République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de Chahid Elcheikh Larbi Tebessi –Tébessa
Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie
Département : Sciences de la Terre et de l'univers

THÈSE
Présentée en vue de l'obtention du diplôme de DOCTORAT (LMD)

Option : Hydrogéologie

Thème

Utilisation du système d'information géographique (SIG) et l'indice de qualité des eaux pour l'évaluation de la qualité des eaux souterraines de la région de Tébessa (N-E Algérien)

Par

CHOUGAR RIHAB

DIRECTEUR DE THÈSE Pr: Baali Fethi Professeur Univ de Tébessa

CO-DIRECTEUR DE THESE Pr: Ghrieb Lassaad Professeur Univ de Guelma

Devant le jury composé de :

FEHDI Chemseddine	Professeur	Président	Université Larbi Tebessi Tébessa
BAALI Fethi	Professeur	Directeur de thèse	Université Larbi Tebessi Tébessa
CHRIEB Lassaad	Professeur	Co-directeur de thèse	Université 8 mai 1945 Guelma
MAOUI Ammar	Professeur	Examinateur	Université 8 mai 1945 Guelma
HADJI Rihab	Professeur	Examinateur	Université Ferhat Abbas Setif

25/06/2025

Remerciements

Je remercie en premier lieu **ALLAH**, le tout puissant qui a éclairé mon chemin, et ma donnée le courage, la force et la patience pour achever ce travail.

Cette thèse doit beaucoup aux nombreuses personnes qui m'ont encouragé, soutenu etconforté au long de toutes ces années. Qu'elles trouvent dans ce travail l'expression de mesplus sincères remerciements.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de thèse M. **Baali Fethi**, professeur à l'Université de Tébessa et Directeur du Laboratoire d'eau et de l'Environnement pour ses conseils inestimables, son soutien indéfectible et ses encouragements tout au long de cette recherche malgré ses multiples obligations. Son expertise et sa passion ont été une source d'inspiration constante.

C'est avec grand bonheur que je saisis cette occasion pour adresser mes plus sincères remerciements à M. **Ghrieb Lassaad**, professeur à l'université de Guelma d'avoir accepté de codiriger cette thèse et pour tous ses conseils ainsi que son soutien sans faille qui m'ont permis de mener à bien ce travail de recherche.

Je remercie également les membres de mon comité pour leurs précieux commentaires et suggestions, qui ont grandement enrichi ce travail.

Je traduis ma gratitude et ma reconnaissance au **Pr**. **Hadji Rihab** professeur à l'université de Setif pour ses conseils et contributions significatives à travers la lecture et la correction de l'article qui l'ont considérablement amélioré.

Je voudrais remercier également tous les doctorants du département de la Science de la terre et de l'univers et l'institut des mines : **Brahim Djebnoune, Hacen Taib, Ali Hadjela, Serhane Brahmi, Hamad Amor, Ilhem Abdeslam, A l i Nesrat** pour leurs conseils et leurs Encouragements,

Un grand merci à mes collègues et amis pour leur soutien moral et leurs discussions stimulantes. Votre camaraderie a rendu ce voyage bien plus agréable.

Je ne saurai passer sous silence l'aide précieuse du **M. Nacer Soualhia, M. Hacen Hamaidia, M.Hassen Gasmi** qui m'ont soutenu. Mes vifs remerciements vont tout droit à eux.

Je souhaite aussi exprimer ma reconnaissance à ma famille, pour leur amour, leur patience et leur soutien inconditionnel. Sans vous, rien de tout cela n'aurait été possible.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont de près ou de loin, contribué à la réalisation de cette thèse et qui m'ont soutenu tout au long de ce parcours.

Dédicace

A mes parents pour votre amour inconditionnel et votre soutien sans faille. Votre confiance en moi m'a permis de réaliser ce rêve.

A mes frères Yahia, Youcef et mes sœurs Hana et Kenza et leurs enfants Hanine, Darine ,Djaceme, Wadjdane, Sadja et Ghaith . Pour avoir toujours été maboussole. Votre soutien inébranlable et vos encouragements m'ont permis de franchir chaque obstacle.

A mon directeur de thèse, pour votre guidance et votre sagesse. Merci dem'avoir poussé à aller au-delà de mes limites.

A mes amis et collègues, pour les fous rires, les débats animés et les encouragements constants. Vous avez rendu ce voyage inoubliable.

A Djalab Akila Pour être ma source constante d'inspiration et demotivation. Ta passion pour la recherche a été mon phare.

Merci à chacun d'entre vous d'avoir contribué à cette aventure unique.

Rihab

Abstract

Groundwater quality is essential for meeting freshwater demands, especially in water-scare semi-arid regions, necessitating thorough evaluation. This study focuses on assessing the groundwater quality of the Tebessa aquifer system a vital source catering to diverse needs. Challenges such as water stress, urbanization, aridity and population growth increase water demand and exacerbate inherent quality issues. Intensive agricultural and industrial activities further deteriorate groundwater quality.

Using the water quality index (WQI) approach, this study integrates various parameters for a comprehensive assessment of water health. Geographic information system (GIS) technology enhances the analysis of spatial relationships, crucial for understanding complex hydrogeological processes by employing a multiparameter strategy; the study generates water quality maps depicting pH, Total Dissolved Solids (TDS) and various ions. These visualizations reveal spatial disparities, classifying groundwater quality from excellent to very poor.

The study aims to improve the understanding of groundwater quality dynamics in semi-arid regions and to identify actionable management strategies. Situated in the semi-arid Tebessa- Morsott plain, the research involvesfield and laboratory investigations to delineate Hydrochemical traits. Findings include parameters such as alkalinity, salinity and elevated ion concentrations. By uncovering interrelationships and spatial intricacies, the study enriches scientific knowledge and informs water resource governance

Résumé

La qualité des eaux souterraines est essentielle pour répondre aux besoins en eau douce, notamment dans les régions semi-arides où les ressources en eau sont limitées, nécessitant une évaluation approfondie.

Cette étude se concentre sur l'évaluation de la qualité des eaux souterraines du système aquifère de Tebessa ; une source vitale répondant à divers besoins.

Des défis tels que le stress hydrique, l'urbanisation, l'aridité et la croissance démographique augmentent la demande en eau et aggravent les problèmes de qualité. Les activités agricoles et industrielles intensives détériorent encore d'avantage la qualité des eaux souterraines.

En utilisant l'approche de l'indice de qualité de l'eau (WQI), cette étude intègre divers paramètres pour une évaluation complète de la santé de l'eau. La technologie des systèmes d'information géographique (SIG) améliore l'analyse des relations spatiales, pour comprendre les processus hydrogéologiques complexes. En employant une stratégie multi paramètres, l'étude génère des cartes de qualité de l'eau illustrant le pH, les solides dissous totaux (TDS) et divers ions. Ces visualisations révèlent des disparités spatiales, classifiant la qualité des eaux souterraines de l'excellente à très mauvaise.

L'étude vise à améliorer la compréhension des dynamiques de la qualité des eaux souterraines dans les régions semi-arides et à identifier des stratégies de gestion concrètes. Située dans la plaine semi-aride de Tébessa-Morsott, la recherche implique des investigations sur le terrain et en laboratoire pour délimiter les caractéristiques hydrochimiques.

Les résultats incluent des paramètres tels que l'alcalinité, la salinité et des concentrations élevées d'ions. En dévoilant les interrelations et les complexités spatiales, l'étude enrichit les connaissances scientifiques et informe la gouvernance des ressources en eau.

Mot clés : Irrigation, WQI, SIG, Wilcox, Richards.

الملخص

جودة المياه الجوفية ضرورية لتلبية احتياجات المياه العذبة، خاصة في المناطق شبه القاحلة حيث الموارد المائية شحيحة، مما يتطلب تقييمًا دقيقًا. تركز هذه الدراسة على تقييم جودة المياه الجوفية لنظام طبقة المياه الجوفية في تبسة، وهو مصدر حيوي يلبي احتياجات متنوعة. تزيد التحديات مثل الإجهاد المائي والتحضر والجفاف والنمو السكاني من الطلب على المياه وتفاقم مشاكل الجودة. تزيد الأنشطة الزراعية والصناعية المكثفة من تدهور جودة المياه الجوفية.

.

تدمج هذه الدراسة مختلف المعايير للحصول على تقييم شامل لصحة المياه. تعمل (WQI) باستخدام نهج مؤشر جودة المياه على تحسين تحليل العلاقات المكانية، وهو أمر حيوي لفهم العمليات الهيدروجيولوجية (GIS) تقنية نظم المعلومات الجغرافية ، (pH) المعقدة. من خلال اعتماد استراتيجية متعددة المعايير، تنتج الدراسة خرائط لجودة المياه تُظهر درجة الحموضة ومختلف الأيونات. تكشف هذه المرئيات عن الفوارق المكانية، وتصنف جودة المياه (TDS) المواد الصلبة الذائبة الكلية الجوفية من "ممتازة" إلى "سيئة للغاية".

تهدف الدراسة إلى تحسين فهم ديناميكيات جودة المياه الجوفية في المناطق شبه القاحلة وتحديد استراتيجيات إدارة قابلة للتنفيذ. تُجرى هذه الأبحاث في سهل تبسة-مرسط شبه القاحل، وتشمل التحقيقات الميدانية والمختبرية لتحديد الخصائص الهيدروكيميائية. تشمل النتائج الرئيسية معايير مثل القلوية والملوحة وارتفاع تركيزات الأيونات. من خلال الكشف عن العلاقات البينية والتعقيدات المكانية، تُثري الدراسة المعرفة العلمية وتدعم إدارة الموارد المائية

كلمات مفتاحية: نظم المعلومات الجغرافية، الملوحة، الجفاف، مؤشر جودة المياه، نوعية المياه

.

Table des matières

Remerciements II
Dédicace III
Abstract IV
Résume V
ملخص ..... V I
Liste des figures VII
Liste des tableaux X
Liste des abréviations XI
Introduction générale 1

Chapitre I : caractérisation du bassin versant

1. Localisation de la zone d'étude 4
2. Cadre topographique 5
3. Couvert végétal 6
4. Hydrographie 6
5. Population 7
6. Le contexte économique 8
7. Aperçu géomorphologique : 8
7.1. Série montagneuse 8
7.2. Plaine de Tébessa 8
8. Conclusion 8

Chapitre I : Géologie

1. Introduction 9
2. Stratigraphie et description des facies 10

Table des matières

2. 1. Mésozoïque 11

2. 1.1. Le Trias 11

2.1.2. Crétacé 11

. a. Le Crétacé inférieur 11

2.1.2.1. Le barrémien 11

2.1.2.2.L'Aptien 11

2.1.2.3.Le Clansayésien 11

2.1.2.4.L'Albien 12

2.1.2.5.Le Vraconien 12

2.1.2.6. Cénomanien 12

2.1.2.7.Turonien Inférieur 12

2.1.2.8.Turonien supérieur 12

2.1.2.9.Campanien : 13

2.1.2.10.Le Maestrichtien 13

2.2. Cénozoïque 13

2.2.1. Paléocène 13

2.2. 2.L'Eocène 13

2.2.3. Le Miocène 13

2.3. Quaternaire 13

2.3.1. Les Formations anciennes 13

2.3.1.1. Alluvions anciennes 13

2.3.1.2. Alluvions anciennes de piedmont 14

2.3.1.3. Matériel d'épandage ancien en terrasse 14

2.3.1.4. Matériel d'épandage ancien : éboulis et cônes de déjection 14

2.3.1.5. Cailloutis ancien du Dj. Djebissa 14

2.3.1.6. Plio-quaternaire(Villafranchien) 14

2.3.2.Formations actuelles 15

a) Eboulis actuels 15

b) Travertins 15

c) Alluvions actuelles 15

d) Limons récents 15

e) Croûtes calcaires 15

f) Brèches et cailloutis anguleux 15

3.Les Monts 18

3.1. Les Monts septentrionaux 18

3.2. Les Monts méridionaux 18

4.Tectonique de la région 19

4.1. Les phases de l'orogenèse 19

4.1.1. La phase fini- lutétienne 19

4.1.2.La phase du Miocène Inférieur 19

4.1.3.La phase du Miocène Supérieur 19

4.1.4.La phase du Pliocène inférieur 19

4.1.5.La phase du Pliocène supérieur 19

4.1.6.La formation du fossé d'effondrement de Tébessa 20

5.Conclusion 21

Chapitre II : Hydroclimatologie

1 . Introduction 22

2 . Choix des stations 22

3.Indices climatiques 22

3. 1.Indice de De Martonne 22

3.1.1 Indice d'aridité mensuel 23

4. Etude des facteurs climatiques 24

4.1. La température 24

4.1.1. Variations des températures moyennes annuelles 24

4.1.2.Variations de la température moyenne mensuelle 25

4.2. La pluviométrie 26

4.2.1.La précipitation 26

4.2.2. Diagramme ombrothermique 27

4.2.3. Variations interannuelles des précipitations 27

4.2.4.Variations moyennes mensuelles des précipitations 28

4.3. Variation de précipitation 29

4.3.1. Estimation de l'évapotranspiration 29

4.3.1.1 Introduction 29

4.3. 1.2. Calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP) 29

- Formule de THORNTHWAITE 29

4.3.1.3. Évapotranspiration réelle (ETR) 30

- Formule de TURK… 30
- Formule de THORNTHWAITE 30

4.3.1.4.Estimation des réserves facilement utilisables (R.F.U) 30

4.3.1.5.Estimation de ruissellement (R) 31

2.6.4. Estimation de l'infiltration (I) 31

4.3.1.6.Estimation du bilan hydrique 32

NB 35

5.CONCLUSION 35

Chapitre III : Géophysique et hydrogéologie

1.Introduction 36

2. Prospection électrique 36

3. Echelle Des Résistivités 36

3. 1. Interprétation des résultats 38

3.1. 1. Coupes géo électriques 38

a. Zone de BEKKARIA 38
b. Zone de TEBESSA 39
c. Zone de AIN CHABRO 39
d. Zone de Morsott 40

