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	Na <sup>+</sup> (mg/L)	K <sup>+</sup> (mg/L)
F1	427	65.462	1.075	251.667	100	52.002	23.5	3.5
F2	410.667	173.075	7.367	513.333	197.333	53.307	19.333	3.8
F3	442.25	81.366	1.325	316.667	127.2	72.171	8	2.7
F4	353.8	142.27	18.5	660	156	138.55	120	3
F5	457.5	153.502	3.75	900	234.4	154.072	76.5	3.65
F6	439.2	41.322	1.55	250	104	69.66	15	3.2

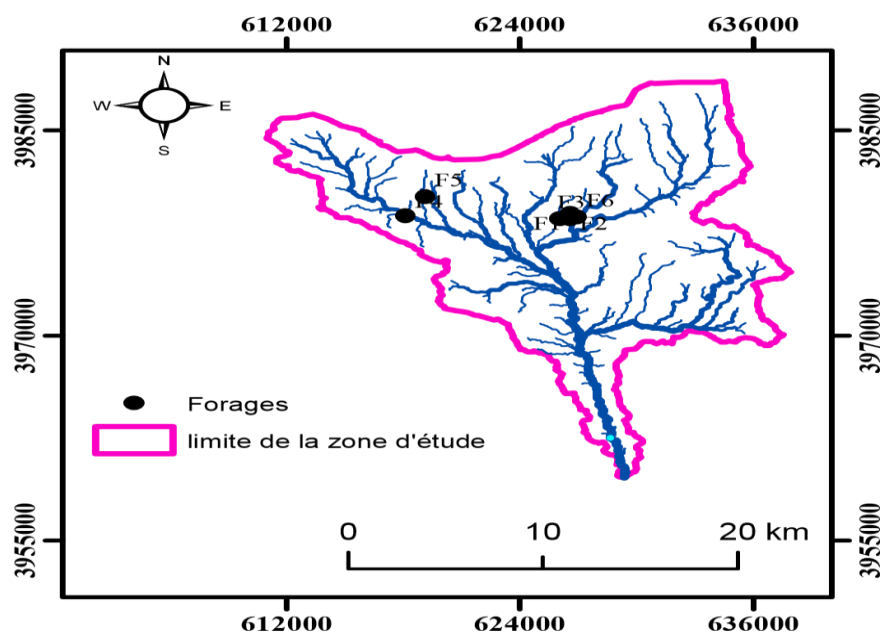


Figure II.4 : Carte de positionnement des forages étudiés

## II.5. Conclusion partielle

La détermination des différents endroits favorables à l'implantation des forages et des puits est basée sur une bonne connaissance de la géologie locale et des formations géologiques capables d'être aquifères de la zone d'étude. Nous regrettons la non disponibilité de données relatives à la piézométrie dans la région d'étude pour bien mener notre étude hydrogéologique.

La région étudiée est située au Sud des hauteurs des montagnes Choukchot et Mansourah. Elle s'étend jusqu'à la bordure Nord du bassin du Hodna et constitue l'extrémité occidentale des Monts du Hodna.

L'étude géologique de la région nous a permis de connaître les événements successifs qui ont été à l'origine de la formation de la cuvette Hodnienne, formation qui a débuté dès la phase emschérienne et qui s'est achevée avec la phase tellienne, phase finie Miocène.

# **Chapitre III**

*Etude hydrochimique des eaux*

## Chapitre III : Etude hydrochimique des eaux

### III.1. Introduction

L'étude hydrochimique des eaux souterraines nous offre beaucoup d'informations utiles pour comprendre les phénomènes qui se produisent dans les systèmes aquifères. Cela signifie des échanges potentiels entre l'eau et les roches, sachant que la minéralisation des eaux souterraines peut provenir de l'acquisition d'éléments chimiques par dissolution et altération des minéraux dans le réservoir. Cette étude permet également de suivre le développement spatial de divers éléments dissous, d'estimer leur source, d'estimer la profondeur de circulation de l'eau et d'évaluer la qualité de l'eau en relation avec l'eau potable et l'irrigation.

Pour pouvoir analyser ces données et en ressortir le plus d'information en peu de temps, nous avons utilisé des outils et méthodes efficaces et rapides.

Le principal outil utilisé est le logiciel "DIAGRAMMES" (Piper, Schöeller-Berkaloff, ...) créé par *Roland Simler* du Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon (France). C'est un logiciel d'hydrochimie en distribution libre facilitant l'exploitation d'analyse d'eau [14].

Nous avons donc entrepris d'étudier les résultats des analyses chimiques de la campagne d'échantillonnage de l'eau au cours des années 2018-2019-2020-2022 au niveau de six (06) forages situés à Hammam Dalaa. Pour ce fait, une étude statistique a été menée par les méthodes d'Analyse en Composantes Principales (ACP), de Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) et d'Analyse Factorielle de Correspondance (AFC) pour la détermination et la classification de la qualité chimique de l'eau de la région.

### III.2. Calcul de la balance ionique

Avant de traiter et d'interpréter les analyses des eaux prélevées au niveau des différents forages, il faut analyser leur fiabilité. La méthode utilisée est la balance ionique (BI).

$$BI = \frac{|\sum(\text{Cation}) - \sum(\text{Anion})|}{\sum(\text{Cation}) + \sum(\text{Anion})} \cdot 100$$

Les concentrations des cations et des anions sont exprimées en meq/L (*milliéquivalent/litre*).

Cette relation permet de définir trois classes [14].

- **BI < 5 %** : la fiabilité des analyses est excellente.
- **5 ≤ BI < 10** : la fiabilité des analyses est acceptable.
- **10 ≥ BI** : la fiabilité des analyses est douteuse (mauvaise).

Le calcul de cet indice (Tableau III.1) nous a donné les résultats suivants.

**Tableau III.1 : Résultats du calcul de la balance ionique des eaux souterraines de de la zone d'étude**

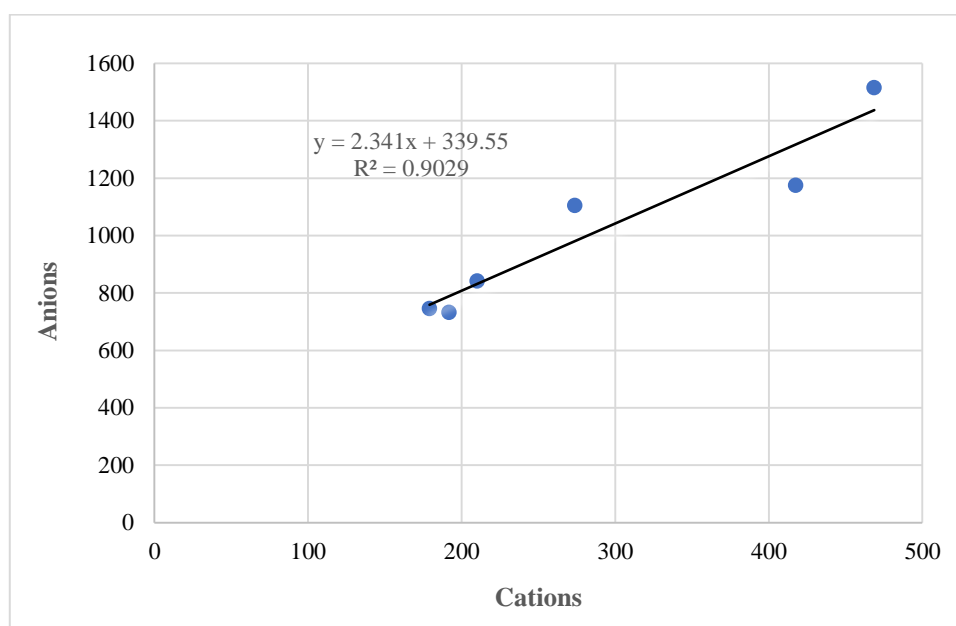
Nom de point d'eau	Somme des cations (meq/L)	Somme des anions (meq/L)	Balance ionique (%)	Fiabilité des analyses
F1	10,396	13,848	14	Mauvaise
F2	15,167	22,418	19	Mauvaise
F3	12,700	16,157	12	Mauvaise
F4	24,478	23,851	1	Excellente
F5	27,790	30,626	5	Acceptable
F6	11,654	13,593	8	Acceptable

### III.3. Corrélation entre les cations et les anions

Pour confirmer la fiabilité des analyses, nous avons soumis les données hydrochimiques à un test statistique pour mettre en évidence une corrélation linéaire qui existe entre la somme des cations et celle des anions.

La Figure (III.1) représente la corrélation entre la somme des cations et la somme des anions qui témoigne de la bonne qualité des analyses chimiques de cette campagne d'échantillonnage au niveau des eaux souterraines de Hammam Dalaa.

La corrélation entre la somme des cations et celle des anions met en évidence une droite linéaire de la forme  $y = ax + b$ , dont l'équation est :  $y = 2.341x + 339.55$  et un coefficient de corrélation  $R^2 = 0.9029$ .



**Figure III.1 : Corrélation entre les cations et les anions**

### III.4. Etude des paramètres physicochimiques

Les analyses ont été effectuées au laboratoire de l'Algérienne des eaux (ADE) de M'sila. Deux méthodes ont été utilisées pour ces analyses.

- Méthode volumétrique : dosage des éléments suivants : TAC, TH,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ .

- Méthode spectrophotométrique (DR2000) : analyse de :  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ .

#### III.4.1. Carte du titre hydrotimétrique (TH)

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

L'analyse de la carte de teneur en TH (Fig. III.2) montre que la forte concentration est enregistrée au Nord-Ouest de la plaine au niveau des forages (F4, F5).

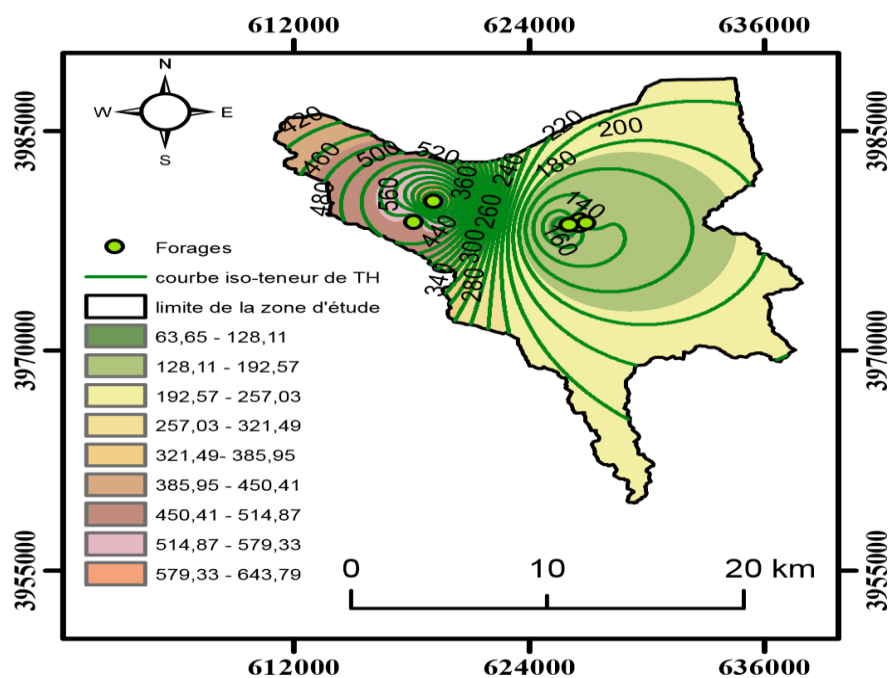


Figure III.2: Carte isovaleurs du TH

#### III.4.2. Carte du pH

Le pH de l'eau mesure la concentration des protons  $\text{H}^+$  contenus dans l'eau. Il résume la stabilité de l'équilibre établi entre les différentes formes de l'acidité carbonique, et il est lié au système tampon développé par les carbonates et les bicarbonates [15].

L'analyse de la carte (Fig. III.3) montre que toutes les teneurs du pH sont dans la norme de la potabilité (6.5 – 8.5).

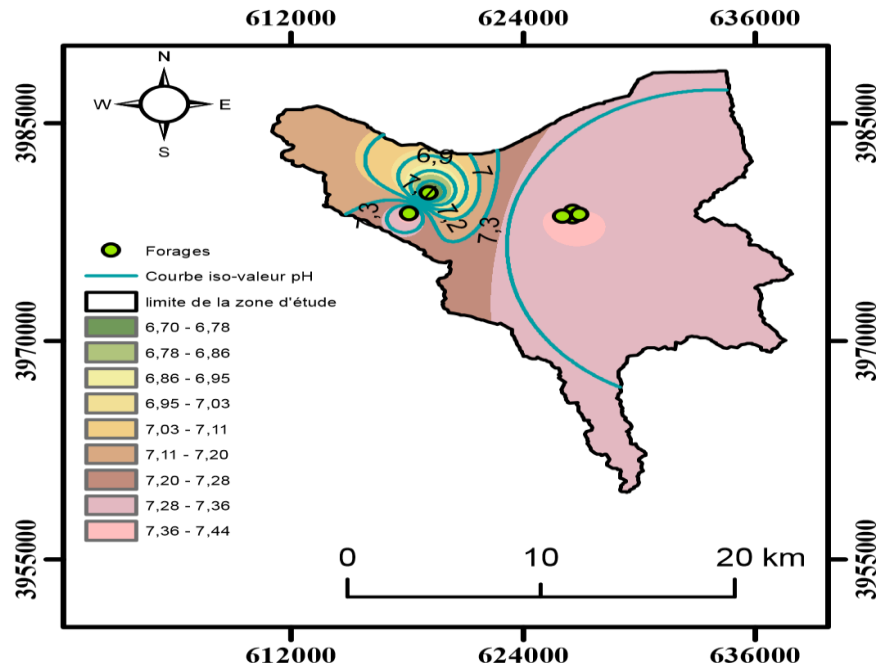


Figure III.3: Carte isovaleurs du pH

III.4.3. Carte de conductivité (CE)

La conductivité d’une eau augmente avec sa teneur en sels dissous, elle permet donc une estimation de la minéralisation. Elle est considérée comme étant la propriété que possède l’eau à permettre au courant électrique de passer [16]. Les conductivités enregistrées au niveau des eaux souterraines sont relativement élevés (entre 719  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et 2775  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) (Fig. III.4). La valeur la plus élevée a été enregistrée à Nord-Ouest au niveau des forages (F4, F5), mais elle est dans la norme de potabilité ( $< 2800 \mu\text{S}/\text{cm}$ ).

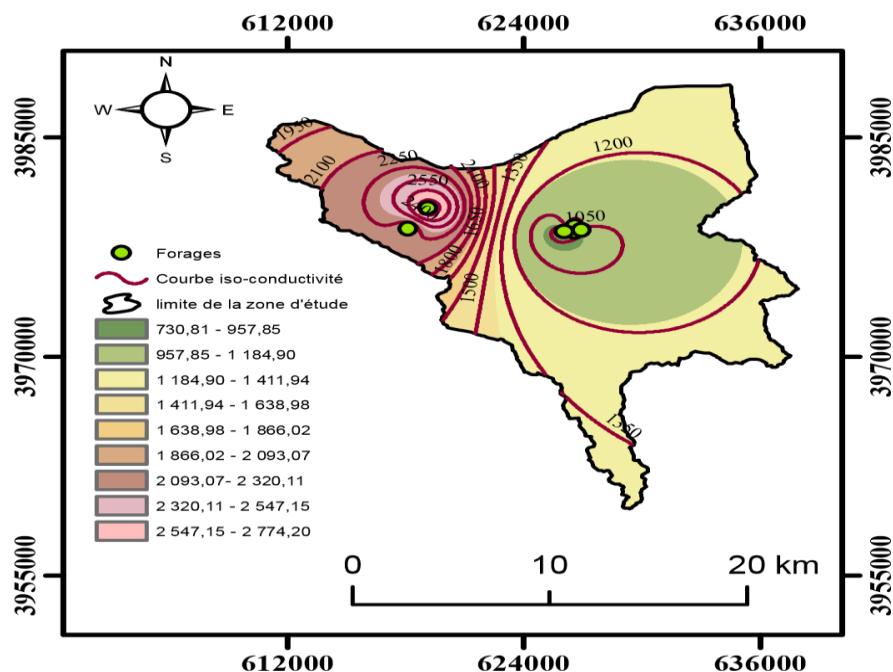


Figure III.4: Carte isovaleurs de la conductivité

**III.4.4. Carte de la température**

C'est un facteur important pour l'activité biologique, il influence la solubilité de l'oxygène du milieu récepteur, donc son pouvoir auto épurateur [17].

Les températures enregistrées au niveau des eaux souterraines sont relativement moyennes (entre 17.85 et 31.4 °C). La valeur la plus élevée a été enregistrée au niveau du forage (F6) avec une température de 31.4 °C (Fig. III.5).

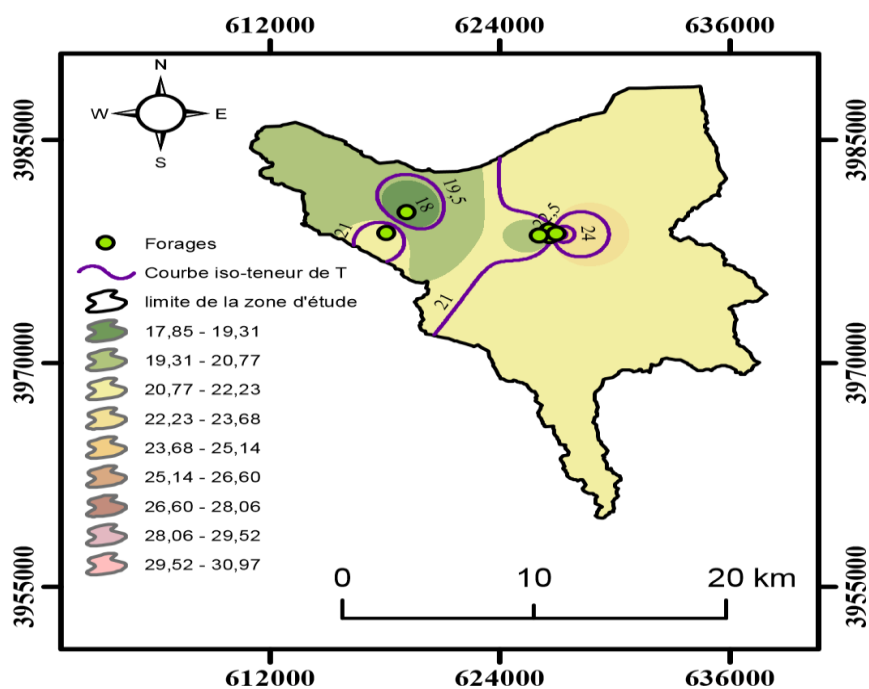


Figure III.5. Carte isovaleurs des températures

**III.4.5. Carte du titre alcalimétrique complet (TAC)**

Il correspond à la teneur en ions  $\text{OH}^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  et  $\text{HCO}_3^-$  pour des pH inférieurs à 8,3, les teneurs en ions  $\text{OH}^-$  et  $\text{CO}_3^{2-}$  sont négligeables. Dans ce cas la mesure de TAC correspondant au dosage des bicarbonates seuls ( $\text{HCO}_3^-$ ) [18].

D'après la carte du TAC, les fortes concentrations sont au niveau des forages (F5, F6). Elles diminuent au niveau du forage (F1) (Fig. III.6).

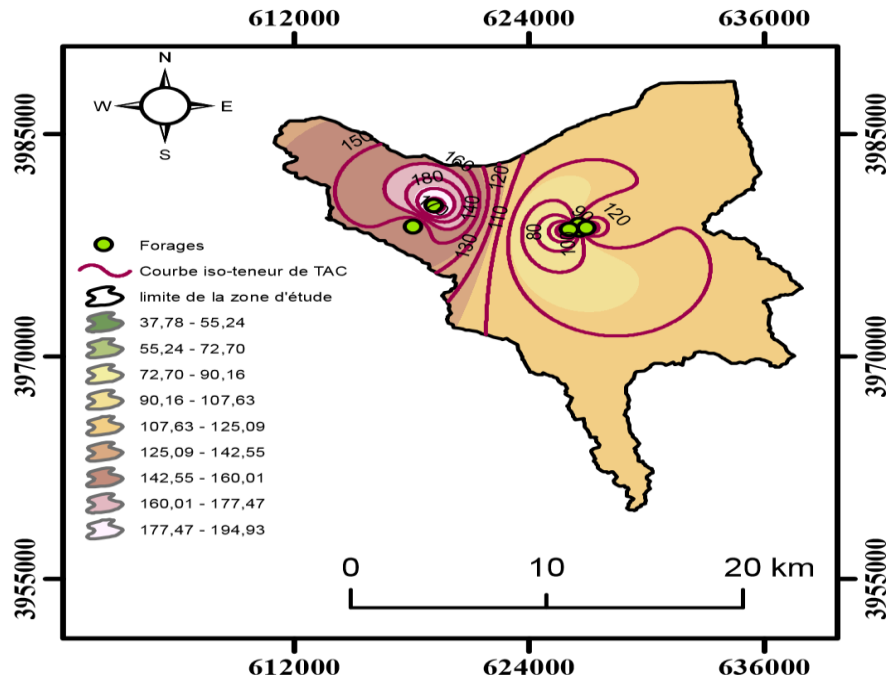


Figure III.6 : Carte isovaleurs du TAC

### III.5.6. Carte des bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ )

Les bicarbonates (hydrogénocarbonates) proviennent de la dissolution des formations carbonatées (calcaire, dolomie) par des eaux chargées en gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ).

La concentration élevée est enregistrées au niveau du Forage (F5 : 457 mg/L) ; cela renseigne sur la dissolution des formations carbonatées, représentées par l'Aptien calcaire (Fig. III.7).

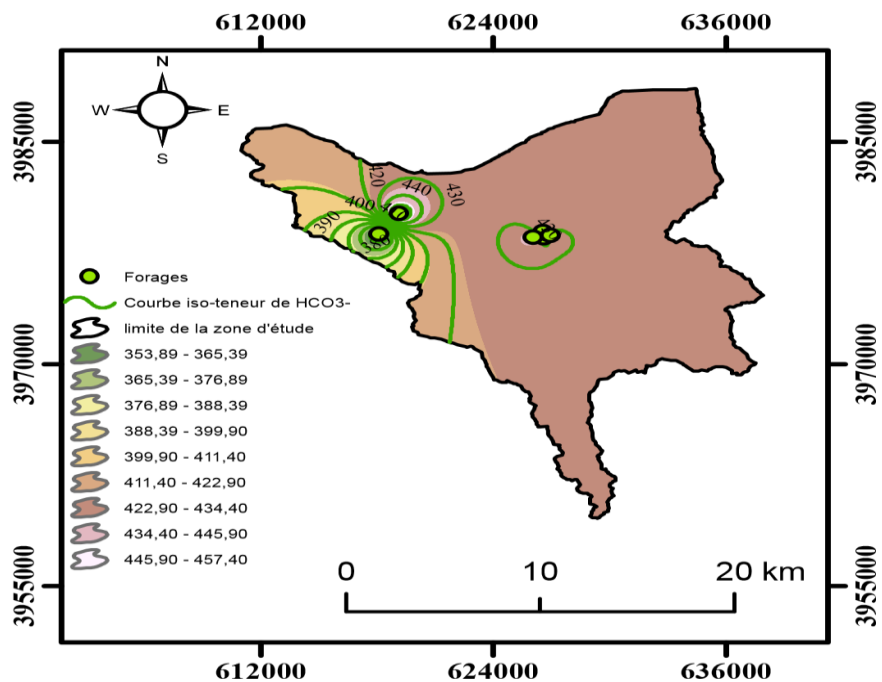


Figure III.7. Carte isovaleurs des bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ )

### III.4.7. Carte des chlorures (Cl<sup>-</sup>)

Les chlorures sont des anions inorganiques importants contenus en concentrations variables dans les eaux naturelles, généralement sous forme de sels de sodium (NaCl) et de potassium (KCl). Ils sont souvent utilisés comme un indice de pollution. Ils ont une influence sur la faune et la flore aquatique ainsi que sur la croissance des végétaux [18].

L'analyse de la carte de teneur en chlorure ci-après, montre que la forte concentration est enregistrée au niveau du forage (F2 : 173 mg/L). La concentration la plus faible est marquée au forage (F6 : 41 mg/L).

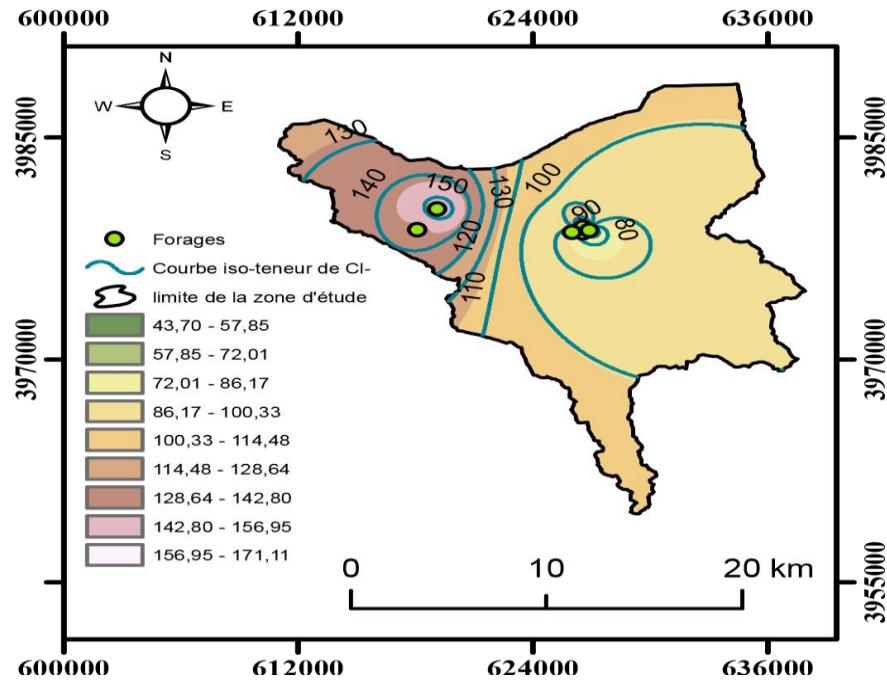


Figure III.8 : Carte isoteneurs des Cl<sup>-</sup>

### III.4.8. Carte des Nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)

La teneur en nitrate enregistrées au niveau des eaux souterraines est relativement faible (entre 1 et 18 mg/L). La valeur la plus élevée a été enregistrée au niveau du forage (F4), mais elle est dans la norme de potabilité (< 50 mg/L) (Fig. III.9).

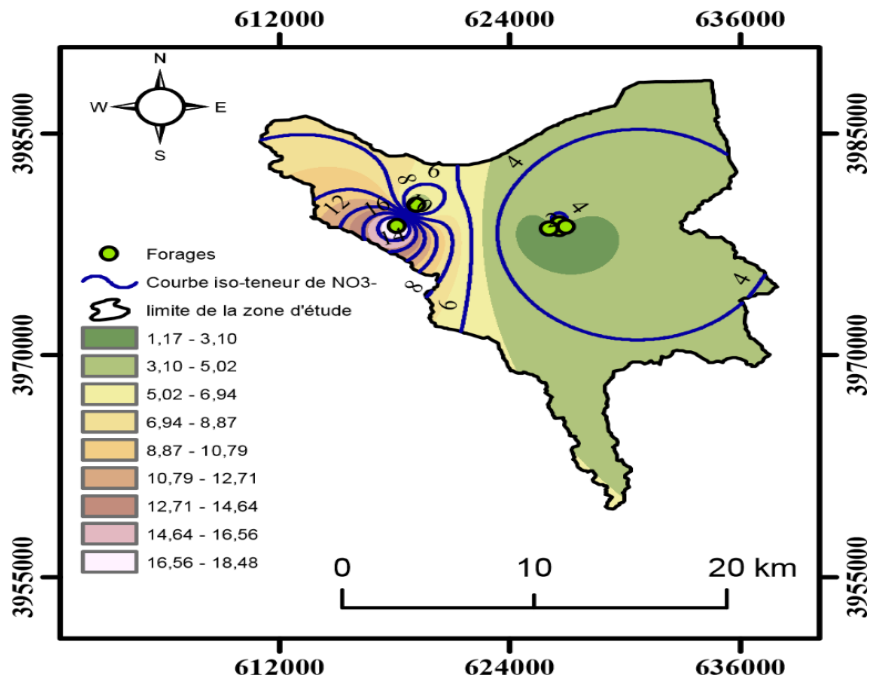


Figure III.9 : Carte isoteneurs du  $\text{NO}_3^-$

III.4.9. Carte des sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ )

Le sulfate est un composé naturel qui correspond à la présence de soufre dans l'eau. Selon la carte ci-après, les fortes concentrations sont au niveau du Nord-Ouest (F4 : 660 mg/L, F5 : 900 mg/L).

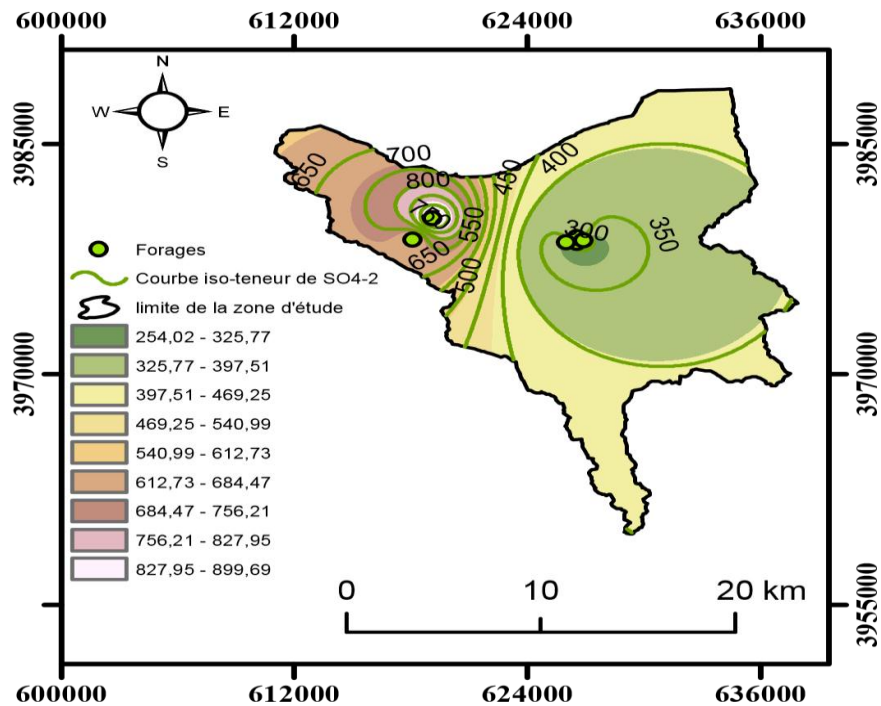


Figure III.10 : Carte isoteneurs du ( $\text{SO}_4^{2-}$ )

### III.4.10. Carte du calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ )

Le calcium est un élément alcalino-terreux extrêmement répandu dans la nature, et en particulier dans les roches calcaires sous forme de carbonates. Fréquent dans les roches sédimentaires sous forme aussi de carbonates ; calcite, dolomite et aragonite [19].