3.1. 2. Carte des résistances transversales 44

a. Zone de forte résistance transversale 44

b. Zone de faible résistance transversale 44

4.Substratum 45

5.Conclusion 46

6. Hydrogéologie 47

6. 1. Introduction 47

6.2. Géométrie de l'aquifère 47

6.3. Indentification des différents niveaux aquifères 48

6.3.1. Le milieu fissuré 48

6.3.1.1 . L'aquifère des calcaires de Maestrichtien 48

6.3.1.2. L'aquifère des calcaires du Turonien 49

6.3.2 - Le milieu poreux 49

6.4. La piézométrie 50

6.4.1. Inventaire des points d'eau 51

6.4.2. Interprétation de la carte piézométrique (2020) 51

- Secteur de Bekkaria 51

- Secteur de Tébessa 51

- Secteur Ain Chabro : … ..... 52 -
Secteur d'El Hammamet 52

6.4.3. Conditions aux limites d'aquifère de la plaine Tébessa-Morsott 52

-La bordure sud (méridionale) 52

- La bordure Nord 53

- La bordure Est 53

-La bordure Ouest 53

6.5.Conclusion..... 54

Chapitre V : Matériels et méthodes

1. Introduction..... 55
2.Matériels..... 55
2.1. Les images (MNT)..... 55
2.2. Matériel des échantillons..... 56
2.3.Les logiciels utilisés pour traitement de données..... 57
2.3.1. ArcGis version 10.8..... 57
2.3.2. Diagrammes..... 58
2.3.3. Excel 2016..... 58
3.Méthodes de traitement des résultats..... 58
3.1.La réalisation de bassin versant..... 58
3.2.Interpolation des données physico-chimiques..... 59
3.1. L'indice de qualité des eaux souterraines (WQI)..... 60
3.1.1. Définition..... 60
3.3.2. Historique..... 60
3.3.3. Méthode du calcul d'indice de qualité l'eau..... 60
3.3.4. Validation de la cohérence des poids relatifs (méthode AHP)..... 62
3.4. Réalisation des diagrammes hydrochimiques..... 64
3.5 Calcul d'indice de saturation..... 64
3.6. Aptitude des eaux à l'irrigation..... 64
3.7.L'indice de qualité de l'eau d'irrigation..... 65
3.8.Indice d'échange de base (i.e.b)..... 67
3.9.L'analyse de composante principale..... 68

Chapitre VI : Hydrochimie

Table des matières

. Introduction : 69
2.Description des résultats d'analyses chimiques de l'eau 69
2.1. Etude des paramètres physico-chimiques 70
2.1.1. La température de l'eau 70
2.1.2. Potentiel d'hydrogène (pH) 71
2.1.3. La conductivité électrique 72
2.1.4. Total des solides dissous TDS 73
2.1.5. Les éléments majeurs 74
a. Le calcium (Ca^{+2}) 74
b. Le Sodium (Na^{+}) 75
c.Le Potassium (K^{+}) 76
d. Le magnésium (Mg^{+2}) 77
e. Les Sulfates (SO_4^{-2}) 78
f. Les Chlorures (Cl^{-}) 79
g. Les Bicarbonates (HCO_3^{-}) 80
3. L'indice de la qualité d'eau 81
3.1.Modèle de validation 82
3.1.1. Validation par les Chlorures 82
3.1.2.Influence des paramètres hydrochimiques sur l'indice (IQE) 83
4.Représentation graphique des résultats 85
4.1.Détermination des faciès hydrochimiques 85
a. Diagramme de piper 85
b.Diagramme de Schoeller et Berkaloff 86
5.L'aptitude des eaux a l'irrigation 87
a. Diagramme de Wilcox 87
b.Diagramme de Richards 88
c.Les indicateurs d'aptitude des eaux à l'irrigation 90
d.L'indice de qualité de l'eau d'irrigation (IWQI) 90
6.Indice d'échange de base (i.e.b) 92

7. Indice de saturation 93
8. Origines des éléments chimiques 95
8.1. Origine du calcium 95
8.2. Origine du chlorure et du sodium ..... ……95
8.3. Origine des éléments HCO_3^-, SO_4^{-2} et Cl 96
9. Analyse en Composante Principale (ACP) 97
9.1. Analyse de l'espace des variables 99
9.2. Analyse de l'espace des individus 100
10. Exploration de la nappe superficielle par les puits domestiques 102
10.1. Conductivité électrique CE 103
11. Synthèse de la vulnérabilité à la pollution des eaux par la méthode DRASTIC 103
12. Conclusion 105
Conclusion générale 108
Bibliographie… 111

Liste des figures

Figure 01. Présentation et situations de la plaine de Tébessa.....5

Figure 02. La Carte de la pente de la région étude..... 6

Figure 03. Carte de la végétation de la zone d'étude. Source : **(Bougachoura,2019)** 7

Figure 04. Réseau hydrographique du bassin versant de la zone d'étude 7

Figure 05. La carte géologique de la région de Tebessa- Morsott 10

Figure 06. Coupe Géologie schématique de la zone d'étude 17

Figure 07. Schéma structural de la zone d'étude D'après **(KOWALSKI W.M ,1997**).....18

Figure 08. Carte géologique de la région Nord-Est de l'Algérie) **(Meghraoui, 1988)** Modifié). Les structures actives sont inspirées selon.....20

Figure 9. Abaque de l'Indice d'aridité Annuel (**DE. Martone, 1926**).....24

Figure 10. Evolution de la température moyenne annuelle à la station de Tébessa (2002022) 25

Figure11. Variation de la température moyenne mensuelle à la station de Tébessa (2002022) 25

Figure 12. Courbe Ombrothermique de la station de Tébessa (2002022).....27

Figure 13. Evolution des précipitations annuelles à la station de Tébessa (2002022)..... 28

Figure 14. Variation des précipitations moyennes mensuelles à la station de Tébessa (2002022) 28

Figure 15. Bilan hydrologique à la station de Tébessa, par la méthode de Thornthwaite pour la période (1999/2000 -2021/2022)..... 34

Figure 16. Carte de position des sondages électriques verticaux (SEV) **(CGG 1975)**..... 38

Figure 17. Coupes géo électriques à travers la plaine de Tébessa selon les profils (J, K, L et M) **(CGG 1975)** 41

Figure 18. Coupes géo-électriques à travers la plaine de Tébessa selon les profils (R, S, T et U) **(CGG1975)**.....42

Figure19. Coupes géo-électriques selon les profils (V, W et X). **(CGG 1975)**..... 43

Figure 20. Coupe géo électrique (MO) de la zone Morsott **(CGG1975)**..... 44

Figure21. Carte de résistances transversales brute de la plaine de Tébessa-Morsott **(CGG1975)**.45

Figure 22. Carte de substratum **(BRAHMI, 2021)** 46

Figure 23. Carte de situation des sondages électriques (C.G.G, 1978) 48

Figure24.Coupe hydrogéologique à travers la plaine de la Merdja. **(Rouabhia et al. 2009)**…50

Figure 25. Carte d'inventaire des points d'eau en 2020 51

Figure 26. Carte piézométrique 2020 de la plaine de Tébessa…… 52

Figure 27. Carte des conditions aux limites (réalisé par Chougar Rihab,2020) 53

Figure 28. Modèle numérique de terrain de la zone d'étude 56

Figure 29. Schéma des composantes d'un SIG… 58

Figure 30. Les étapes géo-traitements pour la délimitation du bassin versant de Tébessa-Morsott 59

Figure 31. La carte d'inventaire des points d'eau de la plaine de Tébessa-Morsott 69

Figure 32. Variation de la température des eaux souterraines dans la zone d'étude 70

Figure 33. La carte de la distribution spatiale du pH de la plaine de Tébessa-Morsott 72

Figure 34. La carte de la distribution spatiale de la conductivité électrique de la plaine de Tébessa-Morsott 73

Figure 35. La carte de la distribution spatiale du TDS de la plaine de Tébessa-Morsott 74

Figure 36. La carte de la distribution spatiale de calcium de la plaine de Tébessa-Morsott 75

Figure 37. La carte de la distribution spatiale de sodium de la plaine de Tébessa-Morsott 76

Figure 38. La carte de la distribution spatiale de potassium de la plaine de Tébessa-Morsott 77

Figure 39. La carte de la distribution spatiale de magnésium de la plaine de Tébessa-Morsott78

Figure 40. La carte de la distribution spatiale des sulfates de la plaine de Tébessa-Morsott…79

Figure 41. La carte de la distribution spatiale de chlorure de la plaine de Tébessa-Morsott…80

Figure 42. La carte de la distribution spatiale de bicarbonate de la plaine de Tébessa-Morsott… 81

Figure 43. La carte de la distribution spatiale d'indice de la qualité d'eau de la plaine de Tébessa-Morsott 82

Figure 44. Variation de l'indice de la qualité d'eau avec la concentration de chlorure 83

Figure 45. Diagramme d'effet entre WQI et sulfates… 83

Figure 46. Diagramme d'effet entre WQI et sodium..... 84

Figure 47. Diagramme d'effet entre WQI et calcium..... 84

Figure 48. Diagramme d'effet entre WQI et magnésium..... 84

Figure 49. Diagramme d'effet entre WQI et conductivité électrique..... 85

Figure 50. Facies chimique des eaux par le diagramme de piper..... 86

Figure 51. Diagramme de Schoeller Berkaloff de la plaine Tébessa-Morsott 87

Figure 52. Diagramme de Wilcox de la plaine Tébessa- Morsott..... 88

Figure 53. Diagramme de Wilcox de la plaine Tébessa- Morsott..... 89

Figure 54. Distribution spatiale d'indice de qualité de l'eau d'irrigation de la plaine de Tébessa-Morsott….91

Figure 55. Variation de l'indice d'échange de base 93

Figure 56 .la variation de l'indice de la saturation 94

Figure 57. Ca vs HCO_3- dans la plaine de Tébessa-Morsott 95

Figure 58. Na vs Cl dans la plaine Tébessa-Morsott..... 96

Figure 59. L'échange de base de la plaine de Tébessa-Morsott..... 96

Figure60. (A, B). Evolution des anions en fonction de la conductivité électrique..... 97

Figure 61. Indices Histogramme des valeurs propres de la zone étude 99

Figure 62. Espace des variables de l'ACP globale…….100

Figure 63. Projection des individus sur le plan factoriel (1-2) 101

Figure 64 . La carte de la distribution spatiale de la conductivité électrique des puits dans la plaine de Tébessa-Morsott ……103

Figure 65 . Carte de vulnérabilité à la pollution de la nappe aquifère Tébessa-Morsott…...104

Figure 66. Carte du degré de vulnérabilité dans le bassin versant de Tébessa. **(Bouchagoura,2019)** 105

Figure 67. Carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la région de Tébessa selon la méthode DRASTIC. **(Djebassi,2021)**..... 106

Tableau .1. Résumé schématique de la stratigraphie de la plaine de Tébessa (d'après Durozoy et Morel, 1956) 16
Tableau .2. Les coordonnées Lambert de la station de mesure de Tébessa (météo de Tébessa) 22
Tableau .3. Indices d'aridité mensuels (I) à la station de Tébessa 23
Tableau .4. Variation des précipitations au niveau de la station de Tébessa (2002022) 26
Tableau .5. Répartition des précipitations à la station de Tebessa (2002022) 32
Tableau .6. Bilan hydrologique moyen (1999-2000/2021-2022) à la station de Tébessa, par la méthode de Thornthwaite 33
Tableau .7. Echelle des résistivités des différentes formations géologiques 37

Tableau .8. Résultats des essais de pompage de la station d'étude (hydraulique de Tébessa) **(Debz, 2019**) …..... 49

Tableau .9. Les coordonnées des forages dans la zone d'étude 57

Tableau .10. Poids relatifs des paramètres chimiques 61

Tableau .11. Classification de la gamme et de la catégorie d'eau de l'OMS 63

Tableau .12. Degré de qualité (Qi), sous- indice de chaque paramètre chimique(Sli), IQE et classification de l'eau de chaque échantillon d'eau souterraine des zones d'étude……. 63

Tableau 13. Les indices d'aptitude des eaux à l'irrigation…… 64

Tableau .14. Classification des indices par d'aptitude des eaux à l'irrigation …… 65

Tableau .15. Valeurs limites des paramètres utilisés dans l'évaluation de la qualité (qi) …… 66

Tableau .16. Classification de IWQI …… 66

Tableau .17. Le résultat de calcul l'indice de qualité de l'eau d'irrigation……... 67

Liste des tableaux

Tableau.18. Statistiques normales des paramètres des échantillons d'eauxsouterraines..... 70

Tableau .19. Les résultats du calcul des indicateurs d'aptitude des eaux à l'irrigation……87

Tableau.20. L'indice d'échange de base des eaux souterraines de la zone d'étude 70

Tableau.21. L'indice de saturation de la région de Tébessa..... 91

Tableau .22. Résultat de l'analyse de la matrice de corrélation des paramètres de la qualité de l'eau souterraine 95

Tableau .23. Différents variables et axes (bassin versant de Tébessa- Morsott).....96

Tableau. 24. Corrélations entre les variables et les facteurs (Tébessa-Morsott) 97

Tableau. 25. Les puits domestique (bassin versant de Tébessa- Morsott) …….99

Liste des abréviations

BV : bassin versant.

SIG : système d'information géographique.

IQE : l'indice de la qualité d'eau.

IWQI : irrigation water quality index

CGG : compagnie générale géophysique.

ANRH : agence nationale des ressources hydraulique.

SMT : station météorologique Tébessa**.**

ETP : évapotranspiration potentielle**.**

ETR : évapotranspiration réelle.

Da : Déficit agricole.

AEP : alimentation en eau potable.

SEB : Stroy Export Bragues.

D HW : direction d'hydraulique de la wilaya.

SSE : Sud Sud Est.

NNW : Nord Nord West.

MNT : modèle numérique de terrain.

TH: titre hydrotimétrique.

IDW: inverse distance weighting.

KO : ordinary kriging.

OMS : organisation mondiale de santé.

IS : indice de saturation.

Ph : potentiel d'hydrogène.

TDS : total des solides dissous.

I.E.B. : Indice d'échange de base

SRTM: Shuttle Radar Topography Mission

Introduction générale

Nous avons évolué au fil de l'histoire et nous construisons des villes très sophistiquées mais l'eau reste l'élément le plus vital pour l'existence de la vie dont nous avons besoin à chaque étape de ce développement, dans tous les domaines. De sorte que les autorités compétentes sont passées à une étude de terrain moderne, utilisant la technologie pour étudier avec précision les propriétés fluctuantes des aquifères souterrains, afin d'atténuent les risques de manque et de contamination.

La détérioration de la qualité de l'eau dans les régions à climat semi-aride comme la plaine de Tébessa-Morsott est le résultat de plusieurs facteurs, notamment les activités humaines

L'extension des superficies irriguées et la croissance des activités d'agricoles, avec l'utilisation excessive de l'eau souterraine pour l'arrosage comme seule source d'eau, ainsi que l'usage de pesticides et d'engrais chimiques par les agriculteurs ont pollué les eaux souterraines, cette pollution aggravée par le dépôt non réglementé des déchets organiques et industriels en surface, les déversements incontrôlés des eaux usées domestiques et la croissance rapide de la population

Il est essentiel de prendre en compte l'impact fluctuant de la lithologie et des variations climatiques, ce qui nécessite une gestion attentive de ces ressources.

Le bassin versant Tébessa -Morsott est localisé dans le nord-est de l'Algérie, représente un fossé d'effondrement à structure synclinale qui renferme un aquifère peu profonde ce qui rend la nappe alluviale sensible à la pollution provenant de la surface.

L'indice de la qualité des eaux est crucial pour évaluer leur aptitude à la consommation et à l'agriculture. Il permet également de suivre de la minéralisation annuelle à travers l'étude hydrochimique de l'aquifère.

Pour une meilleure cartographie dans ce travail, on s'est servi du SIG comme outil pour interpréter et estimer les caractéristiques physico-chimiques de la nappe ainsi que pour faciliter la distribution et la classification de la qualité des eaux.

L'objectif de l'étude est de mieux comprendre de la nature et les propriétés physico-chimiques de la nappe de la plaine Tébessa-Morsott.

Pour bien protéger la nappe contre toute forme de pollution éventuelle, causée surtout par l'activité anthropique et le lessivage des formations géologiques, nous allonsprocéder à

Une étude qualitative des eaux souterraines.

Le but de l'étude

Cette étude examine les objectifs déjà accomplis concernant la plaine alluviale de Tébessa à travers des mémoires d'ingénieur, de Magister et les thèses de Doctorat, à savoir :

- Actualisation des connaissances, exploration du contexte naturel et des propriétés de l'eau souterraines déterminant sa qualité.
- Analyse des caractéristiques physiques et chimiques de l'eau.
- Étude des interactions entre les divers paramètres physico-chimiquesde l'eau.
- Étude des processus d'origine de la minéralisation des eaux souterraines.
- Etudier l'origine de la salinité des eaux souterraines dans la plaine.
- Création d'un modèle d'aide à la décision utilisant des techniques de reconnaissance de forme pour la prédire de l'indice de la qualité de l'eau.
- Evaluation de la qualité des eaux souterraine de la plaine de Tébessa-Morsott à travers le calcul de l'indice de qualité globale de l'eau (IQE) basé les paramètres physico-chimiques, afin d'analyser les variations temporelles et spatiales de la qualité des eaux.

Structure du travail

Les résultats détaillés sont exposés dans cette thèse à travers les chapitres suivants :

- Une introduction générale
- Chapitre I : description générale du contexte de la région d'étude,
- Chapitre II : Analyse détaillée de la géologie régionale pour identifier avec précision les formations géologiques,la stratigraphie, la géomorphologie ainsi que les structures et les aspects tectoniques existants,
- Chapitre III : traite l'hydroclimatologie avec étude statistique des caractéristiques climatologiques, température et précipitation,

- Chapitre IV : présente la géophysique de la région : (prospection géo-électrique, diagraphie et gravimétrie) et l'hydrogéologie donne un aperçu précieux la géométrie de l'aquifère et des conditions d'alimentation incluant les conditions aux limites

- Chapitre V : description du matériel et les méthodes employées dans la réalisation de ce travail,

- Chapitre VI : traite l'hydrochimie avec ses différentes composantes, dans la plaine de Tébessa-Morsott.

- La conclusion générale récapitule les faits saillants de cette étude, offrant une Synthèse des principaux obtenus avec des recommandations.

Chapitre I
Caractérisation du Bassin Versant



1. Localisation de la zone d'étude

La plaine de Tébessa, ancienne ville romaine, était autrefois appelée Merdja.

La plaine de Tébessa-Morsott est située dans la partie Nord -Est de l'Algérie et s'étend entre **7** ° 50 'et 8 ° 10' de longitude est et 35 ° 24 'et 35 ° 35' de latitude Nord (figure 1). Elle s'entend sur environ 974,4 km^2 et comptait 205328 habitants selon le recensement de 2008.La plaine d'étude est bordée au Nord par les montagnes calcaires maestrichtiennes de Djebel Dyr (1432 m d'altitude), à l'Est par les formations triasiques de Djebel Djebissa (1120 m d'altitude) et au Sud elle est limitée par les massifs calcaires de Djebel Doukkane (1685 m d'altitude). **(L, Gouaidia,2017).**

Tébessa connait par un climat semi-aride marqué par un été chaud et sec (Les températures estivale peuvent atteindre 45 °C) et d'hiver froid avec des précipitations annuelles comprises entre 200 et 350mm. **(Ch, Fehdi,2014).** La série de montagnes qui borde la plaine de Tébessa-Morsott se trouve au Nord-Ouest parDj. Belkfif, au Sud par Dj. Gaaga, Dj. Bouzian, Dj. Mestiriet Dj. Tazbent à l'Est par Dj. Guenifida et Dj zitouna et à l'Ouest Dj. Troubia et Dj. Essen

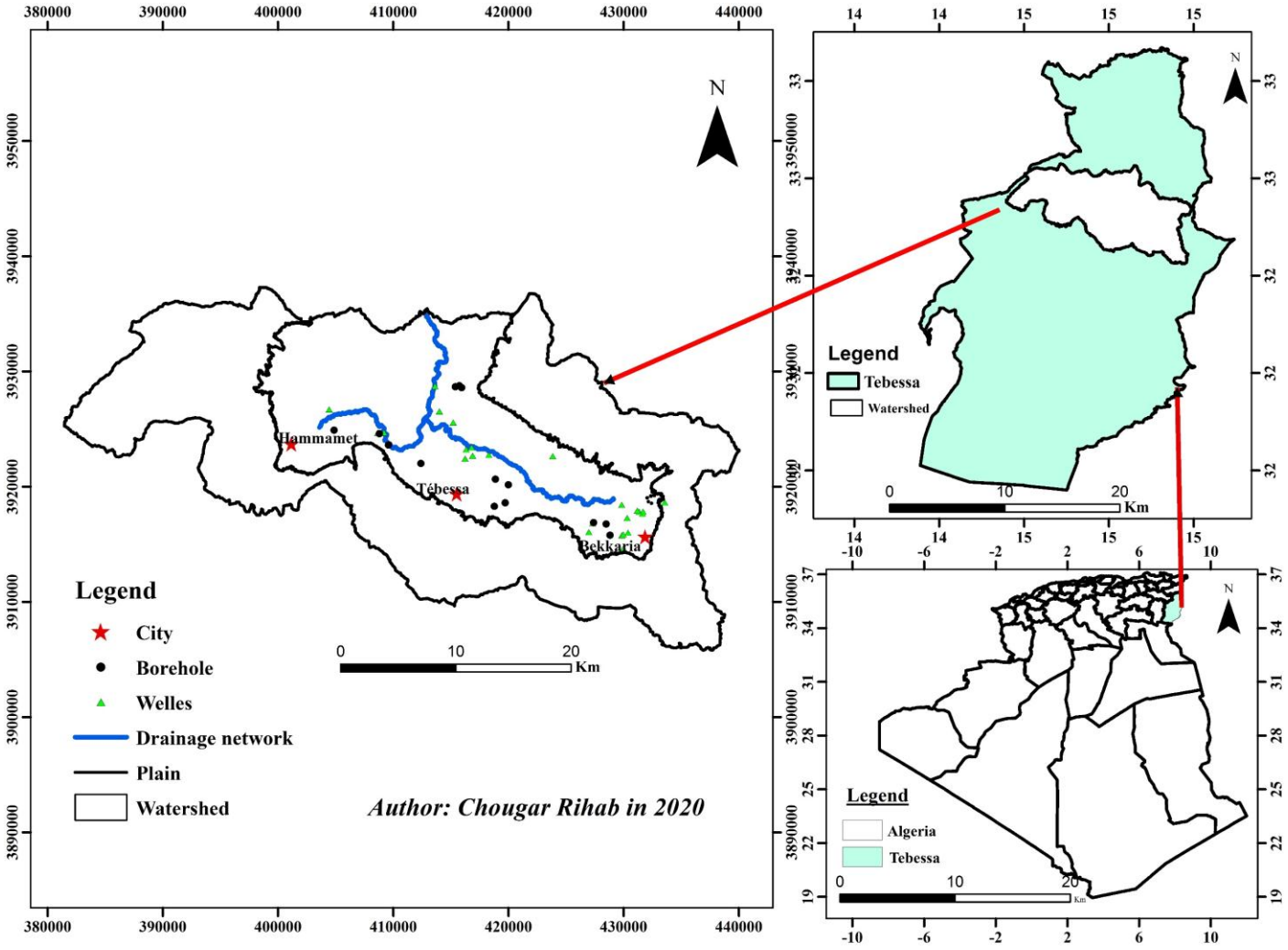


Figure 1. Présentation et situation de la plaine de Tébessa.

2. Cadre topographique

La zone d'étude présente une topographie relativement plate, prenantla forme d'une cuvette. Elle est bordée par un massif montagneux. La variation d'altitudeest comprise entre 700 m et 1712 m (le sommet du djebel Doukkane) (figure02).

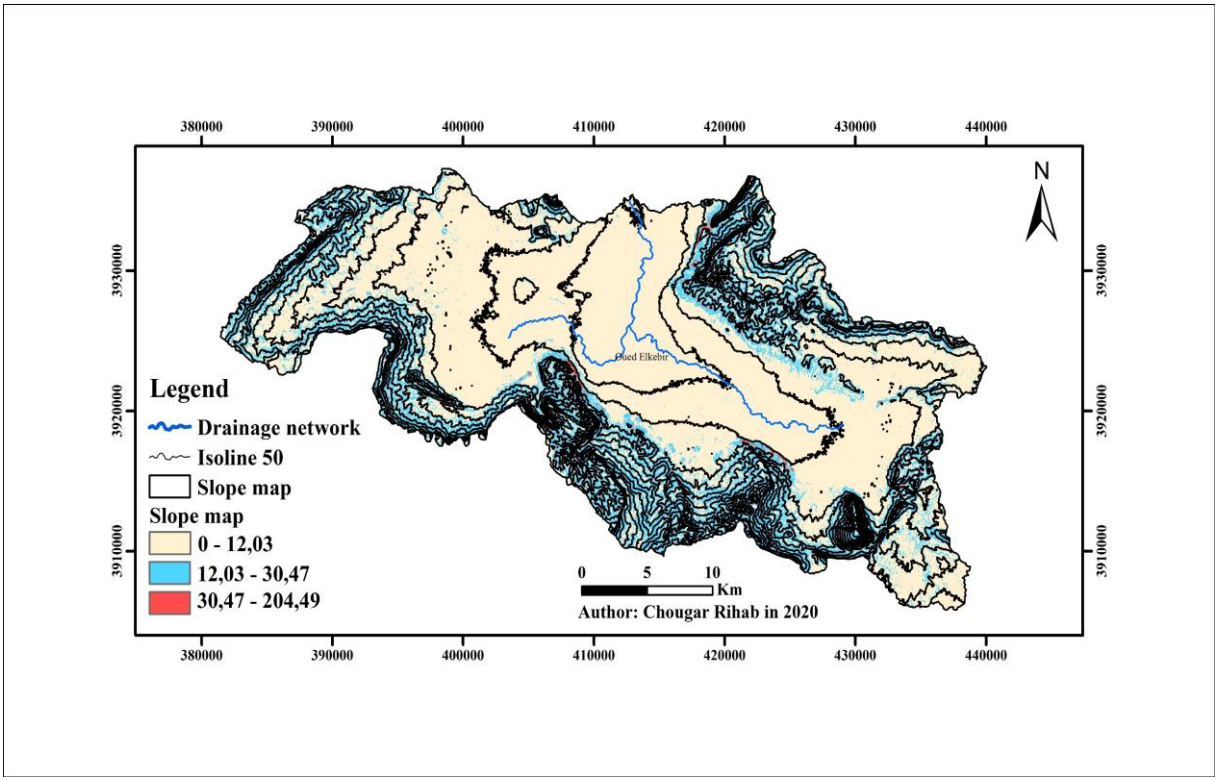


Figure.2 Carte de pente de la région étude.