Le calcium est très fréquent dans les eaux naturelles avec des teneurs qui dépendent de la nature géologique des terrains traversés par les eaux souterraines. Cette teneur entre, pour une large part, dans la définition de la dureté de l'eau,...etc.

Il provient essentiellement de la dissolution des roches carbonatées et également des formations gypsifères ( $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ ) suite à la présence du gaz carboniques. Il provoque l'entartrage dans les canalisations, les bouilloires, chauffe-eau et peut avoir des effets négatifs sur l'absorption d'autres minéraux essentiels pour le corps de l'être humain en dépassant la norme [20].

L'analyse de la carte de teneur en calcium (Fig. III.11) montre que la forte concentration est enregistrée au Nord-Ouest de la plaine au niveau du forage (F5 : 234 mg/L). La concentration la plus faible est notée au niveau du forage (F1 : 100 mg/L).

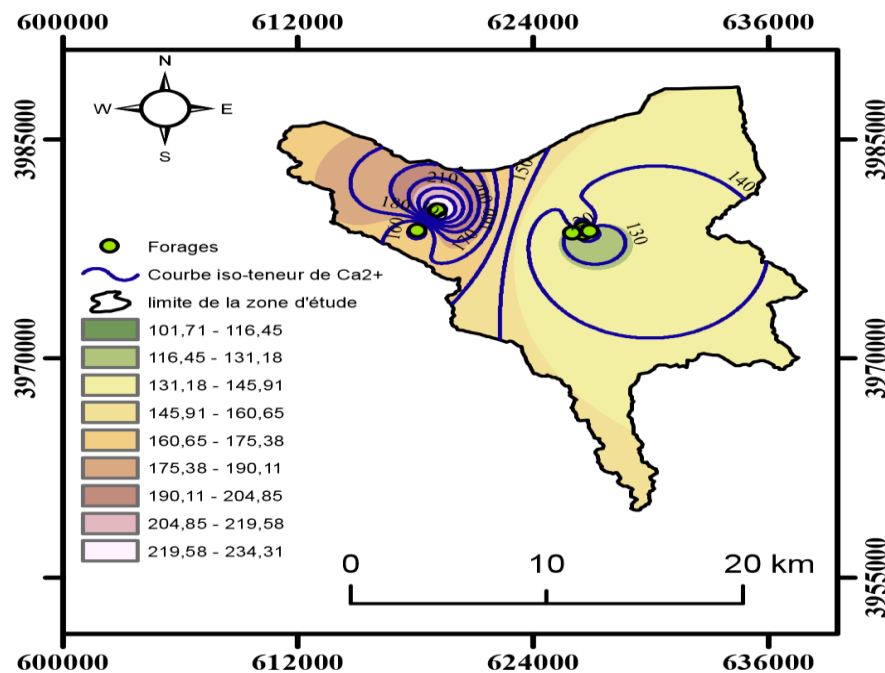


Figure III.11 : Carte isoteneurs du  $\text{Ca}^{2+}$

### III.4.11. Carte du magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ )

La majorité des eaux naturelles contiennent généralement une petite quantité de magnésium, sa teneur dépend de la composition des roches sédimentaires rencontrées. Il provient de l'attaque par l'acide carbonique des roches magnésiennes et de la mise en solution du magnésium sous forme de carbonates et bicarbonates [21].

La concentration du magnésium sont en générale dans la norme de l'OMS (150 mg/L), avec une valeur minimale au niveau du forage (F1: 52 mg/L). Les concentrations maximales sont enregistrées dans la partie Nord, au niveau du F4 et F5 avec une valeur de 138 mg/L et 154 mg/L, respectivement (Fig. III.12).

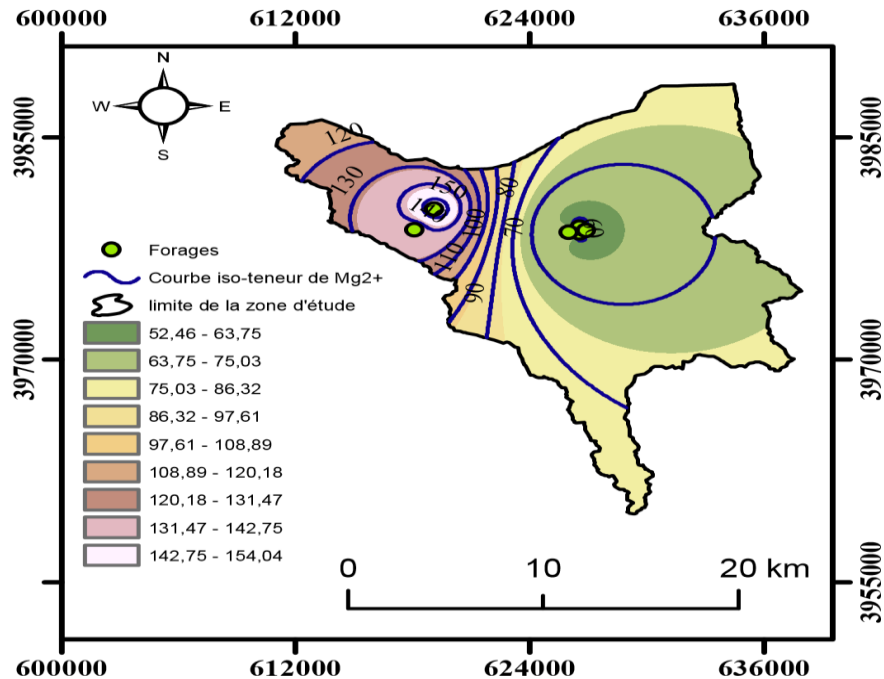


Figure III.12 : Carte isoteneurs du Mg<sup>2+</sup>

#### III.4.12. Carte de sodium (Na<sup>+</sup>)

Le sodium est un élément essentiel dont le corps a besoin pour bien fonctionner. Il permet notamment de maintenir son équilibre hydrique en consommer est donc une nécessité dans l'eau adoucie, seule la teneur en sodium augmente légèrement et le sodium n'a pas de goût.

Le sodium est le plus abondant des éléments alcalins. Ses composés largement répandus dans la nature, et ils représentent 26 g/kg de la croûte terrestre.

L'analyse de la carte de teneur de sodium montre que la forte concentration est enregistrée au niveau du forage F4, avec une teneur de 120 mg/L (Fig. III.13). La concentration la plus faible est marquée au niveau du forage F3, avec une concentration de 8 mg/L).

Les eaux souterraines ont une teneur en sodium allant de 6 à 130 mg/L [22].

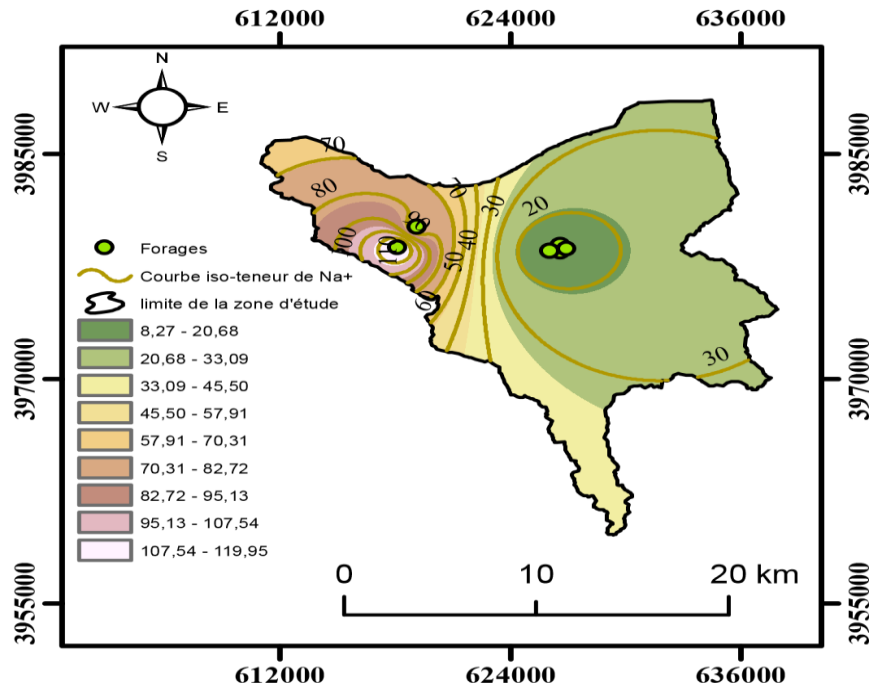


Figure III.13 : Carte isoteneurs du Na<sup>+</sup>

### III.4.13. Carte de potassium (K<sup>+</sup>)

Le potassium provient de l'altération des roches silicatées, des argiles potassiques et de la dissolution des engrais chimiques (NPK, à base d'Azote, Potasse et Phosphore) retrouvés dans les eaux usées agricoles.

La teneur du potassium dans les eaux naturelles est de l'ordre de 10 à 15mg/L à une telle valeur, le potassium ne présente pas d'inconvénients pour la santé des individus [21].

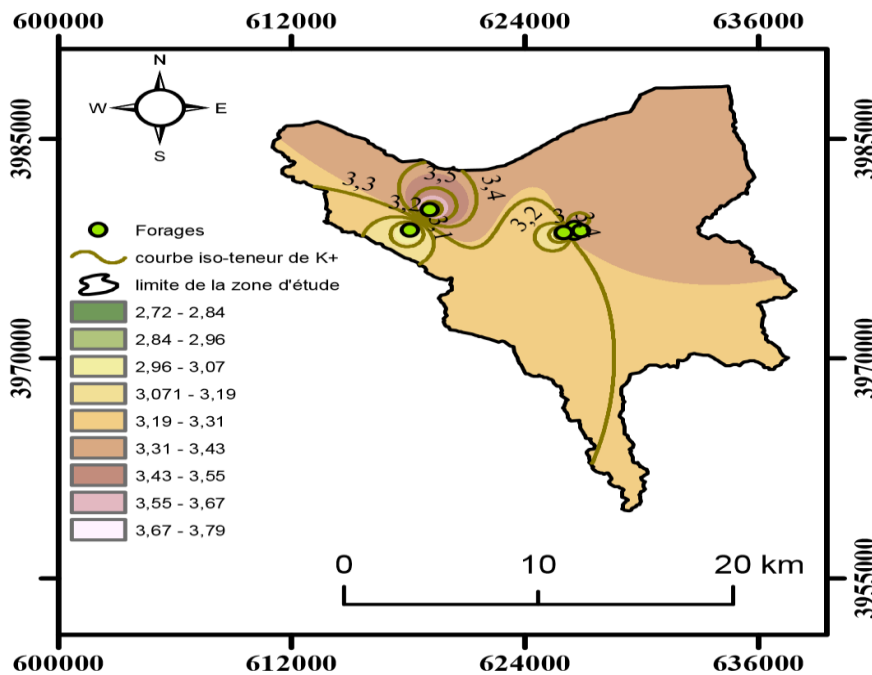


Figure III.14 : Carte isoteneurs du K<sup>+</sup>

### III.4.14. Carte de la turbidité

La turbidité de l'eau souterraine provenant des puits profonds est généralement faible. Elle est surtout d'origine inorganique et ne pose habituellement pas de risque pour la santé.

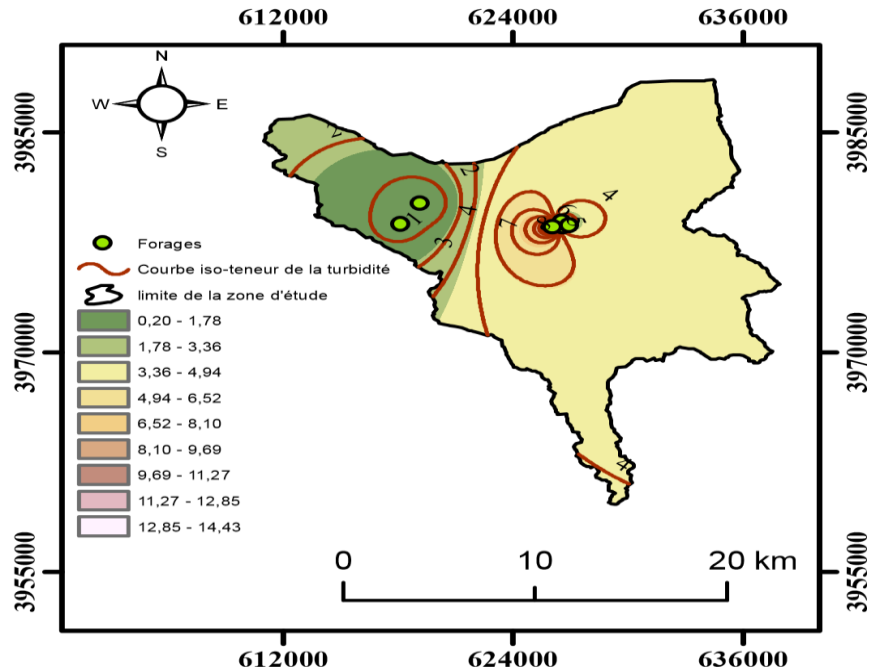


Figure III.15: Carte isovaleurs de la turbidité

### III.4.15. Carte de la salinité

La salinité mesure la concentration d'une eau en sels dissous (chlorure de sodium, chlorure de magnésium, sulfate de magnésium, etc.) au travers de la conductivité électrique de cette eau. Cette salinité est sans unité, mais elle est encore souvent exprimée en gramme de sel par kilogramme d'eau (g/kg), en gramme de sel par litre d'eau (g/L). Généralement, l'eau douce a une salinité de 0 à 0,5 mg/L.

L'analyse de la carte de teneur de la salinité (Fig. III.16) montre que la forte concentration est enregistrée au niveau des forages (F2 : 1,1 mg/L, F4 : 1,1 mg/L, F5 : 1,7 mg/L).