3. Couvert végétal

Le couvert végétal du bassin versant Tébessa- Morsott est limité et peu dense. Seulement 40% de la surface totale de la plaine est recouverte par les très belles forêts, le sol calcaire prédomine dans la plaine avec une végétation dominée par le pin d'Alep, le genévrier phénicien et le cyprès. L'Alfa, Atriplex et armoise qui ne croissent que sur les marnes et les grés, sont utilisés localement pour pastoralisme. Les sédiments déposés au centre de la plaine, sont caractérisés par une agriculture céréalière irrégulière.

4. Hydrographie

L'ensemble des grands cours d'eau Oued Ksob, Oued Serdiess, Oued Bouakous, Oued Chabro compose le réseau hydrographique de la plaine étudiée. L'oued Bouakous se jette dans L'oued Ksob qui quant à lui se jette dans Oued Mellégue. L'oued ElKébir draine la plaine vers le nord, en direction l'Oued Chabro, ce flux dépend des conditions climatiques de la région

5. Population

Tébessa abrite environ 360 000 habitants. Cette wilaya s'étend sur une superficie de 13 396 km². La concentration principale de la population se trouve à Tébessa même, ainsi que dans les zones urbaines de Bekkaria, Boulhef-Dyr, Hammamet, Bir D'heb, Ain Foda et Morsott **(S, Brahmi,2021)**.

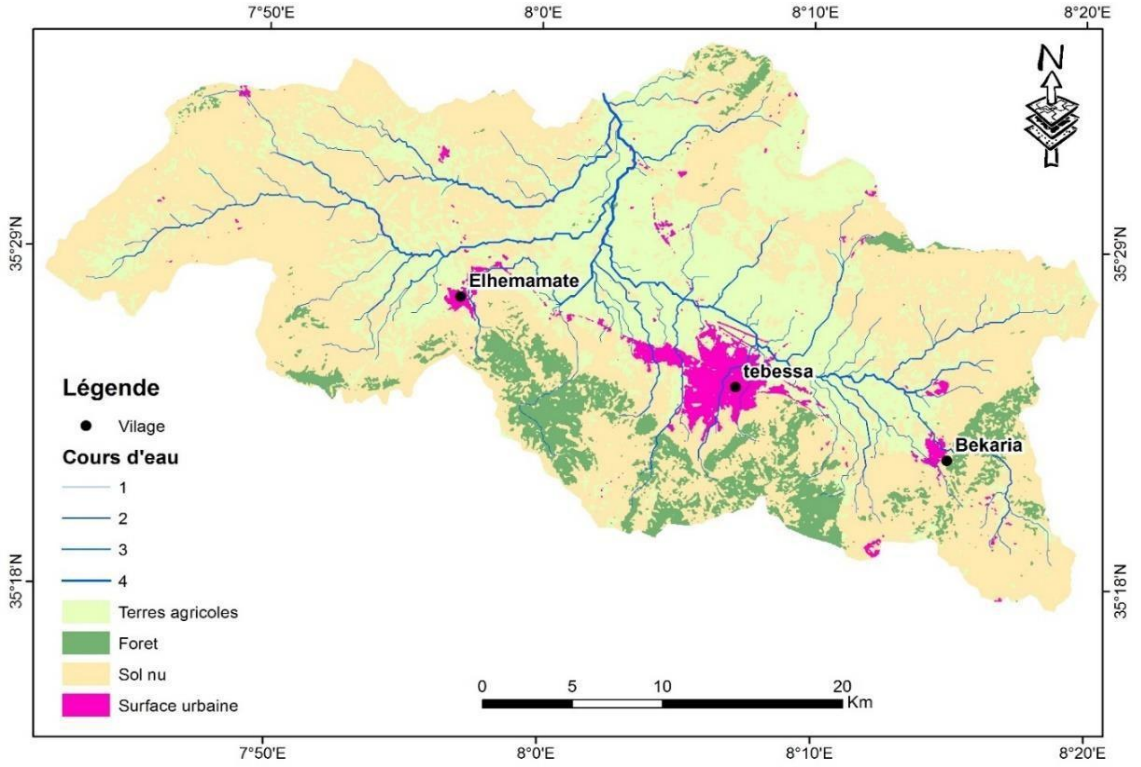


Figure 3. Carte de la végétation de la zone d'étude (**Bougachoura,2019)**

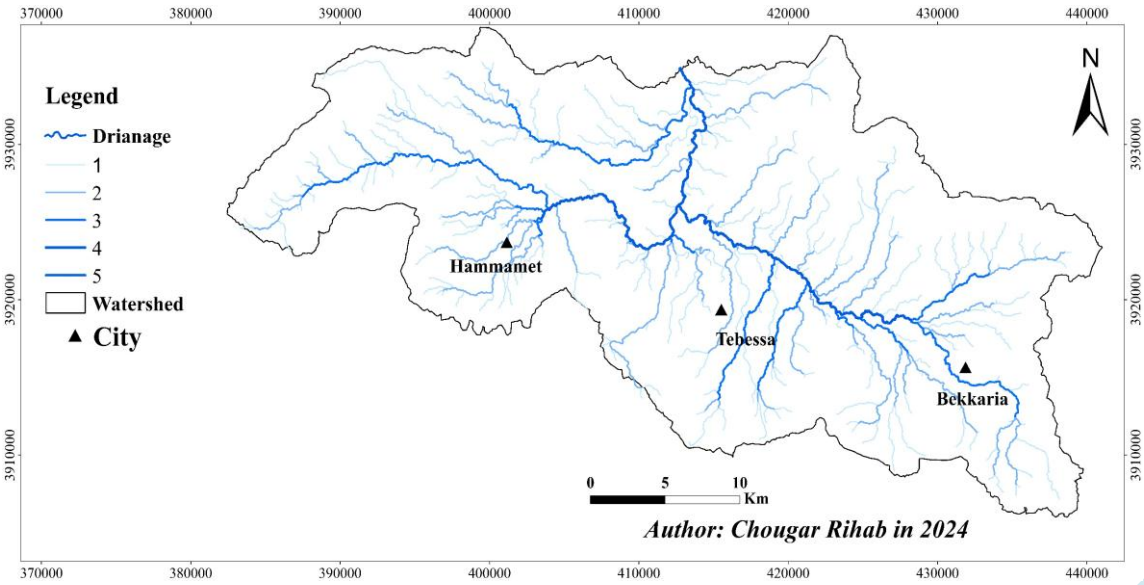


Figure 4. Réseau hydrographique du bassin versant de la zone d'étude.

6. Contexte économique

La région d'étude se distingue par une forte activité agropastorale reconnue à l'échelle nationale pour ses vastes zones steppiques, qui constituent la principale source de revenu des populations. Cependant, les ressources alimentaires du cheptel ont diminué en raison de la sécheresse. En conséquence, des régions pastorales se développées, notamment grâce à l'expansion du soutien agricole qui reposant sur la mobilisation des ressources en eau souterraine **(Zereg ,2010).**

7. Aperçu géomorphologique

La plaine de la région est caractérisée par un vaste fossé d'effondrement, situé à une altitude de 800 mètres, et entouré par d'un massif calcaire important. Le relief de cette plaine est composé d'un ensemble de synclinaux et anticlinaux, composés de sédiments. La structure géomorphologique est la suivante :

7.1. Série montagneuse : Le relief complexifie à l'Est de Dj. Doukkane, avec une barrière qui se dirige de l'Ouest vers l'Est avant de s'incliner vers le Nord-Est où elle fermant la plaine de Tébessa. Cette barrière se manifeste sous forme de petits massifs tels que Dj. Anouel, Dj. Azmor, Dj. Bouramane et Dj. Djebissa.

7.2. Plaine de Tébessa : Des sédiments récents d'âge quaternaire sont présents principalement des cailloutis de calcaires, marnes, d'argiles et de sable fin à moyen. La carte de remplissage quaternaire de la plaine Tébessa Hammamet est évidente que l'épaisseur de ces formations a atteint 550 m au cœur de la région (**Seghir, 2008).**

8. Conclusion

La plaine de la Merdja (Nord-Est Algérie), qui est un fossé d'effondrement à structure synclinale, a été créée à la suite du grand mouvement tectoniques qui a eu lieu pendant le Villafranchien et le Pléistocène. Elle est caractérisée par une vocation agropastorale avec végétation claire. La plaine est drainée par l'Oued Kébir qui se déverse vers le nord vers l'Oued Chabro. Le climat semi-aride, chaud et sec en été et froid en hiver.

Chapitre II
Géologie



1. Introduction

L'importance de la géologie est primordiale pour repérer la lithologie et l'hydrogéologie. Les caractéristiques des affleurements (les dépôts alluvionnaires) ont un impact sur l'hydrologie de surface. Nous allons d'abord présenter brièvement quelques traits généraux sur la géologie du bassin versant Tebessa-Morsott et passer par la suite à une description des formations rencontrées au niveau de la zone étudiée.

Selon plusieurs anciens travaux **(G. DUROZOY 1956, J. M. VILA 1980, W. M KOVALSKI et all)**, L'Atlas saharien nord-aurassien comprend la zone étude.

Elle est issue du vaste mouvement tectonique du Villafranchien et du Pléistocène. La zone a été identifié grâce à l'analyse micropaléontologique et biostratigraphie. Le terrain est marqué par une grande dépression d'âge plio-quaternaire qui sépare montagnes élevées de Dj Dyr au Nord de celles du Doukkane et du Maestrichtien au Sud. Le Djebel Djebissa est principalement composé des formations triasiques, avec des dépôts d'évaporites et d'argile dans la zone orientale du bassin.

L'essentiel de la plaine est constitué de matériaux détritiques de remplissage provenant de l'érosion et de la détérioration des sols locaux. Ce matériau de remplissage est principalement d'origine alluviale étant déposé par le principal cours d'eau (Oued El Kébir) qui traverse le bassin. Ce dépôt alluvial, composé de limons, de croûte calcaire, de conglomérats et de graviers du Plio-quaternaire repose sur un substratum marneux et constitue l'aquifère principal (**Fehdi ,2014).**

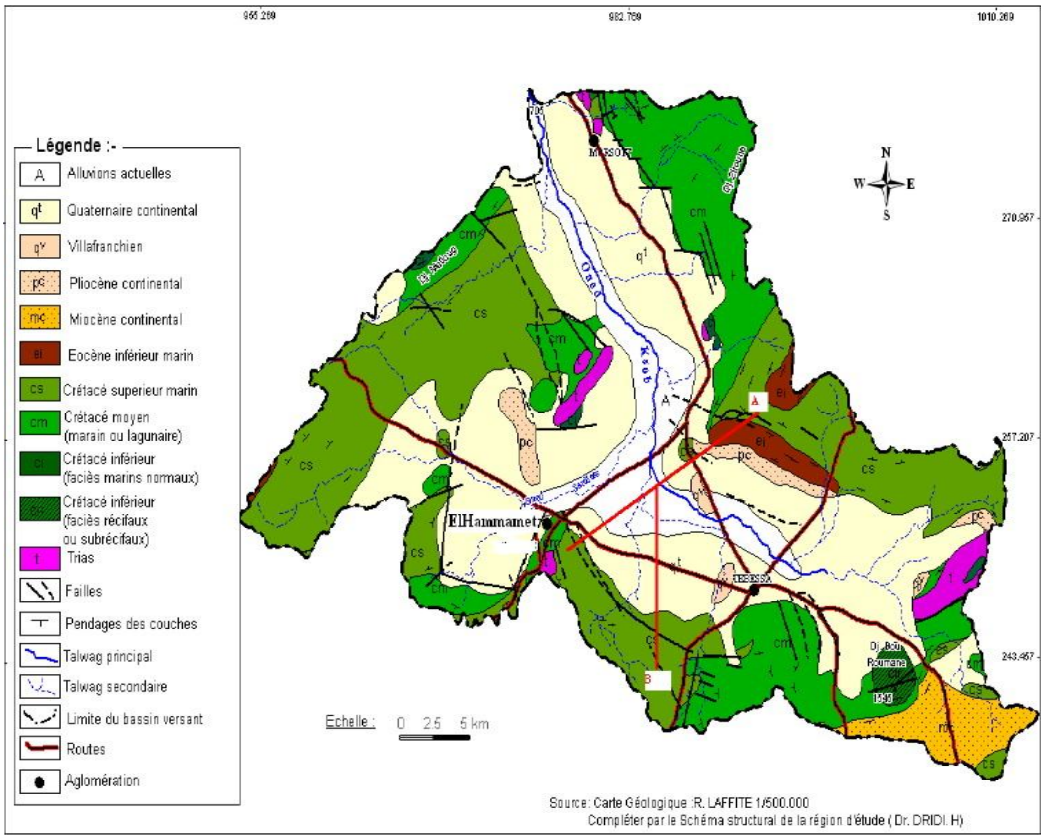


Figure 5. Carte géologique de la région de Tébessa- Morsott **(Drias,2014).**

2. Stratigraphie et description des facies

Un résumé des recherches litho-stratigraphiques **(S. Laouar, 2004)**. La stratigraphie de Tébessa principalement d'époque Méso- Cénozoïque, avec des faciès essentiellement marins, argilo-carbonatés, avec des intercalations argilo-gréseux correspondant aux périodes du Néocomien, au Barrémien, à l'Albien inférieur et au Miocène. Ces séries stratigraphiques ont de très grandes différences de faciès qui caractérisent des aires paléogéographiques bien distinctes, ainsi, on distingue :

• Un fond élevé se trouvant au Nord-Ouest, c'est le môle d'Ain M'lila.

• Une zone située au Sud-Est de Tébessa q u i favorite l a formation de faciès de type néritique parfois récifal.

• Les dépôts pélagiques se trouvent principalement au centre du périmètre depuis l'Albien supérieur, témoignent de l'importante transgression marine du Vraconien.

2.1. Mésozoïque

2.1.1. Le Trias

Au Sud-Ouest de Dj Djebissa, les formations principales de l'étage affleurent sous forme de diapir le long des accidents géologiques longitudinaux et l'intersection des accidents NW-SE et NE-SW 80 Km de longueur. Les dépôts triasiques manifestent par d'extrusions au centre des structures anticlinales **(Perthuisot ,1994 ; Aoudjehane et al., 1992)**. Au cours de cette l'époque géologique, on a observé une succession de dépôts évaporitiques et argilo-gypsifères **(Chevenine et al., 1989)**, avec des marnes bariolées a gypse, de dolomies, de calcaires dolomitiques noirs en pièces.

2.1.2. Crétacé

a. Le Crétacé inférieur

2.1.2.1. Le barrémien

Les formations Barrémiennes, situées à environ 250 m de profondeur, se caractérisent par des marnes argileuses grises ou jaunes avec ammonites pyriteuses et de calcaires noduleux gris clair à patine ocre **(Dubourdieu, 1956).**

2.1.2.2. L'Aptien

Les affleurements Aptiens sur le flanc nord de Djebel Bouromane se manifestent par de grands massifs épais à quelques lamellibranches, de moules internes de Gastéropodes, se présentant sous deux formes principales, d'une épaisseur de 450 m, sont composées de calcaires bréchique à ciment dolomitique, de calcaires graveleux et bioclastiques à orbitolines et de mollusques. Parfois, on observe des intercalations de quelques niveaux de marnes feuilletées de couleur rouge violacée ou verte.

2.1.2.3. Le Clansayésien

Différents anticlinaux de la plaine présentent des affleurements de marnes Grises, jaunes avec ammonites ainsi et des calcaires gréseux **(Dubourdieu, 1956).** La formation aptienne dans cette zone est environ 700m.

2.1.2.4. L'Albien

La formation albienne débute par un faciès carbonaté de type récifal en bas devenant marneux et marno-calcaire vers le haut **(Bouzenoune, 1993 ; Othmanine, 1987 ; Nedjari-Bélhacéne et Ndjari,1984)**. Sur le flanc sud et sud-est de DjebelBouromane, elle se compose une alternance de bancs calcaires bruns à Ostrea Latissima, et de bancs de calcaires à rudistes, (Albien supérieur). Ainsi que le calcaires et marno-calcaires gris en plaquettes, Elle est riche en Ammonites et en Bélemnites, son épaisseur avoisine 150m dans (Albien inférieur).

2.1.2.5. Le Vraconien

L'épaisseur de la formation est de 500 à 600 mètres, composé des marnes et de calcaires argileux **(Dubourdieu, 1956).** La formation se développe de manière transgressive, souvent sur le Trias ou les formations Aptiennes **(Thibiéroz et madre, 1976)** et **(Othmanine, 1987)**. Avec des sédiments marno-argileuse, le Vraconien contrôle la minéralisation polymétallique.

2.1.2.6. Cénomanien

A une distance 300 mètre on trouve des marnes grises alternent avec de calcaires riches en lumachelles à huîtres, Echinodermes et Ammonites. Ainsi que marnes peu verdâtres en bas. Il est présent à au flanc Est de Dj. Ozmor et au Sud-Est de Dj. Djebissa, marque par de microfaune abondante.

2.1.2.7. Turonien Inférieur

Il s'agit de gros bancs de calcaires gris avec des gastéropodes et de rares Madréporaires. Ainsi que des bancs moins denses de calcaires plus argileux, contenant des inocérames allongés, trouvés à Est de Dj. Djoua, le versant Nord-Est de Dj. Ozmor et le versant Ouest de Dj. Anoual.

2.1.2.8. Turonien supérieur

La séquence décrite s'étend jusqu'au Coniacien, avec une couche initiale de 50 m suivie par une formation marneuse de150 m. Elle est surmontée des bancs de calcaires individuels avec des lumachelles et des Foraminifères.

2.1.2.9. Campanien

Des marnes argileuses gris verdâtre et jaune gris présentent des plaquettes de calcite fibreuse et intercalation de marnes à lumachelles et leur épaisseur varié de 200 à 600 mètres.

2.1.2.10. Le Maestrichtien

La région est caractérisée par des calcaires blancs stratifiés d'environ 60m d'épaisseur et est recouverte d'un canapé argileuse grise noir d'une épaisseur de 150m, avec quelques intercalations de calcaire à sa base **(Dubourdieu, 1956).** Ces formations présentent au nord dans djebel Edyr et aussi en long bordure de la plaine se forme des éboulis.

2.2. Cénozoïque

2.2.1. Paléocène

Les formations de 200 m ont été séparées en deux groupes, comprenant des marnes

Au Maestrichtien supérieur présentent des couches phosphates intercalées vers les niveaux supérieurs.

2.2.2. L'Eocène

Au nord de la plaine à Djebel Edyr, on trouve des formations l'Eocène inférieur et moyen avec une épaisseur de 200 mètres. Elles se distinguent des couches de calcaireà silex et à nummulites.

2.3. Quaternaire

Dans les régions inférieures du relief, les dépôts continentaux quaternaires sont très importants, avec des croûtes calcaires, des limons éboulis, des cailloutiset poudingues qui contribuent à leur composition, d'une épaisseur variante entre 10 et 30 m **(Dubourdieu, 1956).** Les lithologiques distinguées sont les lithologies actuelles, anciennes et le Plio- Quaternaire.

2.3.1. Les Formations anciennes

2.3.1.1. Alluvions anciennes

Les alluvions anciennes se trouvent en amont de l'Oued Oglat el Rbaïb en allant en direction El-Kouif. Elles se distinguent par leurs fluviales qui se rattachent généralement à une formation ancienne occupant une plus grande surface latéralement avec des niveaux localement discernables.

2.3.1.2. Alluvions anciennes de piedmont

Elles bordent la plaine de Tébessa, formant piedmonts. Les roches sont caillouteuses comprennent des calcaires du Maestrichtiens à l'ouest et au NE, des Eocènes au Nord et des turoniennes à l'Est sur les flancs du Dj Djebissa. Les formations sont caractérisées par grande variété d'éléments, avec des cônes de déjection en amont et argileuses en aval, essentiellement constitués de marnes.

2.3.1.3. Matériel d'épandage ancien en terrasse

L'espèce se compose essentiellement de cailloutis et d'une mince couche d'argile à l'extrémité occidentale de Tébessa, notamment dans la région de Chabet el Hallouf sur les marnescrétacées.

2.3.1.4. Matériel d'épandage ancien : éboulis et cônes de déjection

On les trouve souvent le long des bordures et aux pieds des formations calcaires,se sous trois modèles :

a. L'anciens éboulis et cônes de décharge sont souvent érodés par les cours d'eau.

b. Des éboulis massifs, issus des calcaires maestrichtiens, disloqués, sont altérés par l'érosion

c. Les cônes rougeâtres sont constitués des roches calcaires cimentées, se développent exclusivement à partir des reliefs Maestrichtiens tels que Dj Mestiri, Chabet el Hmara, Ksar Tebinet.Parfois inclinés vers l'amont, ils peuvent être résultat de dépôt récent de matériaux provenant des accidents géologiques ou de mouvements de solifluxion sur les marnes environnantes.

2.3.1.5. Cailloutis ancien du Dj. Djebissa

Ces formations géologiques se trouvent fréquemment sur les argiles à gypse du Trias ou sur les marnes Cénomaniennes.

2.3.1.5. Plio-quaternaire(Villafranchien)

Les dépôts sédimentaires de la période géologique du plio- quaternaire (Villafranchien) sont composé de :

a ; Argile de couleur rouge (O. Oglat Rbaib ; O. kébir ; kodiet el Kramassa ; O. Serdiess) ;

b ; Dans l'Est du Dj. Djebissa.au kodiet et dans l'Ouest à Naguess, près de Tébessa, les

conglomérats alternent parfois avec de l'argile sans distinction nette. Ces sédiments souvent inclinés, peuvent être le résultat de dépôts de pente anciens à l'Est du Dj. Djebissa ou d'origine tectonique à L'Ouest de Naguess. un sondage dans la basse plaine de Tébessa a traversé ces couches sur 171 m.

Formations actuelles

a) **Eboulis actuels :** Tous les grands reliefs calcaires sont exposés au bas de ces formations mais ils sont fréquemment pris pour des éboulis anciens.

b) **Travertins :** Ils proviennent des ressources de Tébessa et de Tenoukla.

c) **Alluvions actuelles :** les alluvions soulignant les rives des affluents qui bordent la plaine, surtout le long d'Oued Ain Chabro au sud-ouest. Ces oueds traversent les formations sur leur chemin, déposant des alluvions le long de leur passages.

d) **Limons récents :** La vaste vallée de l'Oued Kébir. Dans la Merdja de Tébessa ou les dépôts de gypse alluvionnaires sont fréquemment exploités, présentent des formations de limons récents.

e) **Croûtes calcaires :** Ces dépôts superficiels, résultant de l'évaporation de l'eau contenant de calcaires et se déposent surtout sur des terrains anciens caillouteux, recouvrant l'ensemble de la plaine.

f) **Brèches et cailloutis anguleux :** des accumulations anciennes d'une épaisseur de plusieurs mètres, sont situés aux fondements des formations calcaires.

Tab.1. Résumé schématique de la stratigraphie de la plaine de Tébessa.

EPS	ERE	Syst per	Sous Syst époque	Etages	Sym-bole	Coupe	Faciès et fossiles
150	QUATERNAIRE				q		Limons, argiles, galets, cailloutis, et éboulis actuels.
250	TERTIAIRE	NEOGENE		Plio-villa franchien	Pg		Dépôts argilo-gonclomératiques
250			MIOC-ENE	Tortonien	m		Faciès littoraux, sables quartzeux avec une grande abondance de grain de glauconie. faciès continental, Sables quartzeux.
				Serravallien Langhien			
				Burdigalien			
200		PALEOGENE	EOC-ENE	Lutétien	E		Calcaire Calcaire à silex.
				Yprésien			
100			PALE-OCENE	Thanitien	P		Marno-calcaire et phosphate Marnes.
				Danien			
200	SECONDAIRE	CRETACE	Supérieur SENONIEN	Maestrich--tien	C_9		Calcaire en banc blanchâtre renferme des « *Inocerames* » Marne grisâtre
200				Campan--ien	C_8		Marne grise à intercalation de bancs de calcaires blanc crayeux avec des nombreux filons du calcite dans la partie inférieure.
250				Emschér--ien	C_7		Marne avec intercalation des bancs lumachelliques.
150			Inférieur	Turonien Supérieur	C^6_b		Calcaires massifs beiges, par fois roses localement dalomitisés.
100				Turonien Inférieur	C^6_a		Marno-calcaire gris à patine rousse (100m), ensuite calcaire marneux à « *Inocérames* » allongé à test noir.
—				Cénomani--en	C_5		Marnes grises très fossilifères. Marnes à filons de calcite et à intercalation de minces lits de calcaires très dures.
90				Albien	C_2		Bancs de calcaires, bruns, épais
100				Aptien	C_1		Gros bancs de calcaires souvent bréchiques à « *Orbitolines* » et rudistes.
-		TRIAS	TRIAS		t		Argiles rouges, marnes gypsifères.

Colonne stratigraphique (Durozoy et Morel, 1956).