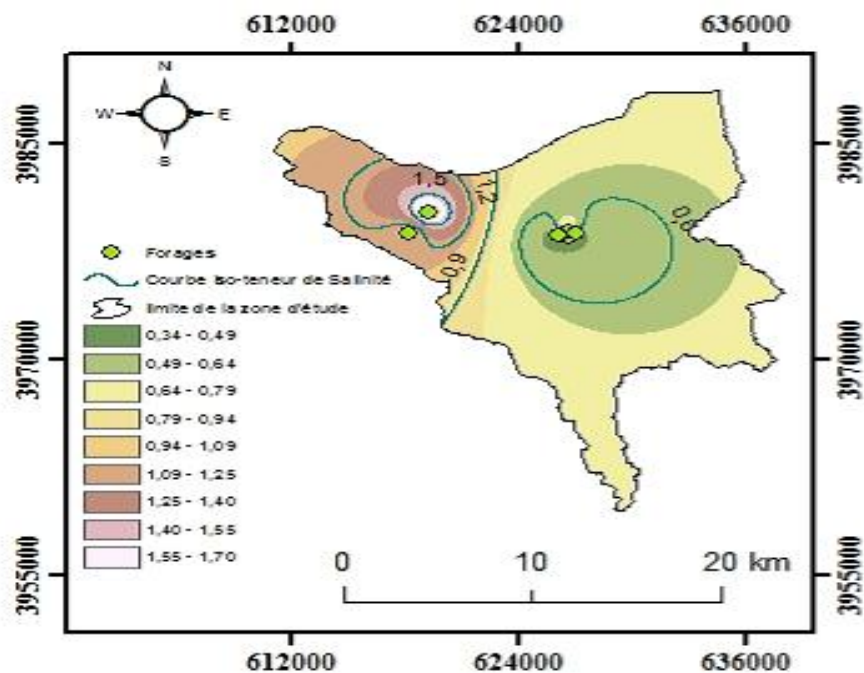


Figure III.16: Carte isovaleurs de salinité

### III.5. Représentation graphique des faciès chimiques

Les faciès chimiques sont couramment utilisés en hydrogéologie pour la description de la composition des eaux naturelles. La classification des eaux naturelles nécessite l'utilisation des représentations graphiques. De ce fait, plusieurs représentations sont utilisées parmi lesquelles on peut citer [14]:

- Le diagramme de Piper.
- Le diagramme semi-logarithmique de Schöeller-Berkaloff.
- Le diagramme de Wilcox.
- Le diagramme à coordonnées rayonnantes.

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

#### III.5.1. Diagramme de Schöeller-Berkaloff

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

L'examen de ce diagramme (Fig. III.17) montre quatre sous-familles de faciès chimiques (2 sulfaté magnésien, 1 sulfaté calcique = famille de faciès sulfaté ; 2 bicarbonaté calcique, 1 bicarbonaté magnésien = famille de faciès bicarbonaté).



Figure III.17: Diagramme de Schöeller-Berkaloff

### III.5.2. Classification de Wilcox

Le diagramme de Riverside et Wilcox, dressé par logiciel DIAGRAMME, permet de mieux gérer la qualité des eaux en fonction de classes du SAR (Sodium Adsorption Ratio) et de la salinité.

L'index de qualité des eaux souterraines, utilisé est le rapport d'adsorption du sodium (SAR) qui exprime l'activité relative des ions de sodium dans les réactions d'échange dans les sols. Cet indice mesure la concentration relative de sodium par rapport au calcium et au magnésium. Il est donné par la relation ci-après.

$$\text{SAR} = \frac{(\text{Na}^+ + \text{K}^+)}{\sqrt{\frac{(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})}{2}}}$$

Où,  $\text{Na}^+$  : Sodium,  $\text{K}^+$  : Potassium,  $\text{Ca}^{2+}$  : Calcium et  $\text{Mg}^{2+}$  : Magnésium.

Une concentration élevée en  $\text{Na}^+$ , réduit la perméabilité du sol, particulièrement en surface, même si le lessivage a lieu. Ce phénomène est lié à la dispersion et au gonflement des argiles lorsque la concentration en  $\text{Na}^+$  échangeable augmente. Une forte concentration en  $\text{Na}^+$  peut provoquer aussi un pH élevé, des maladies, des herbes, et de manque d'oxygène. Toutefois, pour une certaine valeur du SAR, la vitesse d'infiltration augmente ou diminue avec le niveau de salinité.

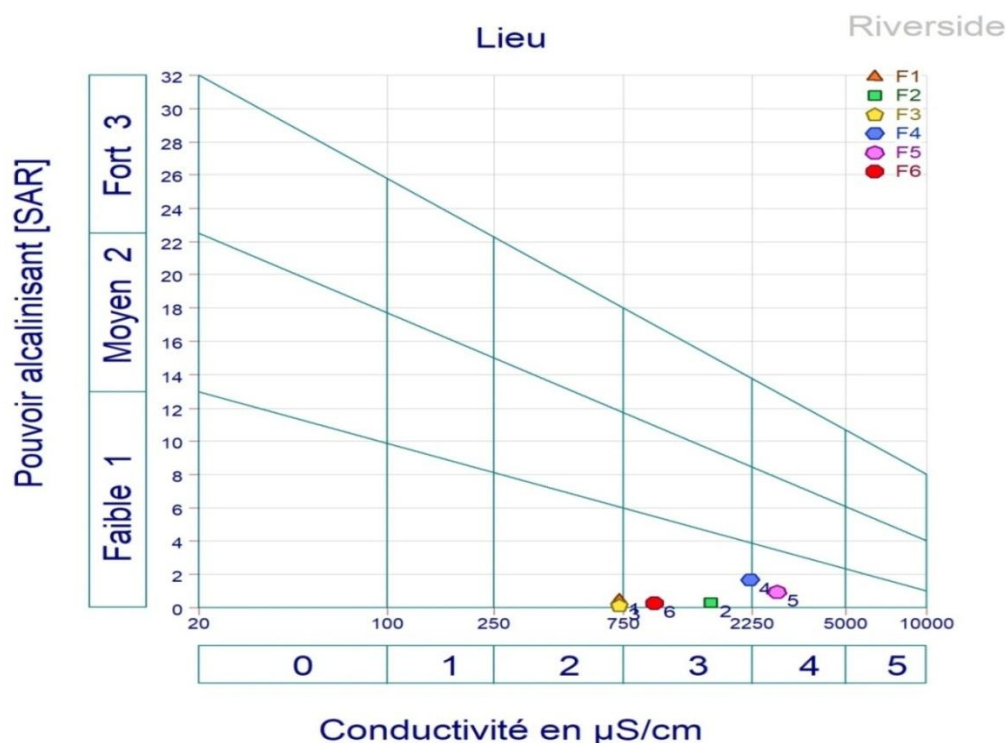


Figure III.18: Classification des eaux pour l'irrigation selon la méthode de Riverside

### III.5.3. Diagramme de Piper

Le diagramme de Piper permet de représenter le faciès chimique d'un ensemble d'échantillons d'eau. Il est composé de deux triangles permettant de représenter le faciès cationique et le faciès anionique et d'un losange synthétisant le faciès global. Les nuages de points concentrés dans un pôle représentent pour les différents échantillons la combinaison des éléments cationiques et anioniques. Le diagramme de Piper est particulièrement adapté à l'étude de l'évolution des faciès des eaux lorsque la minéralisation augmente, ou bien pour comparer des groupes d'échantillons entre eux et indiquer les types de cations et anions dominants.

La projection des résultats des analyses des eaux prélevées sur le diagramme de Piper (Fig. III.19) montre que le faciès chimique variant entre bicarbonaté calcique magnésien, et sulfaté magnésien et calcique.

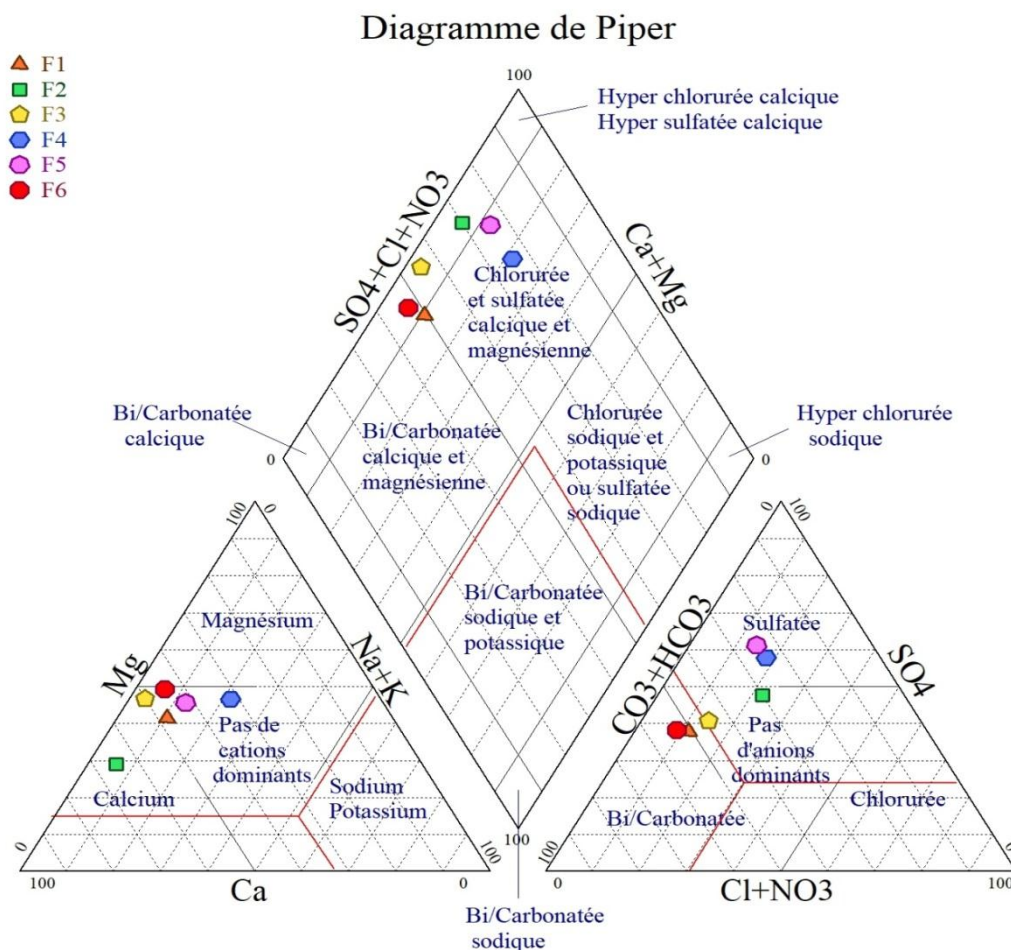


Figure III.19: Diagramme de Piper

### III.6. Norme de l'eau potable

#### III.6.1. Définition

La norme est traditionnellement l'un des modes d'expression privilégiés de souveraineté. Une norme désigne un état habituellement répandu ou moyen considéré le plus souvent comme une règle à suivre. Ce terme générique désigne un ensemble de caractéristiques décrivant un objet, un être, qui peut être virtuel ou non. Tout ce qui *entre* dans une norme est considéré comme "normal", alors que ce qui en sort est "anormal". Ces termes peuvent sous-entendre ou non des jugements de valeur (*Organisation Mondiale de la Santé OMS*).

#### III.6.2. Les normes de consommation d'une eau potable

Une eau potable est une eau qu'on peut boire sans risque pour la santé. Afin d'avoir une eau potable, des normes ont été établies qui fixent notamment les teneurs limites à ne pas dépasser pour un certain nombre de substances nocives et susceptibles d'être présentes dans l'eau. Le fait qu'une eau soit conforme aux normes, c'est-à-dire potable, ne signifie donc pas qu'elle soit exempte de matières polluantes, mais que leur concentration a été jugée suffisamment faible pour ne pas mettre en danger la santé du consommateur.

Selon ces normes, une eau potable doit être exempte de germes pathogènes (bactéries, virus) et d'organismes parasites, car les risques sanitaires liés à ces microorganismes sont grands. Elle ne doit pas contenir certaines substances chimiques ou de toxiques, comme les nitrates et les phosphates, les métaux lourds, ou encore les hydrocarbures et les pesticides. A l'inverse, la présence de certaines substances peut être jugée nécessaire comme les oligo-éléments indispensables à l'organisme. Une eau potable doit aussi être une eau agréable à boire ; être claire, avoir une bonne odeur et un bon goût. Pour avoir un bon goût, il lui faut contenir un minimum de sels minéraux dissous (de 0.1 à 0.5 g/L), lesquels sont par ailleurs indispensables à l'organisme. Enfin, elle ne doit pas corroder les canalisations afin d'arriver "propre" à la sortie des robinets [23].

### III.7. Qualité chimique des eaux

#### III.7.1. Potabilité des eaux

L'appréciation de la qualité des eaux de la zone étudiée se fait à partir des normes de qualité, basées sur les paramètres physicochimiques, bactériologiques et organoleptiques [24]. A chaque paramètre est affecté une valeur guide ou idéale et une valeur maximale admissible (CMA). Dans ce travail, seule la potabilité de point de vue chimique a été prise comme critère de potabilité tout en se référant aux normes algériennes. Le tableau ci-après montre que la majorité des forages sont de mauvaise qualité, la qualité peut être classée comme médiocre.

**Tableau III.2 : Potabilité des eaux souterraines de la zone d'étude**

Remarque	Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	pH	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> (mg/L)	TH	/
<b>Norme</b>	<b>200</b>	<b>150</b>	<b>200</b>		<b>6.5 - 8.5</b>	<b>400</b>	<b>50</b>	<b>Potable</b>
<b>F1</b>	100	52,002	65,46	427	7,45	251.667	<b>127,4</b>	Mauvaise
<b>F2</b>	197,33	53,30	173,07	410,66	7,22	<b>513.333</b>	<b>191,33</b>	Mauvaise
<b>F3</b>	127,2	72,17	81,36	442,25	7,39	316.667	<b>61,5</b>	Médiocre
<b>F4</b>	156	138,55	142,27	353,8	7,41	<b>660</b>	<b>510</b>	Mauvaise
<b>F5</b>	<b>234,4</b>	<b>154,072</b>	153,50	457,5	6,7	<b>900</b>	<b>644</b>	Mauvaise
<b>F6</b>	104	69,66	41,322	439,2	7,39	250	<b>180,66</b>	Mauvaise

### III.8. Etude statistique des données hydrochimiques

#### III.8.1. Statistique descriptive

L'analyse statistique des données hydrochimiques est basée sur la description quantitative (le minimum, le maximum, la moyenne, l'écart-type et le coefficient de variation).

- **Le minimum et le maximum**

*Ils représentent la plus grande et la plus petite valeur de l'échantillon.*

- **La moyenne arithmétique**

*La moyenne arithmétique d'une série quantitative est définie par la somme des valeurs observées, divisée par l'effectif total.*

- **L'écart-type**

*L'écart-type observé correspond à la racine carrée de la variance observée.*

- **Le coefficient de variation (CV)**

*Le coefficient de variation est le rapport entre l'écart-type et la moyenne.*

Les résultats statistiques des variables chimiques des eaux souterraines de la zone d'étude sont résumés dans le tableau ci-après et comparés aux normes algériennes [10].

**Tableau III.3: Résultats statistiques des variables physicochimiques des eaux souterraines de la zone d'étude**

Variable	Observations sans données manquantes	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	6	353,800	457,500	421,736	36,798
Cl <sup>-</sup> (mg/L)	6	41,322	173,075	109,500	53,723
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	6	1,075	18,500	5,595	6,754
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> (mg/L)	6	250,000	900,000	481,945	261,382
Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	6	100,000	234,400	153,156	53,807
Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	6	52,002	154,072	89,960	44,686
Na <sup>+</sup> (mg/L)	6	8,000	120,000	43,722	44,716
K <sup>+</sup> (mg/L)	6	2,700	3,800	3,308	0,418
T (°C)	6	17,850	31,400	21,130	5,235
pH	6	6,700	7,450	7,260	0,286
Conductivité (μS/cm)	6	719,500	2775,000	1497,527	850,372
Turbidité (NTU)	6	0,200	14,700	3,622	5,561
TAC (°F)	6	36,250	195,000	122,568	58,877
TH (°F)	6	61,500	644,000	285,815	234,074
Salinité (mg/L)	6	0,330	1,700	0,822	0,568

Les résultats des coefficients de corrélation entre les variables sont résumés dans le tableau suivant.