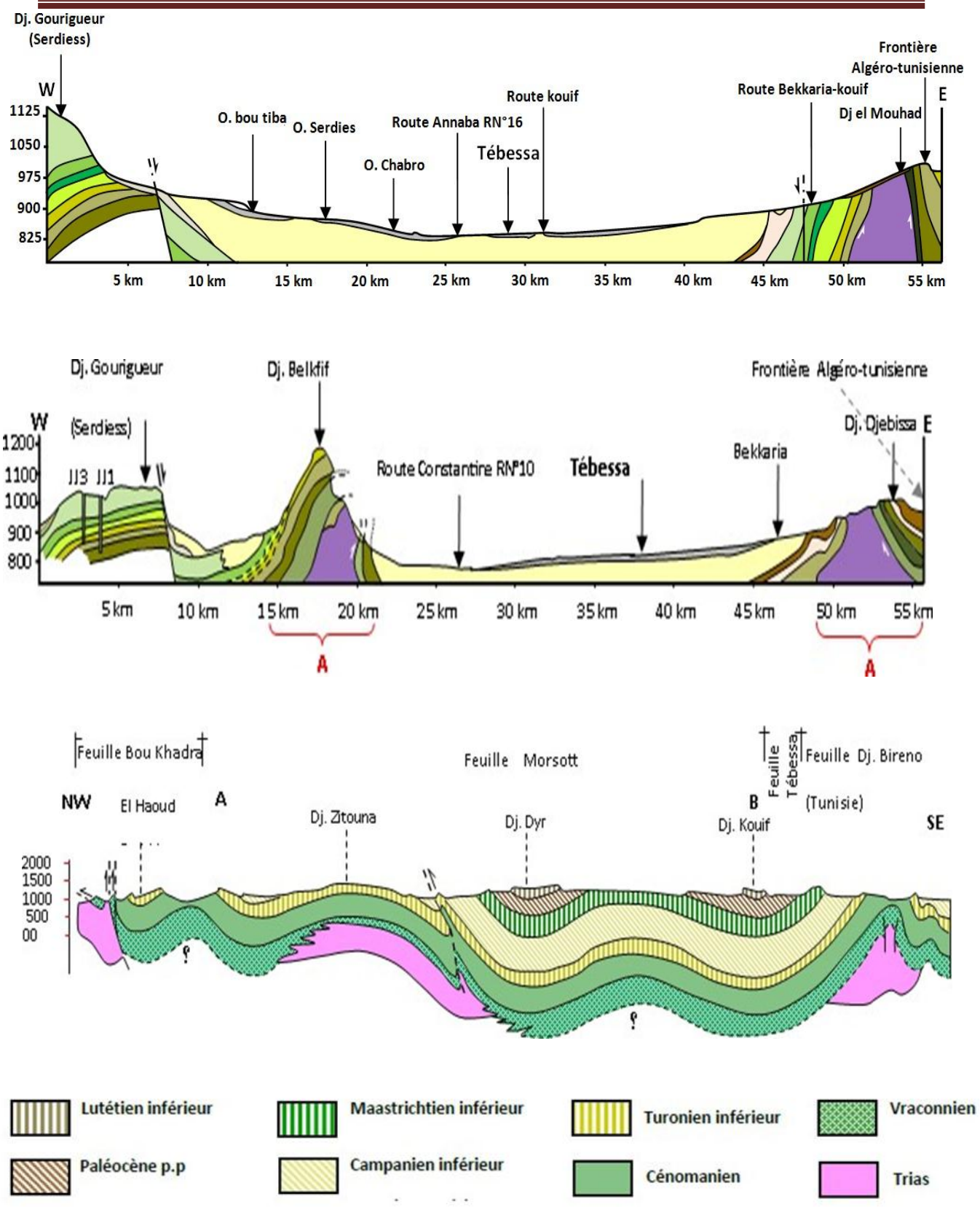


Figure 6. Coupe Géologie schématique de la zone d'étude.

3. Les Monts

3.1. Les Monts septentrionaux

La transition des hautes plaines du Mellègue vers les monts de Tébessa se traduit par d'une diminution des plaines et l'association d'unités géomorphologiques comme le val perché de Dyr et celui de Bou Rbaia. Dans cette bordure nord, la plupart des plis sont recoupés par des failles transversales.

3.2. Les Monts méridionaux

Le fossé d'Ain Chabro modifie au sud les formes de relief qui étaient auparavant assez s y m é t r i q u e s . A l'Est de Djebel Doukkane, Le relief se complexifie progressivement. La plaine de Tébessa est formée par une barrière Est-Ouest qui s'incline vers le Nord-Est. Cette barrière est formée de petits massifs tels que Djebel Anoual, Djebel Azmor, Djebel Bouroumane et celui de Djebissa.

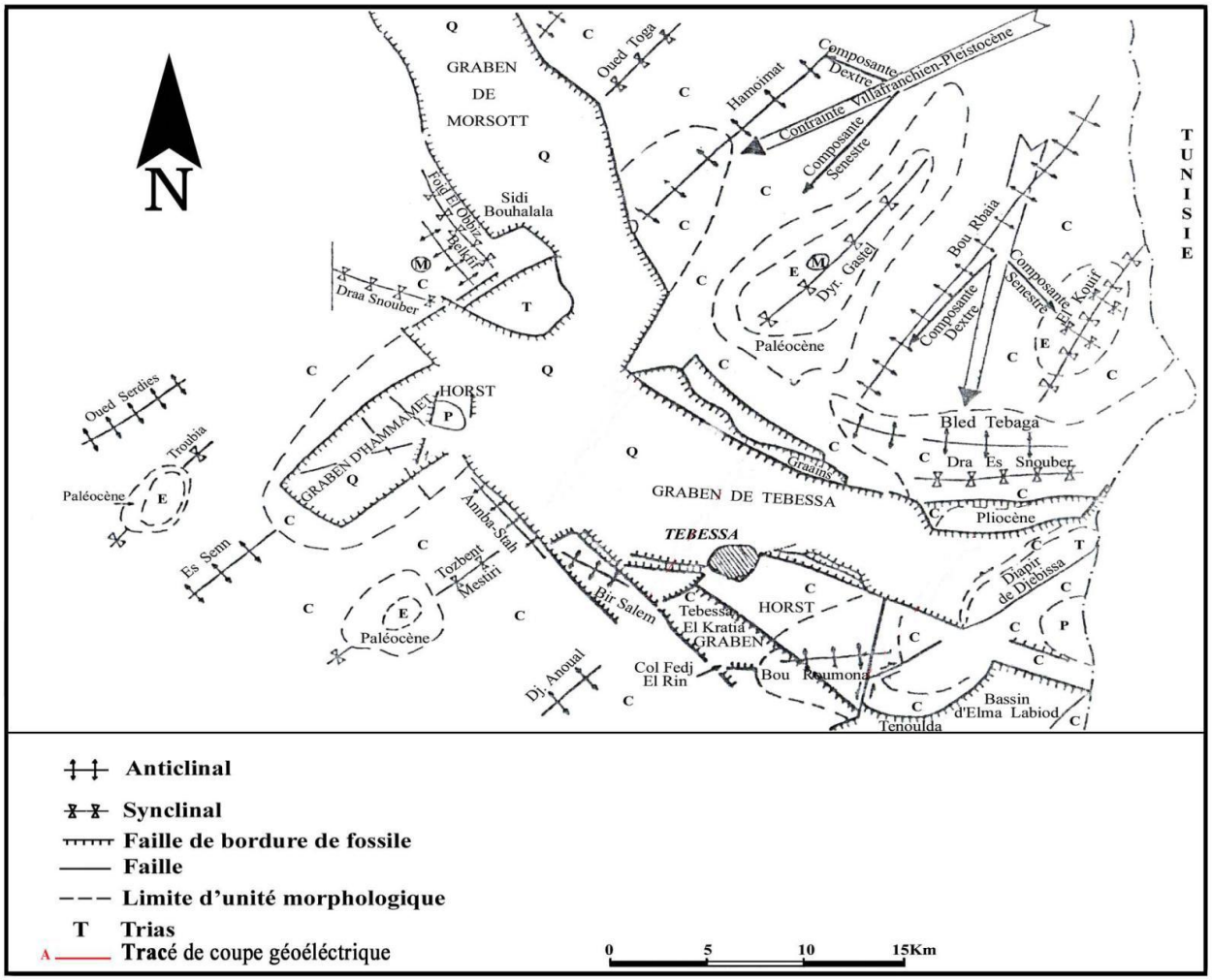


Figure 7. Schéma structural de la zone d'étude **(KOWALSKI W.M 1997).**

4. Tectonique de la région

Dans la zone de Tébessa, la phase tectonique se distingue par une série d'orientations SW-NE qui impactent les formations crétacées, Les différentes structures s'étendent du NW au SE, y compris le synclinal de l'Oued Toga, le flanc -Sud de Hammamet et les replis synclinaux et anticlinaux de Dj Boulhaf Dyr et Dj Chemla, L'anticlinal de Dj Dyr et Dj Doukkane, L'anticlinal de Bou Rbaia, L'anticlinal du Dj Djebissa et Dj Bouromane.

La direction principale des plis SW-NE avec une composante partielle NNE-SSW. Ces mouvements sont antérieurs aux miocènes. Les failles qui accompagnent ces mouvements sont généralement des failles en escalier, mettant en contact les formations carbonatées de bordure avec le remplissage alluvionnaire de la plaine, donnant ainsi naissance à plusieurs sources (sources d'Ain Chabro, source de Kissa, source de Chabro) **(Tarek Derias ,2013).**

4.1. Les phases de l'orogenèse

La zone région a connue des cinq phases de l'orogenèse alpine **(Kowalski et al., 2002)** :

4.1.1. La phase fini- lutétienne

Elle se caractérise par des plis de direction atlasique N50-60 E avec une contrainte maximale N 330 E. **(G. Durozoy 1956)**.

4.1.2. La phase du Miocène Inférieur

La création bassin d'El Malabiod et de Kasseriene- foussana en Tunisie a eu lieu pendant la période du Miocène inférieur.

4.1.3. La phase du Miocène Supérieur

Elle entraine la chute des secteurs d'El-Aouinet, de Boukhadra et de Dj Belkefif. Se manifestant par d e s décrochements et de failles verticales. Sans doute est-elle à l'origine du diapir de Dj Belkefif.

4.1.4. La phase du Pliocène inférieur

Le remplissage de l'anticlinal de Dj Bouroumane et le diapir de Dj Djebissa ont eu lieu pendant cette phase.

4.1.5. La phase du Pliocène supérieur

Pendant cette étape, on observe des structures plissées plus récentes que le fossé de Morsott. Elles comprennent l'anticlinal de Belkfif, le synclinal de Faid -El Obis et

l'anticlinal d'oued. Aneda. La direction de ces plis est N160-170 E, avec une contrainte maximale N80 -E, elles ont contribué à l'éboulement du fossé de Tébessa en raison de la composante.

4.2. La formation du fossé d'effondrement de Tébessa

La formation du fossé d'effondrement de Tébessa s'est déroulée en quatre stades successives :

- Le premier stade s'est déroulé au cours de la période Villafranchien inférieur.
- La deuxième étape a eu lieu pendant au Villafranchien supérieur.
- Le troisième phase s'est déroulée à la fin du Pléistocène moyen.
- Le quatrième à la fin du Pléistocène supérieur.

La déformation actuelle est due par au soulèvement des bords du graben. Lors du deuxième stade, Les sédiments du Pliocène supérieur ont subi une érosion significative, impactant presque toute la surface de cette période. La zone axiale a été profondément effondrée, ce qui a engendré une large anti-graben de 2 Km **(A. Zerdezi ,1990).** Les argiles et de séries de cailloutis et calcaires ont été sédimentés localement par la substance modérée postérieure. L'érosion partielle des sédiments du Pléistocène moyen et le dépôt des galets du Pléistocène supérieur a également été causé par ce mouvement tectonique dans des zones érodées.

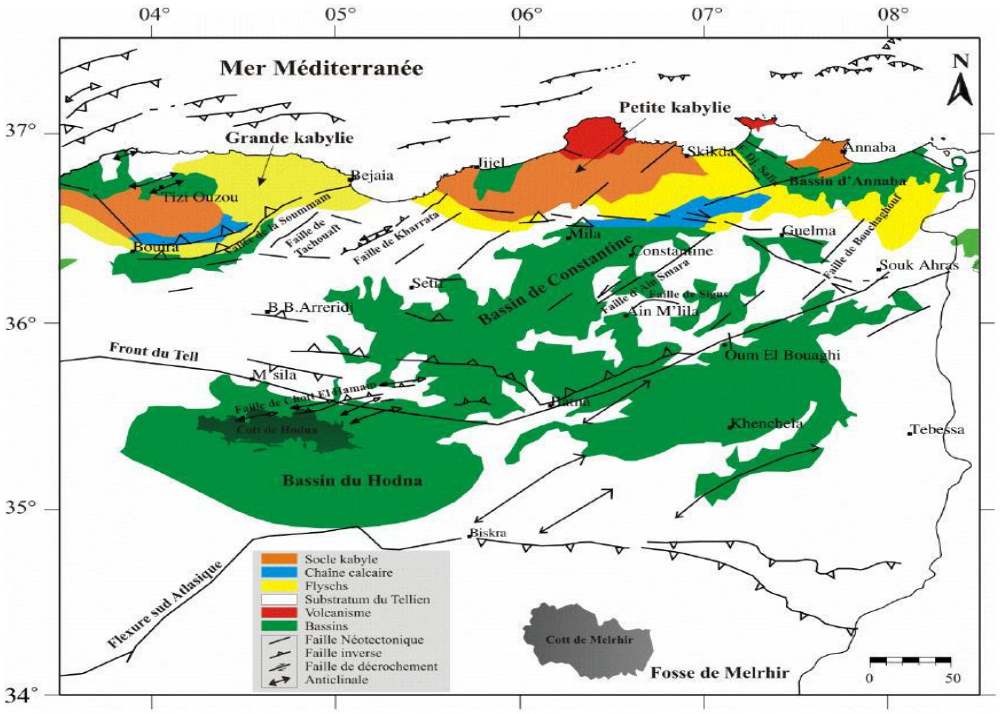


Figure 8. Carte géologique de la région Nord-Est de l'Algérie) **(Meghraoui, 1988)**

5. Conclusion

D’après les résultats des études géologiques antérieurs, la dépression d’âge plio-quaternaire se forment dans la zone d’étude, entourant les hautes montagnes de Dyr au Nord de celles du Doukkane au Sud. Le Djebel Djebissa se trouve dans la partie orientale du bassin Cette zone est dominée par d e s formations triasiques comprenant des évaporites, de l'argile. La plaine est essentiellement composée de matériaux détritiques de remplissage, issus de l'érosion et de la détérioration du sols environnants. Une grande partie de ce matériau de remplissage provient de l’alluvion, cette formation alluviale résultant de l’activité de Oued El Kébir, le cours d’eau principal du bassin. On remarque que cette accumulation alluviale (limons, croûte calcaire, conglomérats et graviers) du Plio-quaternaire repose sur un substratum marneux et constitue l'aquifère principal.

Chapitre III

Hydroclimatologie



1. Introduction

L'influence des facteurs climatiques est essentielle dans le fonctionnement des d'écoulementsuperficiel et souterrain. L'analyse hydro climatologique du bassin versant permet d'approfondir notre compréhension du fonctionnement hydrologique et hydrogéologique de ce bassin distinct. Son utilisation permet d'approcher les divers t e r m e s du bilan hydrique qui sont les précipitations, la température, les pertes de la nappe par évaporation et l'évapotranspiration.

La plaine de Tébessa-Morsott présente un climat semi-aride. Ces dernières années on remarque une augmentation de la sècheresse et des températures élevées, notamment en été. Même l'hiver ne connait plus autant de précipitations qu'avant. Ce phénomène entraine une l'augmentation de l'évaporation et l'évapotranspiration influençant ainsi ledéficit du bilan hydrique.

2. Choix des stations

Les éléments climatologiques de la région de la Merdja est traitée par de deux sources fiables ; l'Agence Nationale des Ressources en eau et la Station Météorologique de Tébessa, ce qui fournit des données précises et actualisées sur les conditions climatiques de cette région. Cette zone connait un déficit en eau pour diverses raisons, notamment la faiblesse des précipitations, l'augmentation de la population et l'intensification des activités agricoles

Le tableau 2 ci-dessous donne leurs principales caractéristiques.

Tab .2. Les coordonnées Lambert de la station de mesure de Tébessa (météo de Tébessa).

Station	Altitude (km)	X(km)	Y(km)	Latitude	Longitude	Période d'observation
Tébessa	890	991.9	247.2	35.41	8.12	2000/2022

3. Indices climatiques 3.1.

Indice de De. Martonne

L'indice de De. Martonne est déterminé en fonction de la température et des précipitations (2021/2022) selon la relation suivante :

$$\mathbf{I = \frac{P}{T+10}} \quad \mathbf{(2)}$$

I : indice d'aridité

P : précipitations moyennes annuelles en mm

T : températures moyennes annuelles en °C

Application :

P = 426.7mm

T = 16.57C°

Ce qui donne **I= 16.06**

Suivant les valeurs de (I), **De Martonne** a établi la classification suivante :

I < 5 : climat hyperaride

5< I < 7,5 : climat désertique

7,5 < I < 10 : climat steppique

10 < I < 20 : climat semi-aride

20 I < 30 : climat tempéré.

La station de Tebessa est caractérisée par un climat semi-aride.

3.1.1. Indice d'aridité mensuel

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

$$\mathbf{I} = \frac{\mathbf{12*P}}{\mathbf{T+10}} \quad (\mathbf{3})$$

I : Indice d'aridité mensuel

P : Précipitations moyennes mensuelles en mm

T° : Température moyenne mensuelle en °C.

L'application de la formule (3) a permis de dresser le tableau.

Tab.3. Indices d'aridité mensuels (I) à la station de Tébessa.

Mois	I	Etage bioclimatique
Septembre	19,24	Semi-aride
Octobre	3,84	Steppique
Novembre	16,36	Semi-aride
Décembre	3,89	Steppique
Janvier	70,97	Très tempéré
Février	37,99	Très tempéré
Mars	52,55	Très tempéré
Avril	13,59	Semi-aride
Mai	9,71	Steppique
Juin	4,76	Steppique
Juillet	5,84	Steppique
Aoute	6,52	Steppique

D'après la classification précédente par De**. Martonne**, les mois de septembre, novembre, avril présentent un climat semi-aride, tandis que les mois d'octobre, décembre, Mai, juin, juillet, et Aout ont un climat steppique. En revanche, le mois de janvier, février, mars sont caractérisés par un climat très tempéré.

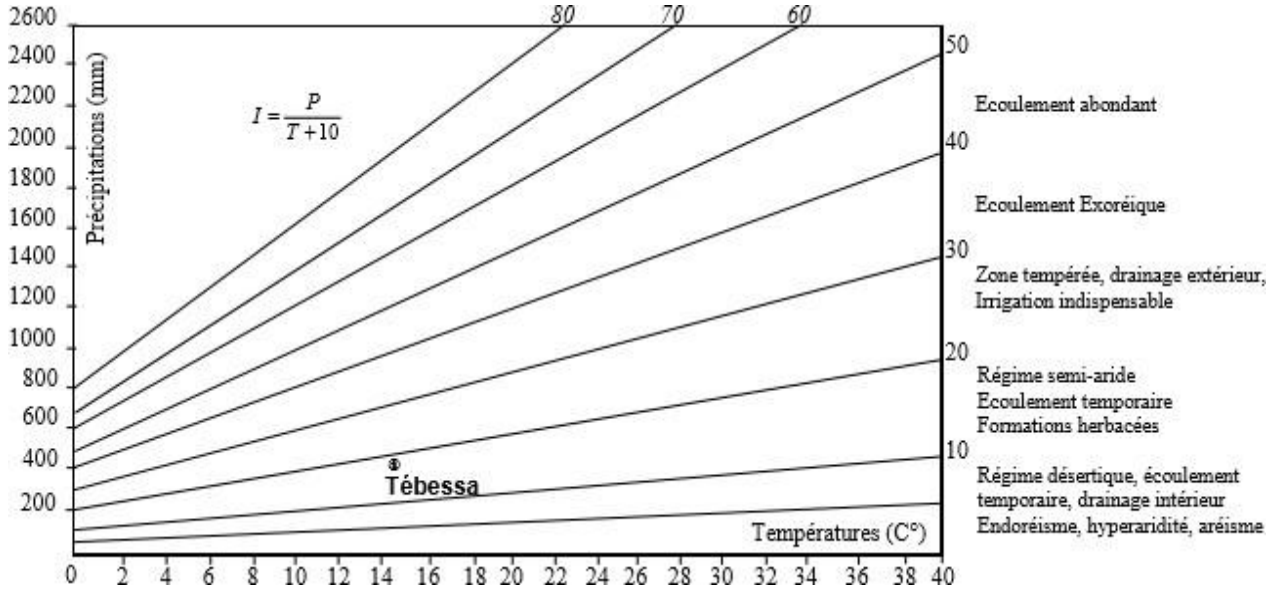


Figure 9. Abaque de l'Indice d'aridité Annuel (**DE. Martone, 1926)**.

4. Etude des facteurs climatiques

4.1. La température

La température est un élément climatique qui fait référence à la mesure de l'échauffement desparticules atmosphériques et terrestres. Elle a un impact sur les modèles météorologiques, les saisons, les climats mondiaux et le phénomène d'évapotranspiration. Les informations concernant la température que nous avons sont des valeurs moyennes mensuelles et annuelles obtenues à la station de Tébessa.

4.1.1. Variation des températures moyennes annuelles

Sur une période de22 ans, les histogrammes montrent une fluctuation annuelle de la température, l'année la plus chaude étant l'année 2021/2022, avec une moyenne de 16,57°C, tandis que l'année la plus froide est l'année 2008/2009, avec une moyenne de 14,4°C.

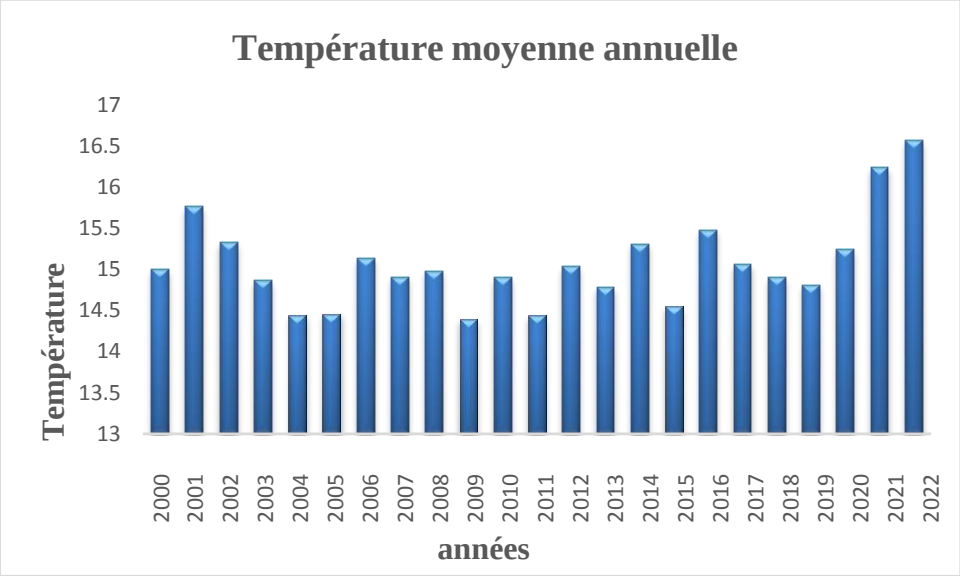


Figure 10. Evolution de la température moyenne annuelle à la station de Tébessa (2002022).

4.1.2. Variation des températures moyennes mensuelles

Après avoir examiné la courbe de variation de la température moyenne mensuelle, sur une période de 22 ans, il est observé que les valeurs les plus élevées, allant de 21,18 à 26,25°C, sont enregistrées pendant l'été (juin- septembre). Les valeurs les plus faibles s'élèvent de 5,20 à 9,30 °C, sont observées durant la période hivernale (décembre – mars), avec une moyenne particulièrement basse en janvier (10.17°C). En été, l'effet de la température sur la qualité chimique est marqué par une concentration des éléments due à l'évaporation.

4.2.La pluviométrie

La pluviométrie est l'étude et la mesure la quantité des précipitations, sur une période et dans une région spécifique. L'analyse pluviométrique est essentielle en hydroclimatologie parce qu'elle présente le système des précipitations et des écoulements, tout en fournissant des renseignements sur l'approvisionnement en eau souterraine.

4.2.1. La précipitation

La précipitation comprend toutes les formes d'eau météorologique qui tombent de l'atmosphère et atteignent le sol. Cela inclut la pluie, neige, grêle ou autres formes de condensation. La précipitation constitue un élément central du cycle de l'eau et sont essentielles pour maintenir l'équilibre hydrologique et comportement hydrogéochimique de la région. La précipitation n'est pas un phénomène permanent, il est donc impossible d'évoquer sa variation quotidienne ou annuelle.

Tab .4. Variation des précipitations au niveau de la station de Tébessa (2002022).

	Setp	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
Moy	45,82	38,55	34,75	42,57	53,42	34,90	**53,75**	**43,34**	**44,36**	**25**	**13,89**	**25,55**
Min	0	0	9,21	0	0	5,27	5,27	0	0	0	0	0
Max	142,38	131,84	116,02	168,75	163,48	94,92	216,21	126,56	116,02	94,92	63,28	94,92
Ecart type	34,84	30,70	33,77	42,86	45,88	27,61	52,33	28,58	28,85	24,57	16,74	25,08
Saisonss	**Automne**			**Hiver**			**Printemps**			**Eté**		
	119,12			**130,89**			**141,45**			**64,44**		

D'après les analyses statistiques et la carte des précipitations moyennes annuelles, la moyenne annuelle de précipitation a atteint 458 mm, établie par agences américaines NASA sur une période de 202ans. La pluviométrie la plus importante est observée en mars. La plupart des mois, on observe une faible précipitation. La pluviométrie la plus importante est pendant la période de printemps avec 141,45 mm, suivie de l'automne avec une moyenne de 119,12 mm

4.2.2. Diagramme ombrothermique

La définition d'un mois sec, selon **(Bagnouls et Gaussen, 1953)** est celui ou la pluviométrie moyenne total en millimètres est égale ou inférieure au double de la température ($P \leq 2T°$). De cette manière, il est observé que la saison sèche est constituée de plusieurs mois secs successifs.

Le diagramme de **Gaussen** (figure 12) émet en lumière une période humide qui commence en novembre et se termine en mois de Mai.et une période sèche qui s'étend du mois de juin jusqu'au mois d'Octobre.

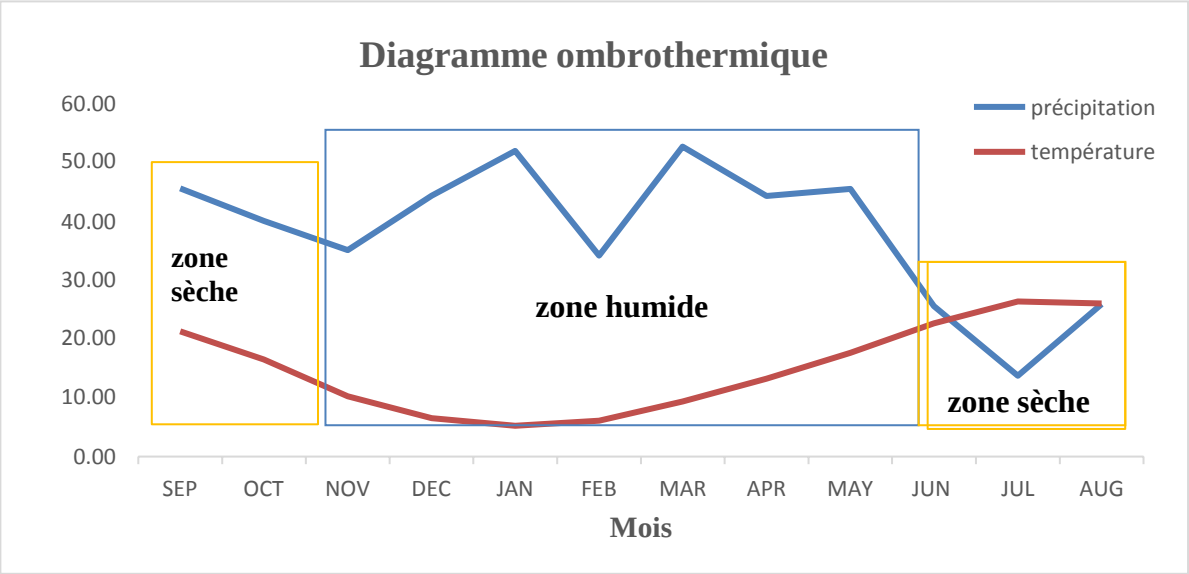


Figure 12. Courbe Ombrothermique de la station de Tébessa (2002022).