**Tableau III.4: Matrice de corrélation entre les paramètres chimiques des eaux souterraines de la zone d'étude**

Variable	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	T	pH	Cond	Turb	TAC	TH	Sal
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1														
Cl <sup>-</sup>	-0,340	1													
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<b>-0,921</b>	0,578	1												
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-0,128	<b>0,809</b>	0,483	1											
Ca <sup>2+</sup>	0,056	<b>0,892</b>	0,283	<b>0,907</b>	1										
Mg <sup>2+</sup>	-0,185	0,470	0,513	<b>0,868</b>	0,599	1									
Na <sup>+</sup>	-0,618	0,520	<b>0,822</b>	<b>0,748</b>	0,434	<b>0,870</b>	1								
K <sup>+</sup>	0,187	0,466	-0,111	0,339	0,530	-0,057	-0,036	1							
T	-0,014	-0,577	-0,053	-0,396	-0,486	-0,116	-0,127	-0,287	1						
pH	-0,454	-0,563	0,099	<b>0,815</b>	<b>0,868</b>	-0,616	-0,284	-0,527	0,344	1					
Cond	-0,454	<b>0,771</b>	0,552	<b>0,981</b>	<b>0,859</b>	<b>0,880</b>	<b>0,801</b>	0,359	-0,242	-0,765	1				
Turb	0,308	-0,454	-0,410	-0,484	-0,430	-0,315	-0,487	-0,748	-0,079	0,356	-0,604	1			
TAC	0,025	0,260	0,230	0,600	0,478	0,618	0,504	0,428	0,391	-0,598	0,719	-0,756	1		
TH	-0,201	0,597	0,527	<b>0,930</b>	<b>0,714</b>	<b>0,946</b>	<b>0,867</b>	0,254	-0,149	-0,707	<b>0,965</b>	-0,590	0,758	1	
Sal	-0,106	<b>0,869</b>	0,449	<b>0,978</b>	<b>0,956</b>	<b>0,759</b>	0,658	0,502	-0,397	-0,835	<b>0,967</b>	-0,583	0,626	<b>0,878</b>	1

### III.8.2. Analyse en composantes principales (ACP)

Cette analyse multidimensionnelle des données est une méthode factorielle et linéaire qui traite des caractères numériques (dans notre cas, les résultats des analyses physicochimiques). Elle permet de mettre en évidence les ressemblances chimiques entre les différentes eaux et/ou les différents pôles d'acquisition de la minéralisation. Le principe de l'ACP consiste à déterminer la corrélation des variables et de regrouper ces variables en ensembles dans des familles de même origine. Ces ensembles des variables nouvelles, appelées composantes principales, définissent des plans factoriels qui servent de base à une représentation graphique plane des variables initiales. L'interprétation des résultats se restreint généralement aux deux premiers plans factoriels, sous réserve que ceux-ci expliquent la majeure partie de la variance du nuage des variables initiales [10].

Au cours de ce travail, une analyse statistique (ACP) a été réalisée à l'aide du logiciel XLSTAT (2014). Les données portent sur l'ensemble des analyses relatives aux six forages. Les 15 variables traitées, concernent les paramètres physico-chimiques suivants : Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Conductivité, pH, TH, Turbidité, T, TAC et Salinité. Les coefficients de corrélation entre les éléments sont reportés dans le [Tableau \(III.4\)](#).

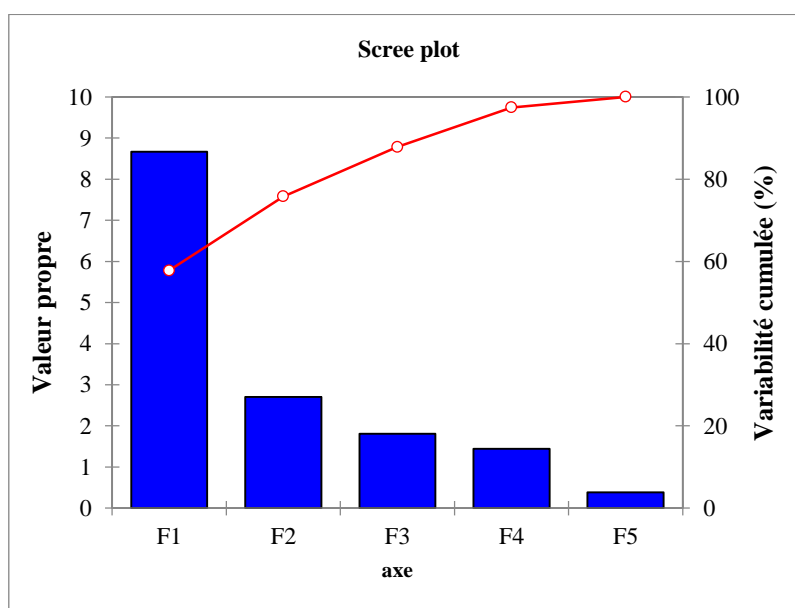
#### 1. Etude des valeurs propres

Une valeur propre représente la variation des individus sur l'axe correspondant. Dans le but de faciliter leur interprétation, met en évidence les valeurs propres de chaque axe factoriel, ces valeurs sont exprimées en pourcentage de variance totale ainsi que leur cumul.

Le premier axe principal a une valeur propre égale à **8.666**, il explique **57.775 %** de la variance totale. La seconde composante égale à **2.702** correspond à un pourcentage de **18.014 %**. Ces deux premiers axes englobent l'ensemble de l'information avec **18.014 %** de la variance totale. Si on fait les trois facteurs (axes), ils traduisent l'essentiel des informations recherchées et permettent de représenter de manière significative le nuage de points car la somme de la variance exprimée par ces facteurs est de l'ordre de **87.828 %**. Ces derniers sont jugés suffisants pour une approche d'analyse des variables et des individus ([Tableau III.5](#), [Fig. III.20](#)).

**Tableau III.5: Valeurs propres des axes et leurs contributions**

	<b>F1</b>	<b>F2</b>	<b>F3</b>
<b>Valeur propre</b>	8,666	2,702	1,806
<b>Variabilité (%)</b>	57,775	18,014	12,039
<b>% cumulé</b>	57,775	75,789	87,828



**Figure III.20 : Valeurs propres des axes et leurs contributions**

## 2. Etude des variables

La contribution de chaque variable dans la formation d'une composante principale est donnée par le coefficient de corrélation entre la variable et l'axe considéré. Plus le coefficient est important, plus la variable contribue à la formation de l'axe. Les résultats sont résumés dans le [Tableau \(III.6\)](#).

Tableau III.6: Corrélation entre les variables et les facteurs

	F1	F2	F3
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	-0,229	<b>0,889</b>	0,183
Cl <sup>-</sup> (mg/L)	<b>0,814</b>	0,030	-0,460
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	0,558	<b>-0,785</b>	-0,157
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	<b>0,978</b>	0,066	-0,110
Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	<b>0,876</b>	0,348	-0,236
Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	<b>0,834</b>	-0,211	0,109
Na <sup>+</sup> (mg/L)	<b>0,786</b>	-0,559	0,027
K <sup>+</sup> (mg/L)	0,437	0,566	0,101
T (°C)	-0,305	-0,279	<b>0,846</b>
pH	<b>-0,759</b>	-0,609	-0,046
Conductivité (μS/cm)	<b>0,994</b>	-0,022	0,046
Turbidité (NTU)	-0,651	0,027	-0,419
TAC (°F)	0,693	0,074	0,714
TH (°F)	<b>0,946</b>	-0,103	0,176
Salinité (mg/L)	<b>0,979</b>	0,159	-0,097

- Le facteur F1 est corrélé positivement aux : Ca<sup>2+</sup>, pH, TH, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, conductivité, salinité.
- Le facteur F2 est corrélé positivement aux : HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.
- Le facteur F3 est corrélé positivement à la température (T).

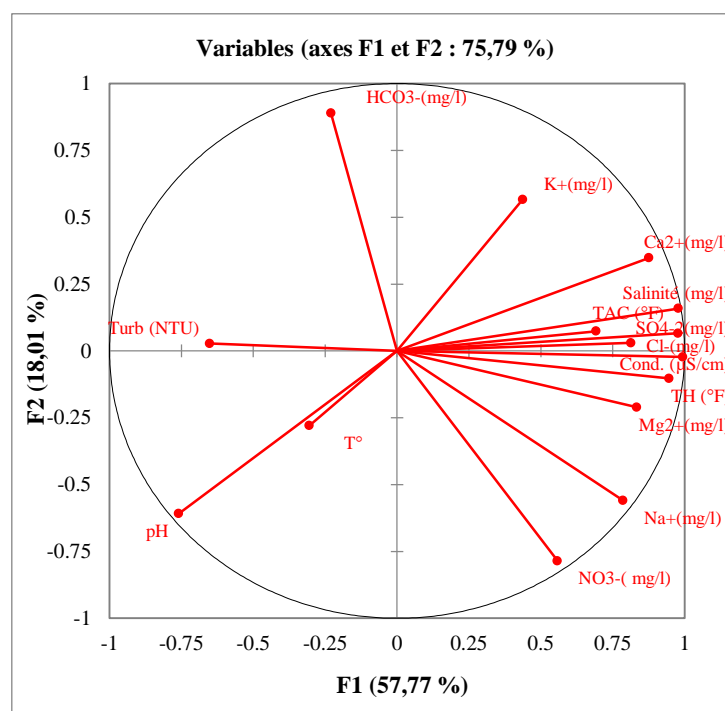


Figure III.21: Cercle de corrélation des variables sur le plan factoriel (F1 et F2)

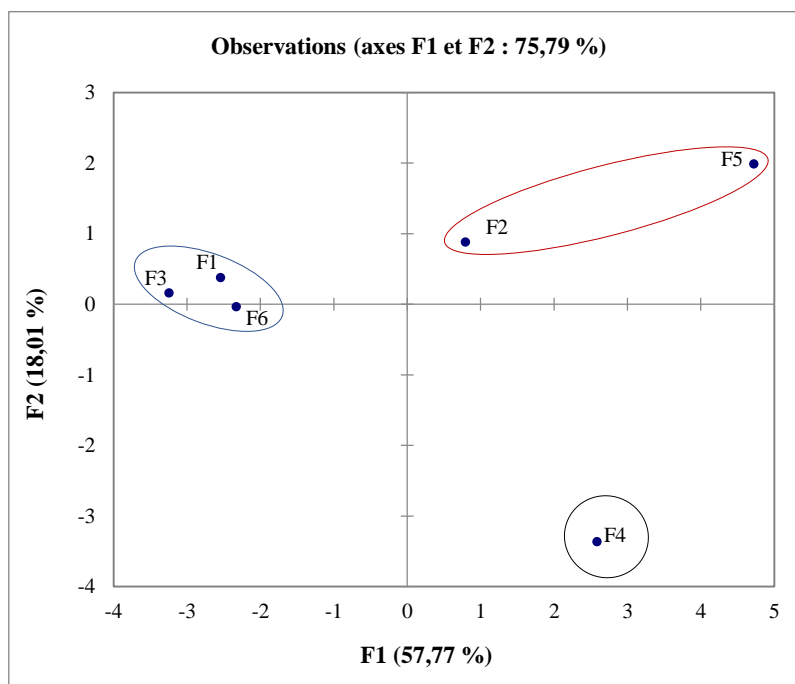


Figure III.22: Projection des individus sur le plan factoriel (F1-F2)

Presque toutes les variables sont bien représentées dans ce plan factoriel car leurs corrélations avec les axes sont relativement importantes (les projections sont proches du cercle de corrélation sauf la turbidité, la température,  $\text{Cl}^-$  et  $\text{K}^+$ ). L'interprétation que l'on peut faire des deux premiers axes factoriels est la suivante :

- Le premier axe factoriel exprimé par 57.77 % est corrélé positivement aux:  $\text{Ca}^{2+}$ , TAC, TH,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$ , conductivité, salinité, pH et d'un degré moindre aux  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ . C'est le pôle des minéralisations, il est en bonne partie issue de l'interaction eau-roche.
- Le second axe factoriel F2 exprimé par 18.01% est corrélé positivement aux  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{K}^+$ .

L'examen de l'espace factoriel de la Figure (III.22) montre des groupements d'individus formant ainsi différentes familles d'eaux, où nous remarquons que presque tous les points d'eau sont regroupés excepté un point qui s'écarte clairement (F4).

Selon ces résultats, On distingue trois (03) groupes :

- o **Groupe 1** : rassemble les points d'eau (F1, F3, F6) sont des points d'eau qui se caractérisent par les plus fortes teneurs en turbidité et en  $\text{HCO}_3^-$ .
- o **Groupe 2** : rassemble les points d'eau (F2 et F5) caractérisé par une forte minéralisation surtout en  $\text{Ca}^{2+}$ , TAC,  $\text{SO}_4^{2-}$ , salinité. Ces forages captent des eaux carboniques.
- o **Groupe 3**: s'individualise par le point (F2) qui se caractérise par des teneurs élevées en  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$ , conductivité et TH. Ce point d'eau capte des eaux carboniques et

vraisemblablement de la pollution anthropique des nitrates. Il présente une tendance à une dureté à une concentration en  $Mg^{2+}$  élevée et la dissolution du gypse et des eaux chlorurées calciques et présente une minéralisation élevée traduit par la conductivité élevée, cela s'explique possiblement du rapprochement du Chott el Hodna et l'influence des eaux salées ou saumâtres.

### **III.8.3. Classification Ascendante Hiérarchique**

La classification ascendante hiérarchique (CAH) a pour objectif de constituer des groupes homogènes d'objets (classes) sur la base de leur description par un ensemble de variables, ou à partir d'une matrice décrivant la similarité ou la dis-similarité entre les objets. La CAH permet de construire une hiérarchie entière des objets sous la forme d'un "arbre" dans un ordre ascendant.

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 classes dans lesquelles les données peuvent être regroupées. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle est lente. Par ailleurs, le dendrogramme peut devenir illisible si on l'utilise avec trop de données. La CAH permet donc d'obtenir une représentation schématique simple d'un tableau de données complexe à partir d'une typologie (segmentation), c'est à dire d'une partition des  $n$  individus dans des classes, définies par l'observation de  $p$  variables [10].

#### **III.8.3.1. Principe de la CAH**

La CAH est une méthode de classification itérative dont le principe est le suivant : Nous commençons par calculer la dis-similarité entre les  $N$  objets. Puis nous regroupons les deux objets dont le regroupement minimise un critère d'agrégation donné, créant ainsi une classe comprenant ces deux objets. Nous calculons ensuite la dis-similarité entre cette classe et les  $(N-2)$  autres objets en utilisant le critère d'agrégation. Puis nous regroupons les deux objets ou classes d'objets dont le regroupement minimise le critère d'agrégation. Nous continuons ainsi jusqu'à ce que tous les objets soient regroupés. Ces regroupements successifs produisent un arbre binaire de classification (dendrogramme) (Fig. III.23), dont la racine correspond à la classe regroupant l'ensemble des individus. Ce dendrogramme représente une hiérarchie de partitions. Nous pouvons alors choisir une partition en tronquant l'arbre à un niveau donné, le niveau dépendant soit des contraintes de l'utilisateur (l'utilisateur sait combien de classes il veut obtenir), soit de critères plus objectifs [10].

#### **III.8.3.2. Application de CAH sur les résultats d'analyses des eaux de la région**

Pour essayer de regrouper ces eaux en un nombre limité de groupes (classes), ces derniers auront deux propriétés :

- L'homogénéisation dans chaque classe et disparité entre les classes.

- Classes non prédéfinies mais découvertes au cours de l'opération.

Nous avons utilisé le code de calcul XLSTAT(2014), afin de regrouper les forages ayant des profils chimiques similaires. Le nombre d'individus est de 6 (forages) et les variables de 15. La méthode du lien complet a été choisie pour cerner la plus grande distance entre deux groupes. Pour la distance entre ces groupes c'est la distance euclidienne qui a été prise en considération vu sa fréquente utilisation dans ce genre de données [10].

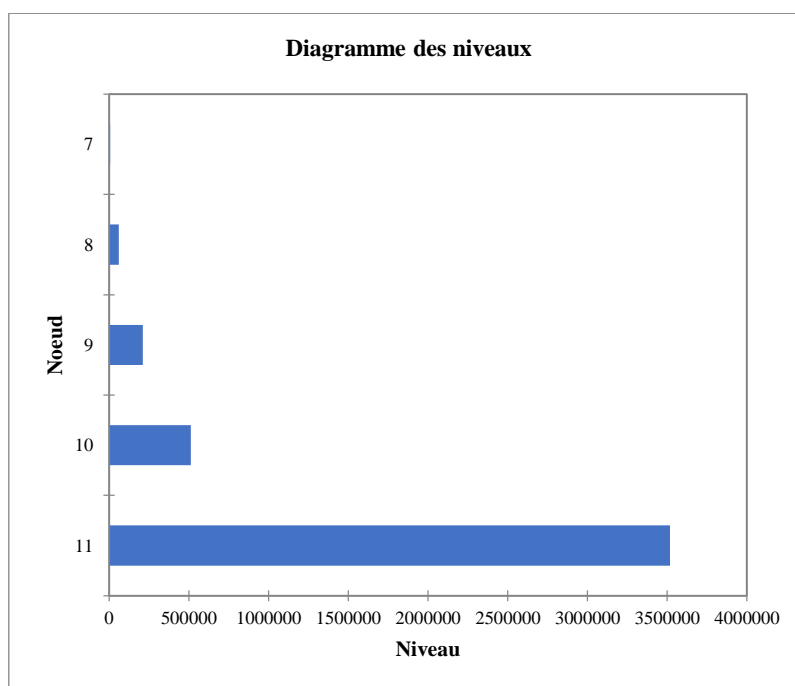
Les résultats de cette méthode sont les suivants.

#### a) Statistiques des nœuds

Le [Tableau \(III.7\)](#) regroupe les résultats concernant les nœuds successifs et les pertes d'inertie lors du passage d'une classe à une autre classe.

**Tableau III.7 : Nœuds successifs du dendrogramme**

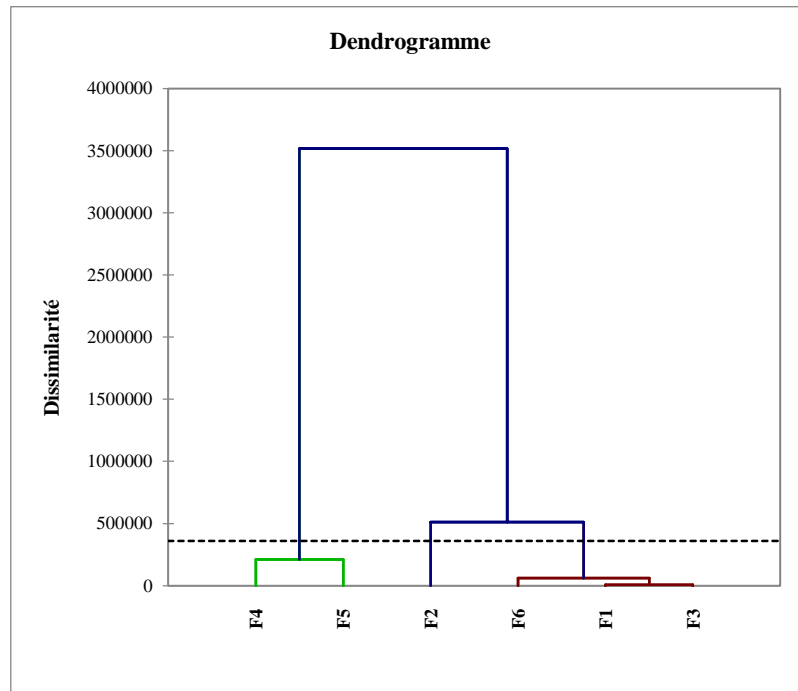
Nœud	Niveau	Poids
11	3517178,856	6
10	511402,264	4
9	210218,519	2
8	59677,896	3
7	6252,436	2



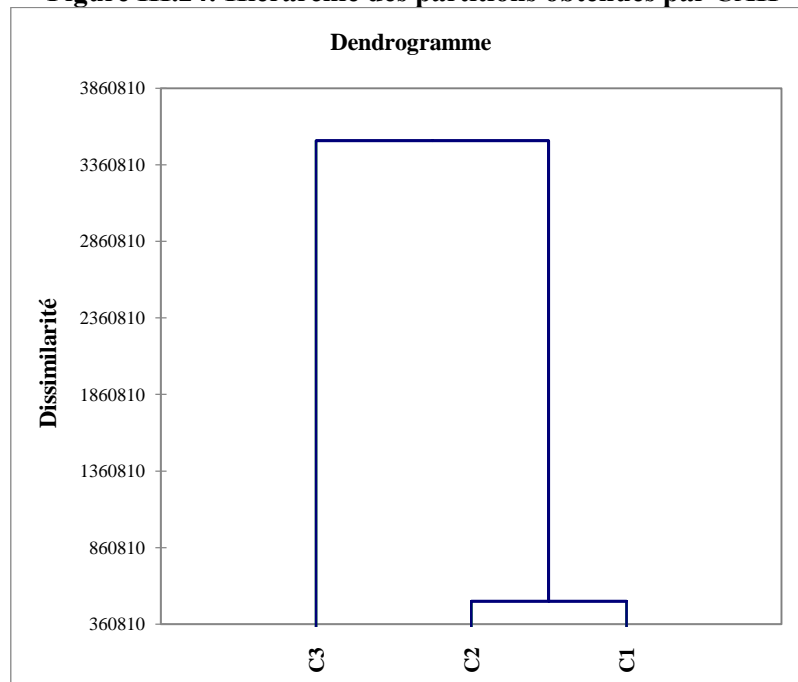
**Figure III.23: Diagramme des niveaux**

**b) Dendrogramme**

Le dendrogramme permet de visualiser le regroupement progressif des forages. Si une troncature a été demandée, un trait en pointillé marque le niveau auquel est effectuée la troncature, cette dernière permet de visualiser les classes. Dans notre cas, nous distinguons 3 classes (Figs. III.24, III.25).



**Figure III.24: Hiérarchie des partitions obtenues par CAH**



**Figure III.25: Hiérarchie des partitions (intra-classes et interclasses) obtenues par CAH**

Le tableur XLSTAT nous fournit en plus du dendrogramme les barycentres des classes (Tableau III.8).

**Tableau III.8 : Barycentres des classes**

Classe	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	T	pH	Cond	Turb	TAC	TH	Sal
1	436,15 0	62,71 7	1,317	272,77 8	110,40	64,611	15,50	3,13 3	22,90 7	7,41 0	807,38 7	6,810	95,750	123,18 7	0,34
2	410,66 7	173,0 75	7,367	513,33 3	197,33 3	53,30 7	19,33 3	3,80 0	18,36 0	7,22 0	1581,0	0,310	111,660	191,33 0	1,10
3	405,65 0	147,8 86	11,12 5	780,00	195,20	146,31 1	98,25	3,32 5	19,85	7,05 5	2491,0	0,495	168,25	577,00	1,40

Les trois groupes préliminaires visualisés par l'examen du dendrogramme pour la période (2018-2019-2020-2022) donnent les mêmes résultats et chaque groupe représente un faciès hydrochimique ; ce qui nous amène à une analyse et interprétation unique.

La conductivité électrique semble être un facteur distinctif majeur avec des concentrations croissantes dans tous les principaux ions des groupes 1, 2 et 3 (Tableau III.8).

- **Le groupe 1** : est composé des forages : F1, F3, F6. La conductivité électrique est de 807,387  $\mu\text{S/cm}$
- **Le groupe 2** : est représenté par le forage F2. La conductivité électrique est 1581  $\mu\text{S/cm}$ .
- **Le groupe 3** : est représenté par les forages : F4, F5. La conductivité électrique est 2491 ( $\mu\text{S/cm}$ ).

#### III.8.4. Analyse factorielle des correspondances (AFC)

Les méthodes d'analyses factorielles ont été initialement développées en France par *Jean-Paul Benzécri* au début des années 1960 [25]. Des techniques similaires ont été développées indépendamment dans différents pays, où elles sont plus connues sous les noms de graduation optimale, de moyennes réciproques, de scoring optimal, de méthode de quantification ou d'analyse d'homogénéité.

L'AFC est une analyse factorielle, et le terme "correspondances" signifie que sont étudiées les liaisons entre deux variables nominales, par opposition à la corrélation qui s'intéresse aux liens entre variables numériques.

Les deux buts principaux d'une analyse factorielle sont d'une part de détecter des proximités, et d'autre part de faire apparaître quelques variables synthétiques abstraites décarrelées entre elles (réduction de dimensionnalité). Ce second attrait ne constitue toutefois pas le but majeur de l'AFC. Le principe de l'AFC est l'étude de l'inertie du nuage de points ayant pour coordonnées les valeurs présentes sur les lignes du tableau de données. Les objectifs de l'AFC sont similaires à ceux de l'ACP : obtenir une typologie des lignes et des colonnes et étudier le lien entre ces deux typologies. Cependant, le concept de similarité entre les lignes et les colonnes est différent.

Ici, la similarité entre deux lignes ou deux colonnes est complètement symétrique. Deux lignes (resp. Colonnes) sont proches l'une de l'autre si elles s'associent aux colonnes (resp. Lignes) de la même façon. On recherche les lignes (resp. Colonnes) dont la distribution est la plus différente de celle de la population. Celles qui semblent le plus ou le moins semblable. Chaque groupe de lignes (resp. Colonnes) est caractérisé par les colonnes (resp. Lignes) auxquelles il est complètement ou peu associé.

### 1) Le graphique symétrique

Aussi appelé représentation barycentrique. Il utilise exclusivement les coordonnées principales mélangeant points-lignes et points-colonnes. Le pourcentage d'inertie correspondant à chacun des axes concernés et le pourcentage d'inertie cumulée du graphique sont affichés. La proximité entre deux modalités sur le graphique est représentative de leur association.

L'application de l'AFC nous permet de conclure :

- les forages F1, F2, F3, F5 et F6 sont à conjonction avec les éléments  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{K}^+$ , turbidité, température. Ces forages captent des eaux carboniques de la dissolution des roches carbonatées, et présentent une minéralisation élevée traduit par la conductivité élevée, cela s'explique possiblement du rapprochement du Chott el Hodna et l'influence des eaux salées.
- le forage F4 est à conjonction avec les éléments  $\text{Na}^+$ , salinité, conductivité, TH,  $\text{NO}_3^-$ . Il présente la dissolution des roches évaporitiques et gypsifères ( $\text{CaSO}_3$ ,  $2\text{H}_2\text{O}$ ).

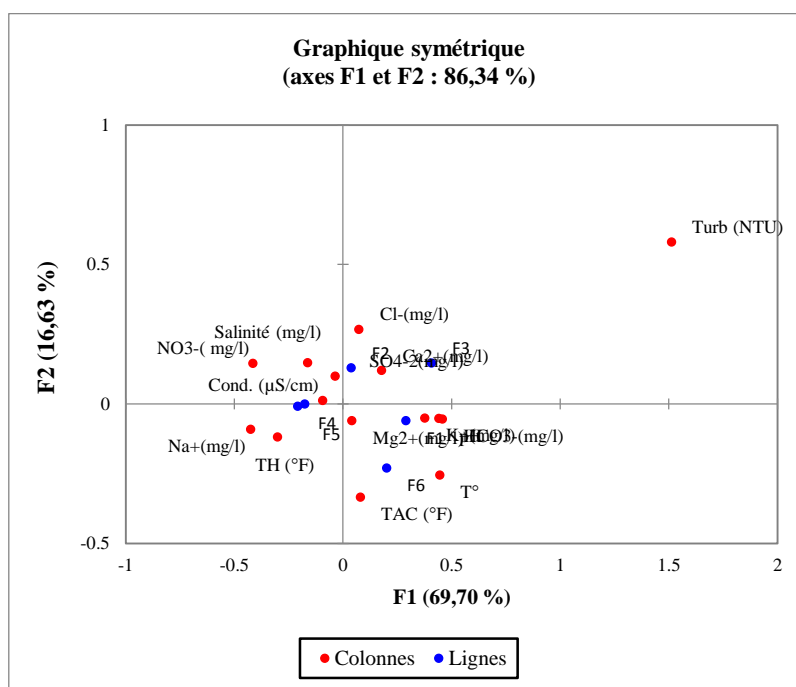


Figure III.26 : Graphique symétrique

**III.9. Conclusion partielle**

Cette partie de notre étude nous a permis de conclure que :

- Les résultats obtenus de l'analyse chimique de l'eau souterraine de la zone d'étude montrent l'évolution des principaux paramètres de qualité chimique tant du point de vue hydrologique (précipitations, infiltration) et géologique. Les caractéristiques minérales des eaux de la région d'étude sont apparues globalement d'une mauvaise qualité avec des duretés qui dépassent 50 °F pour tous les forages.
- Les représentations des analyses chimiques des eaux sur les diagrammes de Piper et Schoeller-Berkaloff ont mis en évidence que la qualité des eaux souterraines est caractérisée par un faciès chimique dominé par le sulfaté calcique et magnésien.
- Les méthodes statistiques multi-variées ont été utilisées pour caractériser les systèmes d'eaux souterraines de la zone d'étude en fonction de leurs propriétés physicochimiques. Ceci est utilisé pour comprendre les processus géochimiques qui dépendent des réactions chimiques qui ont lieu dans les eaux souterraines de la zone d'étude.

# **Chapitre IV**

## ***Risques sanitaires liés à l'eau***

## Chapitre IV : Risques sanitaires liés à l'eau

### IV.1. Introduction

Les règlements de chaque pays exigent des communautés de traiter et de désinfecter l'eau avant la distribution, à cause de la présence possible de polluants (microorganismes, minéraux et métaux toxiques, produits chimiques organiques, ...).

Il y a plusieurs problèmes qui peuvent altérer la qualité de l'eau potable, et certaines maladies peuvent être attrapées en buvant de l'eau traitée de manière inadaptée.

Les eaux souterraines ont généralement une bonne qualité microbiologique, parce qu'elles sont prè-filtrées à travers diverses couches de sol. Les microorganismes et les autres particules sont éliminés quand l'eau s'infiltré dans le sol. Dans la plupart des cas, l'eau nécessite encore au moins un traitement de désinfection [26].

### IV.2. Problèmes biologiques et sanitaires en relation avec la constitution des eaux

Une eau jugée non conforme aux normes qualitatives, fixées pour sa consommation peut causer des désagréments voire même des problèmes sanitaires graves à l'usager. Ceci se produit généralement si l'un des composants dépasse la valeur limite. Toutefois, il est à noter que certains éléments, tels que, les minéraux ayant une concentration trop faible pourrait à long terme être déconseillé du point de vue nutritionnel.

#### IV.2.1. Problèmes liés à la dureté de l'eau

La dureté totale de l'eau ou titre hydrotimétrique est due à la présence de calcium et de magnésium dissous. Les eaux souterraines issues de roches sédimentaires (calcaire) sont dures. Une eau dure a des conséquences sur la santé et l'utilisation de détergents, de machine et des appareils de chauffage. Elle donne des dépôts de tartre dans les canalisations, les bouilloires et chauffe-eau. D'autre part, ces dépôts carbonatés ont un effet bénéfique en protégeant les conduites de la corrosion.

Cette eau apporte une plus grande quantité de sels minéraux ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) à l'organisme, ce qui aurait un effet protecteur vis-à-vis de certaines maladies cardiovasculaires.

#### IV.2.2. Problèmes liés au calcium

À des concentrations très élevées, le calcium peut avoir des effets négatifs sur l'absorption d'autres minéraux essentiels pour le corps.

### ***IV.2.3. Problèmes liés au magnésium***

Le magnésium peut procurer à l'eau potable un goût désagréable. Pour certaines personnes, il suffit d'une concentration de 100 mg/L, mais pour la plupart des gens, cette concentration doit être d'environ 500 mg/L. Ces concentrations sont de loin supérieures à celles que possèdent la plupart des eaux. Dans l'eau potable, le magnésium peut avoir un effet laxatif, surtout si les concentrations de sulfate de magnésium sont supérieures à 700 mg/L. Le corps humain tend toutefois à s'adapter à cet effet laxatif.

### ***IV.2.4. Problèmes liés au sodium***

Quand il est consommé en trop grande quantité, le sodium a des répercussions importantes sur le système cardiovasculaire. Il provoque ou empire des maladies comme l'hypertension artérielle ou une insuffisance cardiaque ou rénale.

### ***IV.2.5. Problèmes liés aux sulfates***

Le sulfate donne un goût amer, les personnes pas habituées à boire de l'eau avec un niveau important de sulfate peuvent souffrir de déshydratation et de diarrhées en buvant celle-ci. Les enfants sont souvent plus sensibles au sulfate que les adultes.

Des concentrations élevées en sulfates peuvent être corrosives pour les tuyauteries en particulier celles en cuivre. Dans les endroits où l'on retrouve des concentrations importantes en sulfates, il est commun d'utiliser des matériaux résistant à la corrosion, comme des tuyaux en plastique.

### ***IV.2.6. Problèmes relatifs aux nitrates***

La toxicité des nitrates résulte de leur réduction en nitrites ( $\text{NO}_2^-$ ) et de la formation de méthémoglobine. La méthémoglobine contrairement à l'hémoglobine est incapable de fixer l'oxygène ; ce qui contribue à réduire le transport de l'oxygène des poumons vers les tissus. Celle-ci suit généralement chez l'enfant de moins de 3 mois exposés à des concentrations de ( $\text{NO}_2^-$ ) qui excèdent 0.2 mg/L.

Certaines études soutiennent également que cela pourrait avoir également des effets cancérogènes.

## **IV.3. Procédés utilisés pour réduire la concentration de quelques éléments chimiques**

### ***IV.3.1. Réduction de la dureté totale***

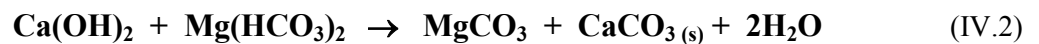
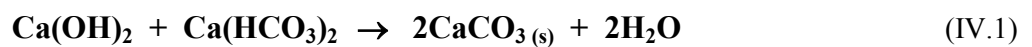
Les techniques d'adoucissement font appel à trois procédés, à savoir la décarbonatation qui n'élimine que les ions calcium et magnésium liés aux bicarbonates ; il s'agit alors d'une réduction partielle, et la réaction totale qui élimine l'ensemble des ions calcium et magnésium, mais sans modifier l'alcalinité de l'eau. Le troisième procédé est représenté par la nano-filtration qui élimine partiellement les ions calcium, magnésium et bicarbonates [27].

Parmi les procédés de décarbonatation, on trouve :

- La décarbonatation à la chaux.
- La décarbonatation à la soude.
- La décarbonatation sur résines échangeuses d'ions du type carboxylique, régénérée par un acide.
- L'électro-décarbonatation.

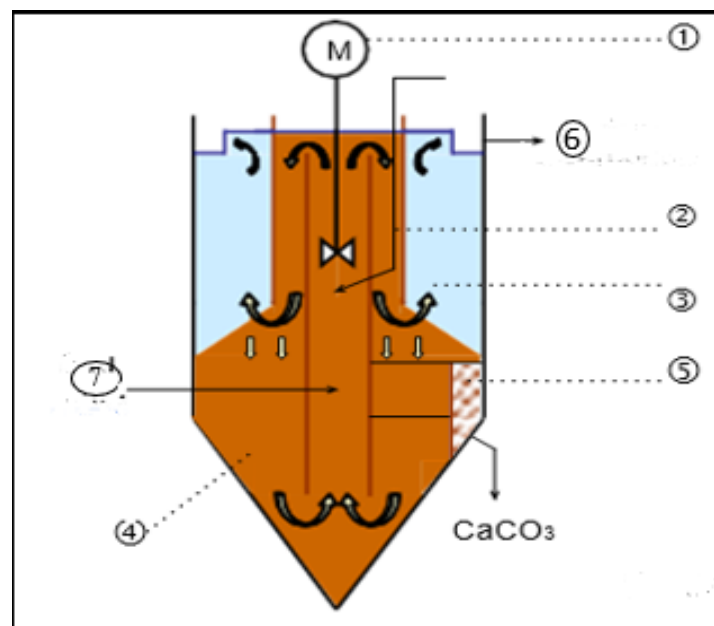
#### IV.3.1.1. La précipitation à la chaux

Ce procédé ne permet d'éliminer que la dureté carbonée, et en particulier celle liée au calcium. C'est une technique maîtrisée et elle n'a pas d'effet sur la dureté permanente (non carbonatée), comme l'indique les réactions de base suivantes :



L'alcalinité résiduelle est de l'ordre de 2 à 3 °F. Étant donné cette faible valeur, seule une partie du débit est décarbonatée pour être mitigée ensuite à de l'eau brute pour obtenir un TAC favorable du point de vue organoleptique, et de la minéralisation.

Pour accélérer la précipitation du carbonate de calcium, l'eau à traiter est mise en contact avec des germes de cristallisation déjà formés. Pour cela, l'appareil de décarbonatation doit comporter une zone où s'effectue le mélange des cristaux recerclés avec de l'eau à traiter additionné de chaux (Fig. IV.1).



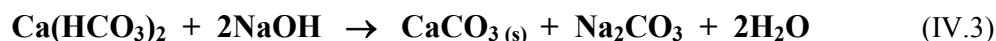
1- turbine de recirculation ; 2- zone de mélange ; 3- zone de clarification ; 4- zone de croissance des cristaux ; 5- concentrateur ; 6- eau décarbonatée ; 7- eau brute

Figure IV.1 : Appareil de décarbonatation à la chaux

L'emploi d'un coagulant ( $\text{FeCl}_3$ ) et/ou d'un flocculant (polymère) permet d'améliorer la séparation des cristaux et de l'eau.

#### ***IV.3.1.2. La décarbonatation catalytique à la soude***

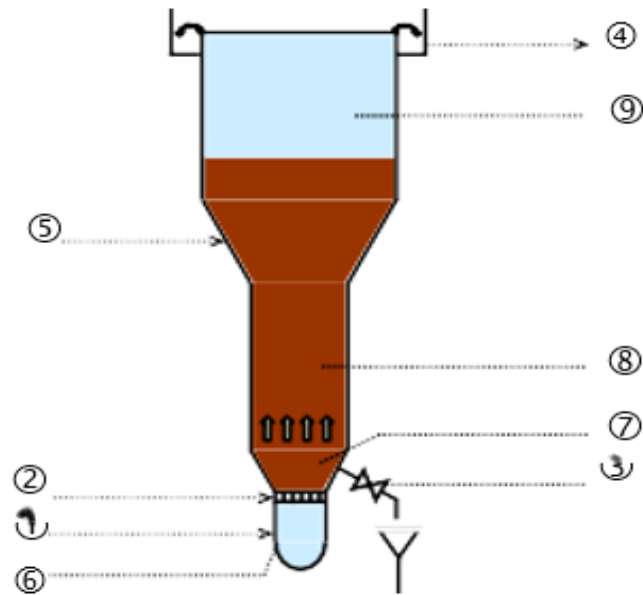
C'est un procédé délicat à mettre en œuvre. La précipitation du carbonate de calcium par la soude est régie par la réaction suivante :



On constate la formation de carbonate de sodium qui réagira sur la dureté permanente, comme indiqué précédemment. L'introduction de microsable (0.2 à 0.4 mm) dans l'eau à traiter additionnée de chaux, permet d'obtenir un effet catalytique, c'est-à-dire, que le carbonate de calcium précipite en se cristallisant à la surface des grains de sable pour obtenir des billes de 1 à 2 mm, à comparer à celui des cristaux de décarbonatation à la chaux qui n'excède pas 100 à 200  $\mu\text{m}$ . Grace au lestage des billes et à leur diamètre, on peut atteindre des vitesses de l'ordre de 80 à 120 m/h dans la zone de clarification ([Fig. IV.2](#)).

Les billes, dès l'obtention du diamètre optimum, sont évacuées en partie basse. Leur eau interstitielle est facilement éliminable par simple égouttage. L'application de ce procédé est limitée par la présence de composés ne cristallisant pas (colloïdes, fer, magnésie) et ne doit concerner que la précipitation du  $\text{CaCO}_3$ . Pour éviter la précipitation de la magnésie, le titre hydrométrique magnésien doit être faible. De plus ce procédé ne convient pas aux eaux présentant une concentration élevée en sodium, car il y aurait alors des risques de dépassement de la référence de qualité (200 mg/L), fixée par le code de la santé publique.

La décarbonatation catalytique à la soude nécessite des réglages fins pour maîtriser la taille des billes, et donc des purges, le dosage de la soude, l'alimentation en micro-sable, ainsi que la vitesse de fluidisation.



1- Arrivée eau brute ; 2- Injection de la soude ; 3- Purge des billes ; 4- Sortie eau décarbonatée ; 5- Introduction du micro-sable ; 6- plancher ; 7- zone de mélange ; 8- zone fluidisée de réaction ; 9- zone de clarification

**Figure IV.2 : Appareil de décarbonatation à la soude**

### IV.3.1.3. Les résines échangeuses d'ions

Ce type de système fonctionne en pompant l'eau à travers un réservoir qui contient une résine. Cette résine entraîne la conversion des ions de calcium et de magnésium en ions de sodium ou de potassium ; ce qui provoque une augmentation des concentrations de ces deux éléments dans l'eau.

L'utilisation des résines repose sur un échange d'ions entre ceux contenus dans l'eau à traiter et ceux retenus dans la structure macroporeuse de la résine.

Les résines d'adoucissement échangent les ions sodium de la résine contre les ions calcium et magnésium de l'eau. Lorsque la résine est saturée, il faut la régénérer à l'aide d'une solution concentrée de NaCl.

Les résines de décarbonatation échangent les ions  $H^+$  de la résine contre les ions  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  et  $Na^+$ . Les résines sont régénérées avec un acide fort ( $H_2SO_4$  en général). Il est à noter que ce procédé n'est utilisé que dans l'industrie. Bien que relativement facile à mettre en œuvre, car totalement automatisable, l'utilisation des résines comporte certains inconvénients, dont notamment :

- La nécessité de traiter une eau exempte des matières organiques, car celles-ci peuvent entraver les échanges ioniques.

- Le risque de précipiter le fer et le manganèse ; ce qui conduit à un empoisonnement des résines.
- Le devenir des éluats de régénération qui sont très concentrés.

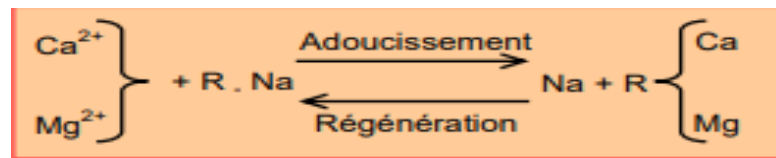


Figure IV.3 : Procédé d'adoucissement et de la régénération utilisé en échange des ions

#### IV.3.1.4. L'électro - décarbonatation

Ce procédé repose sur le principe de l'électro - germination du  $\text{CaCO}_3$ . L'eau à traiter traverse de haut en bas un champ électrique produit par un ensemble d'électrodes, cathodes et anodes, placées en alternance. A la cathode, il y a production d'hydroxydes ( $\text{OH}^-$ ) qui crée un environnement basique déplaçant l'équilibre calco-carbonique, et provoquant ainsi la précipitation du carbonate de calcium. A l'anode il est produit des ions  $\text{H}^+$  qui réagissent avec les hydrogencarbonates pour former du dioxyde de carbone qu'il convient de stripper et / ou de neutraliser. Les boues formées sont recueillies au fond du réacteur, d'où elles sont périodiquement extraites. Elles ont la particularité d'être déshydratées et d'être formées de cristaux de  $\text{CaCO}_3$  pur pouvant être réutilisés. La consommation électrique est de l'ordre de 0.5 à 1.5 kWh/m<sup>3</sup>, fonction du taux désiré d'abattement de la dureté.

#### IV.3.2. Les critères de choix de la technique d'adoucissement

Le choix de la technique d'adoucissement la mieux adaptée à une eau donnée, se fait sur la base de nombreux critères, à savoir [28] :

- Présence ou non de matières en suspension, de fer.
- Nature et composition de la dureté.
- Coûts des réactifs, possibilités d'évacuer les éluats.
- Coût de la déshydratation.
- Possibilités de décharge en Centre d'Enfouissement Technique (C.E.T) d'épandage, de rejet en réseau d'assainissement ou de réutilisation des sous-produits.
- Conditions d'exploitation.

#### IV.3.3. Comment éliminer les sulfates présents dans l'eau

Il y a trois systèmes de traitement qui permettent d'éliminer les sulfates présents dans l'eau destinée à la consommation : l'osmose inverse, la distillation, et l'échangeur d'ions. Les filtres à charbon, les adoucisseurs et les filtres à sédiments ne permettent pas de l'éliminer.

Les adoucisseurs permettent seulement de transformer le sulfate de magnésium ou de calcium en sulfates de sodium, qui est plus laxatif.

#### IV.3.3.1. L'osmose inverse

C'est un système de traitement de l'eau qui élimine la plupart des éléments dissous et des produits chimiques, tel que le sulfate, présents dans l'eau en poussant l'eau à travers une surface en plastique similaire à la cellophane connue en tant que " membrane semi – perméable".

Généralement, cela peut permettre d'éliminer entre 93 et 99 % du sulfate dans l'eau destinée à la consommation. Cela dépend du type d'unité.

Une petite unité d'osmose inverse produit environ 12 litres d'eau par jour. Une unité légèrement plus grande, normalement installée sous l'évier, produira entre 19 et 75.6 litres par jour. Une unité d'osmose inverse produit généralement seulement 3.8 litres d'eau chaque 15 à 38 litres d'eau traitée, et l'eau restante est rejetée.

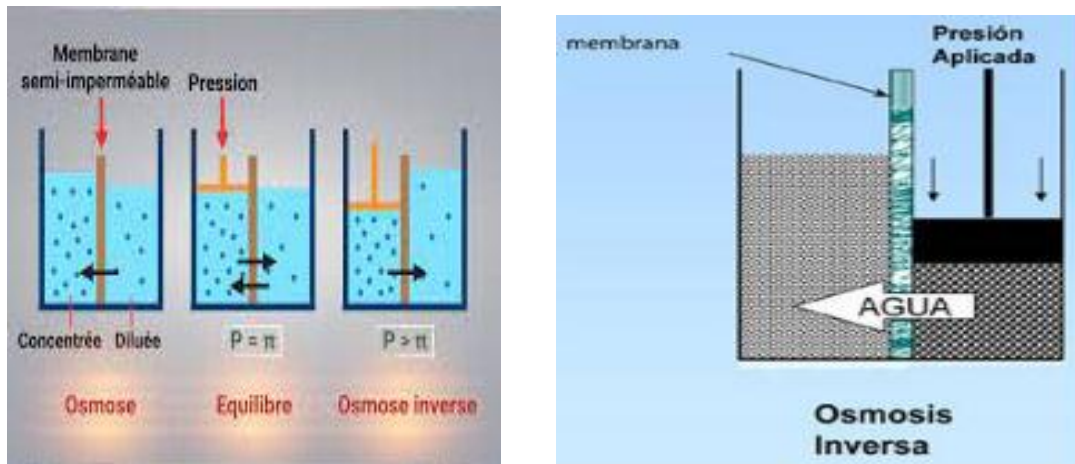


Figure IV.4 : Méthode de l'osmose inverse

#### IV.3.3.2. La distillation

C'est une technique de traitement d'eau dans laquelle l'eau est portée à ébullition, puis la vapeur est refroidie jusqu'à ce qu'elle condense dans un récipient séparé. Les substances dissoutes, telles que le sulfate, restent dans le récipient initial. Si elles sont mises en place correctement, les unités de distillation peuvent éliminer presque 100 % des sulfates. Les unités de distillation ont besoin d'environ 4 heures pour produire 3.8 litres d'eau, donc par conséquent ce type de traitement utilise une quantité substantielle d'énergie pour cette opération.

#### IV.3.3.3. L'échangeur d'ion

C'est la méthode la plus connue pour éliminer de grosses quantités présentes dans l'eau pour des installations publiques, ou des unités commerciales, mais le plus souvent pour un usage résidentiel privé. C'est un procédé où un élément chimique est remplacé par un autre.

De nombreuses personnes se sont familiarisées avec l'adoucissement de l'eau, un type conventionnel de systèmes échangeurs d'ion. Ce système fonctionne de telle manière que de l'eau dure chargée en calcium et en magnésium, passe par un réservoir rempli de résine spéciale saturée avec des ions de sodium. Les minéraux qui provoquent la dureté de l'eau se collent à la résine, et à la place du sodium et dissout dans l'eau.

Les systèmes échangeurs d'ions pour éliminer le sulfate utilisent un type de résine différent, mais travaillent de manière analogue. Les ions sulfates présents dans l'eau échangent leurs places avec les autres ions qui sont sur la résine, habituellement le chlore. Lorsque la résine est pleine de sulfate, elle doit être régénérée avec une solution salée.

#### **IV.4. Chloration de l'eau**

C'est l'utilisation la plus répandue en raison d'une grande efficacité à faibles doses et la facilité d'emploi. Son efficacité est fonction :

- de la nature et de la concentration du produit à éliminer.
- du temps de contact entre l'eau et le désinfectant.
- de la nature des organismes à détruire.
- des caractéristiques physico-chimiques de l'eau à traiter.

##### ***IV.4.1. Nature des composés chlorés utilisés***

- le chlore gazeux  $\text{Cl}_2$
- l'hypochlorite de sodium ou l'eau de Javel  $\text{NaOCl}$
- l'hypochlorite de calcium ou chlorure de chaux  $\text{Ca(OCl)}_2$
- dioxyde de chlore  $\text{ClO}_2$
- les monochloramines  $\text{NH}_2\text{Cl}$ .

##### ***IV.4.2. Les procédés de la chloration de l'eau***

Ce procédé est utilisé depuis plusieurs dizaines d'années. Dans les grands réseaux de distribution d'eau potable, du chlore est ajouté dans l'eau pour que l'eau ne soit pas contaminée pendant son transport depuis l'usine de traitement jusqu'à l'utilisateur. Par ailleurs, la chloration est utilisée à l'échelle individuelle, familiale ou collective dans de nombreux pays en développement là où l'eau disponible est susceptible d'être contaminée. Elle est aussi mise en place par les organismes de solidarité internationale dans des situations d'urgence.

Le traitement de l'eau par chloration permet d'éliminer de façon simple et à faible coût la plupart des microbes, bactéries, virus et germes responsables de maladies comme la dysenterie, la typhoïde et le choléra. Il ne peut toutefois détruire certains microorganismes parasites pathogènes. La chloration désinfecte donc l'eau mais ne la purifie pas entièrement.

Le chlore, ou ses dérivés chlorés, est un oxydant puissant qui, mélangé à l'eau, brûle les matières organiques qu'elle contient, et en particulier les virus pathogènes et les microbes en une demie heure.

Une partie importante du chlore étant nécessaire pour neutraliser ces matières organiques, il n'en reste cependant qu'une partie, appelée chlore résiduel libre, pour traiter la contamination éventuelle ultérieure de l'eau dans le réseau ou les habitations.

La concentration en chlore libre de l'eau traitée doit être selon l'OMS de 0.2 à 0.5 mg/L. Il faut donc utiliser assez de chlore pour qu'il en reste assez une fois l'eau traitée, sauf consommation immédiate.

Il existe plusieurs procédés de chloration, lesquels varient d'ailleurs selon la qualité de l'eau à traiter.

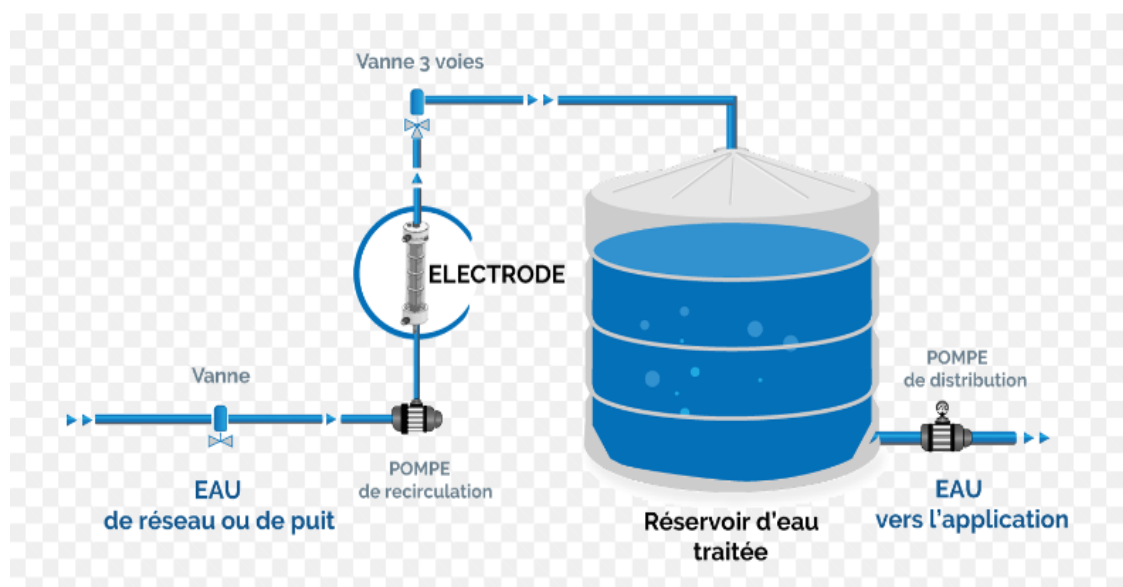


Figure IV.5 : Procédé de la chloration de l'eau

#### IV.5. Conclusion partielle

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques risques sanitaires qui sont en relation avec une eau souterraine suspecte ou polluée, et les moyens utilisés pour réduire ou éliminer certains éléments, tels que la dureté totale, le calcium, le magnésium, le sodium, les sulfates et les nitrates. L'accent a été mis sur l'adoucissement et la chloration de l'eau.

## *Conclusion générale*

## **Conclusion générale**

Cette étude nous a permis de visualiser la situation actuelle des eaux souterraines de la région de Hammam Dalaa, de point de vue hydrochimique et qualité. Les principales conclusions sont :

- La qualité chimique des eaux de la région montre que les eaux souterraines sont très dures (TH > 50 °F) et d'une mauvaise qualité par rapport aux normes de potabilité.
- Le calcul de la balance ionique des eaux souterraines de la zone d'étude a montré que la fiabilité des analyses est mauvaise pour les forages Haourane 3 (F1), Hammam Dalaa 1 (F2) et Haourane 2 (F3), excellente pour le forage Bouira (F4) et acceptable pour les forages Hammam Dalaa 2 (F5) et Haourane (F6).
- La salinité des eaux souterraines est très faible, et la représentation des valeurs du SAR en fonction de la conductivité électrique sur le diagramme de Richard a permis de classer ces eaux dans la classe dominante (C3-S1) de salinité faible.
- Les représentations des analyses chimiques des eaux sur les diagrammes de Piper et Schöeller-Berkaloff ont montré que la qualité des eaux souterraines est caractérisée par un faciès chimique dominé par le sulfaté calcique et magnésien.
- L'interprétation des données par les méthodes statistiques multivariées a montré que la variation des éléments chimiques est très significative, et les résultats obtenus indiquent que les paramètres responsables des variations de la qualité des eaux souterraines sont principalement liés à la présence et à la dissolution de certains minéraux carbonatés et évaporitiques dans l'aquifère, ainsi que par les activités anthropiques tout au long du bassin, correspondant à des apports d'engrais agricoles, de rejets domestiques et terrains salés.

Ces éléments d'information acquis sur la qualité et la disponibilité des eaux au niveau de Hammam Dalaa qui présente une zone de développement de toute la région, dont les besoins en eau ne cessent d'augmenter, nous ramènent à proposer quelques recommandations :

- Arrêter le déversement direct des rejets urbains et industriels au niveau des Oueds, en réalisant un traitement préalable de ces effluents avant qu'ils atteignent le milieu récepteur, et surveiller en permanence la qualité des eaux.
- Convaincre les responsables des services concernés d'instaurer dans la conception des forages d'eau la notion des périmètres de protection.
- Conseiller les agriculteurs à limiter l'utilisation intensive des engrais chimiques et des pesticides dans les sols à forte perméabilité, afin de limiter l'infiltration des éléments

chimiques vers la nappe, et de modérer les pompages en utilisant des techniques d'irrigation économiques (gouttes à gouttes).

- La recharge de la nappe par la réalisation de petites retenues d'eau de pluie.
- Tout creusement de nouveau forage doit être effectué après une étude sérieuse.
- Installer un réseau de piézomètres à hautes fréquences à travers la nappe pour contrôler la fluctuation de la surface piézométrique.
- Rationalisation de la consommation de l'eau.
- Implémentation d'une gestion intégrée des ressources en eau à même d'assurer un développement durable.

## *Références bibliographiques*

## Références bibliographiques

- [1] C. Badouche, Contribution à la connaissance des propriétés physico-chimiques des eaux souterraines d'irrigation de la région de Hammam Dalaa (M'Sila), *Mémoire de fin d'études, Master en Agronomie*, Université de M'sila, 2019.
- [2] F. Ramade, *Eléments d'écologie – fondamentale*. 4<sup>ème</sup> édition, Dunod, Paris, 2009.
- [3] Station météorologique de M'Sila
- [4] H. Seghiri, A. Zemit, Diagnostic des périmètres agricoles au niveau de zone de mise en valeur de Hammam Dalaa (Wilaya de M'Sila)
- [5] La mairie de Hammam Dalaa, 2022.
- [6] Direction des Services Agricoles de la Wilaya de M'Sila (DSA). Service des statistiques agricoles, 2021.
- [7] Direction des Ressources en eaux de la Wilaya de M'Sila (DRE). Service de mobilisation et d'exploitation de la ressource en eau, 2022.
- [8] Annuaire statistique de la Wilaya de M'sila, 2021.
- [9] M. Roche, *Hydrologie de surface*. Paris, 1963.
- [10] A. Azri, S. Dhailis, Évaluation de la qualité physico chimique des eaux cas de Béjaia –Est, *Mémoire de fin d'études, Master en Ressources Hydrauliques*, Université de M'sila, 2021.
- [11] A. Benseddik, Etude pour la réhabilitation et l'extension de la forêt d'El Haourane, Hammam Dalaa - M'sila, Université Mohammed Boudiaf, M'sila
- [12] A. Zedam, Etude de la flore endémique de la zone humide de Chott El Hodna (inventaire-préservation). Thèse de Doctorat, Université de Sétif, 2015.
- [13] P. Baldini, Notice explicative de la carte géologique. Service géologique de l'Algérie, 1966.
- [14] N. Ben Hamiche, Contribution à l'étude de l'influence climatique, lithologique et anthropique sur la variation des paramètres physico-chimiques des eaux d'un aquifère du Nord-est algérien : Cas de la basse Soummam, Bejaia. *Thèse de Doctorat en Sciences*, Université de Béjaia, 2015.
- [15] M. Makhoukh, Contribution à l'étude physico-chimique des eaux superficielles de l'Oued Moulouya. Maroc, 2011.
- [16] Benrabia.A, (2013) Etude de la qualité des eaux souterraines de la région de Boussaâda Wilaya de M'sila. *Mémoire de fin d'études, Master en Hydraulique*, Université de M'sila,
- [17] A. Benallou, Analyse physico-chimique des effluents provenant de la laiterie d'Arib. Centre universitaire de Khemis Miliana, 2004.
- [18] K. Menad, Traitement des eaux saumâtres par l'osmose inverse cas de l'eau de Khemis Miliana. Université Khemis Miliana, 2012.
- [19] J. I. Drever, *The geochemistry of natural waters*. 3<sup>rd</sup> Edition, Prentice Hall, New Jersey, 1997.
- [20] A. Graine, M. Ben Zemmouri, Approche hydrogéochimique des éléments conditionnant la qualité chimique des eaux souterraines de la région de Boussaâda. *Mémoire de fin d'études, Master en Hydraulique*, Université de M'sila, 2018.

- [21] R. Bermond, C. Perrdon, Paramètres de la qualité des eaux. *Ministère de l'environnement*, Paris, 1979.
- [22] <https://fr.hach.com/parameters/sodium>
- [23] M. Ghodbane, Cours d'Hydrochimie. Master 1 Hydraulique, Université de M'sila, 2021.
- [24] M. Sanaa, Y. Naima, Caractérisations, classification et statistique multi variable des eaux de l'aquifère alluvionnaire du fossé de Sebdou (N-W algérien). *Mémoire de fin d'études*, Master en Hydraulique, Université de Tlemcen, 2017.
- [25] A. Beyragued, A. Boudiaf, Contribution à la connaissance de la qualité des eaux souterraines de la basse vallée de la Soummam-Bejaia. *Mémoire de fin d'études*, Master en Hydraulique urbaine, Université de M'sila, 2017.
- [26] R. Vilogineés, Eau, environnement et santé publique. Edition Tec et Doc, 1990.
- [27] Memotec N°6, Les procédés d'adoucissement en traitement de l'eau potable.
- [28] <https://wikiwater.fr/e18-le-traitement-de-l-eau-par>