4.2.3. Variations interannuelles des précipitations

En examinant la courbe des fluctuations interannuelles des précipitations sur une Périodede 22 ans, il est évident que l'année 2020 est la plus pluvieuse avec 696,09mm et l'année 2000 est la plus sèche avec 284,77mm, (Figure 13).

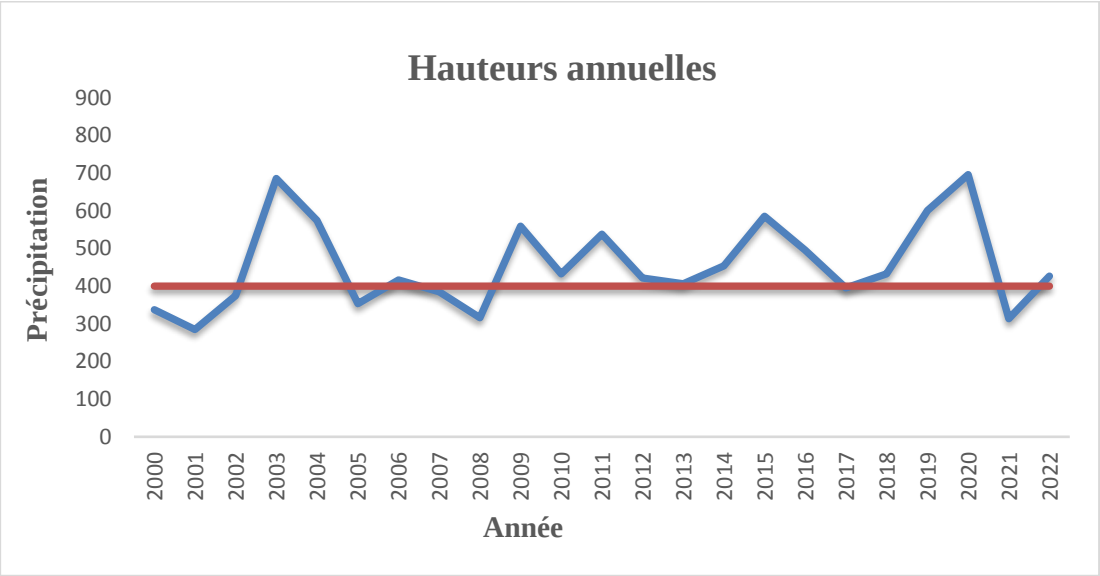


Figure 13. Evolution des précipitations annuelles à la station de Tébessa (2002022).

4.2.4. Variations moyennes mensuelles des précipitations

L'analyse des variations des moyennes mensuelles des précipitations, sur une période de 22ans, révèle que le mois de mars est le plus pluvieux avec une quantité de précipitation de 53,75 mm, tandis que le mois de juillet est le plus sec avec une quantité de 13,89 mm (Figure 14).

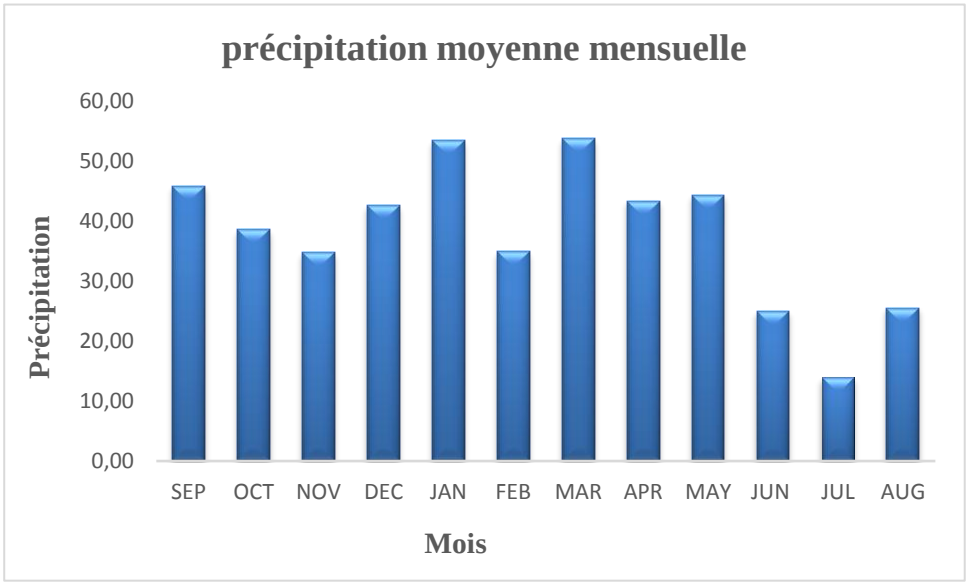


Figure 14. Variation des précipitations moyennes mensuelles à la station de Tébessa (2002022).

4.3. Variation de précipitation

4.3.1. Estimation de l'évapotranspiration

4.3.1.1. Introduction

Le processus de transpiration des plantes et de l'évaporationde l'eau du sol sont des facteurs responsables de l'évapotranspiration. Il est influencé pat divers éléments tels que la luminosité du soleil, la température, l'humidité relative de l'air, l'humidité du sol, le vent et la couverture végétale.

L'évapotranspiration potentielle indique la qualité d'eau pouvant être évaporée par l'atmosphère, incluant à la fois l'évaporation potentielle et transpiration des plantes. Au total, la possibilité d'évapotranspiration est l'une des composantes essentielles du cycle hydrologique. La précision de son estimation est fondamentale pour établir du bilanhydrique, du calcul des besoins en 'irrigation, de la gestion des ressources en eau ainsi que pour la planification des projets d'aménagement. La méthode de G.W. Thornthwaite est utilisée pour l'estimation de l'ETP.

4.3.1.2.Calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP)

Pour déterminer la possibilité d'évapotranspiration potentielle. Les méthodes utilisées reposent sur l'utilisation des variables climatiques. Le choix de la méthode dépend principalement du type de données climatiques disponibles et du type de climat de la région.

- **Formule de THORNTHWAITE :**

En 1948, l'agronome américain G.W. Thornthwaite suggéra une formule pour L'estimer de l'évapotranspiration potentielle en prenant compte uniquement de la température mensuelle. Le développement de cette expression donne la formule suivante :

$\mathbf{ETP} = (\mathbf{10T/I})^{\mathbf{a}} * \mathbf{K}$, Avec :

ETP : Evapotranspiration potentielle en mm

T : Température moyenne mensuelle en °C.

K : Coefficient d'ajustement.

a : indice lié à la température.

a = (1.6/100). I + 0.5 =1,47

I: indice thermique annuel.

I=Σi ; $\mathbf{i= (T/5)^{1.514}}$ **i:** indice thermique mensuel.

4.3.1.3.Évapotranspiration réelle (ETR)

L'évapotranspiration réelle c'est la qualité d'eau qui s'évapore véritablement. Elle quantifie de vapeur d'eau que les sols et les plantes relâchent dans l'atmosphère. Des méthodes peuvent être proposées :

- La méthode de Turc.
- La méthode de Thornthwaite**.**

Formule de TURC

La méthode de Turc la plus couramment utilisée, intègre les précipitations et des températures moyennes annuelles.

$$\mathbf{ETR} = \frac{\mathbf{P}}{\sqrt{\mathbf{0.9}+\frac{\mathbf{P2}}{\mathbf{L2}}}}$$

ETR : évapotranspiration réelles (mm).

P : précipitation moyenne annuelle (mm).

L = $300+25T+0.05T^3$ où

T est la température moyenne annuelle en C°. Facteur qui tient compte des échanges de chaleur).

- **Formule de Thornthwaite**

Pour réaliser du bilan hydrique, on applique la méthode de C.W. Thornthwaite afin de mesurer l'évapotranspiration potentielle et réelle moyenne. Ce bilan repose sur l'hypothèse suivante : Si : P-ETP>0 ; c'est-à-dire précipitation est supérieure à l'évapotranspiration potentielle, alors l'évapotranspiration réelle sera équivalente à l'évapotranspiration potentielle, car l'eau disponible permet d'atteindre ce niveau sans excès.

Si : P-ETP<0 ; Lorsque la précipitation est inférieure à l'évapotranspiration potentielle, on peut distinguer deux cas :

- Si : P + RFU > ETP ⇒ l'évapotranspiration potentielle sera égale à l'évapotranspiration réelle
- Si : P + RFU < ETP ⇒ Autrement dit, l'évapotranspiration correspondra à la somme de la précipitation et réserve facilement utilisable.

4.3.1.4.Estimation des réserves facilement utilisables (R.F.U)

La formule de (J. Richard1979) permet de déterminer la quantité d'eau stockée dans le sol

en utilisant la relation suivante :

RFU=1/3(Da*He*P)

Où : **R.F.U :** Réserve facilement utilisable.

Da : Densité apparente du sol.

He : Profondeur de la couche de la terre par courrier par les racines en (mm).

Application numérique :

Da = 14**, He** = 0.25**, P** = 25 mm

D'où **: RFU** = 1/3 (14 * 0.25* 25) = **29.0 mm**

4.3.1.5.Estimation de ruissellement (R)

Le ruissellement peut être calculé à l'aide de deux formules principales :

✓ Tixeront Berkallof avec la condition de P < 600mm.

$R = P^3 /3$ .....(1)

✓ Tixeront Berkallof modifié par **Romantchouk** (1974) avec la condition P < 600mm.

$R = P^3 /3* (ETP)^2$ …… (2)

Avec :

R : ruissellement en m ; La région d'étude enregistre des précipitations inférieures à 600 mm, la formule utilisée est celle de Tixeront Berkallof modifiée par **Romantchouk** (1974).

La tendance des précipitations de la station de Tébessa est suivante :

P = 0,4579 m**, ETP** = 0, 85508 m**, R = 0,044m (Période 1999/2000-2021/2022**

2.6.4. Estimation de l'infiltration (I)

❖ Selon la méthode de Thornthwaite :

P = R+I I= P - (ETR+R)

❖ Selon la méthode rationnelle :

P = ETR+R+I

Avec :

I : L'infiltration (mm).

- Si I > 0 : Cela signifie que les entrées (P) sont supérieures aux sorties (ETP et R).
- Si I < 0 : Cela signifie que les sorties (ETP ou R) sont supérieures aux entrées (P).

P = 457.98mm, R = 43.79 mm, **ETR** = 366.55 mm **I=** 47,64 mm **(Période1999/2000-2021/2022).**

Lorsque le bilan hydrique est déficitaire, on évalue l'infiltration en utilisant la moyenne des excès de précipitations des années précédentes.

Tab.5. Répartition des précipitations à la station de Tébessa (2002022).

Précipitation P		Evapotranspiration réelle ETR		Ruissellement R		Infiltration I	
mm	%	**mm**	**%**	**mm**	**%**	**mm**	**%**
457,98	100	366,55	83,03	43,79	9,56	47,64	10,40

4.3.1.6.Estimation du bilan hydrique

La compréhension approfondie des éléments du bilan hydrique d'un bassin versant revêt une importance capitale en hydrologie, car elle permet l'estimation des réserves naturelles des aquifères. Le bilan hydrique offre la possibilité d'étudier la distribution des précipitations sur une surface en tenant compte de divers éléments :

T ; P ; ETP ; ETR ; I ; R ; RFU ; T ; P ; ETP ; ETR ; I ; R ; RFU.

En établissant un bilan hydrique, nous pouvons effectuer des calculs :

I : Indice thermique ;

K : Coefficient de latitude ;

RU : Réserve utile ; RU = VR accumulée, mais lorsqu'elle devient égale à **la RFU = 29**, la quantité restante c'est l'excèdent.

Déf : Déficit agricole en (mm). Déf = ETP-ETR ;

Ex : Excèdent en (mm).

Tab .6 . Bilan hydrologique moyen (1999-2000/2021-2022) à la station de Tébessa, par la méthode de Thornthwaite.

	Spet	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avl	Mai	Juin	Juil	Aout	Total
P(mm)	47,90	38,55	34,75	42,57	53,42	34,90	53,75	43,34	44,36	25,00	13,89	25,55	457,98
T(C°)	21,18	16,44	10,20	6,48	5,20	6,08	9,30	13,15	17,57	22,52	26,25	25,89	
K	1,03	0,97	0,86	0,81	0,87	0,85	1,03	1,1	1,21	1,22	1,24	1,16	
I	8,91	6,07	2,94	1,49	1,06	1,35	2,56	4,32	6,69	9,75	3,41	12,06	60,61
ETP(mm)	99,2	68,32	34,08	17,6	12,8	16	29,76	49,6	75,68	97,28	135,84	133,12	769.28
ETP corrigé	102,18	66,27	29,31	14,26	11,14	13,6	30,65	54,56	91,57	118,68	168,44	154,42	855,08
P-ETP	-54.28	-28.22	5.44	28.31	42.28	21.3	23.1	-11.22	-47.21	-93.68	-154.55	-128,87	-397,10
ETR(mm)	47,9	38,55	29,31	14,26	11,14	13,6	30,65	54,56	62,14	25	13,89	25,55	366,55
REU(mm)	0	0	5,44	29	29	29	29	17,78	0	0	0	0	139,22
EX(mm)	0	0	0	4,75	42,28	21,3	23,1	0	0	0	0	0	91,43
Déf(mm)	54,28	28,22	0	0	0	0	0	0	29,14	93,68	154,55	128,87	488,74

Les résultats de bilan hydrique ne sont pas logiques puisque les données presque sont incorrectes

∑P = ∑ETR +∑EX

∑P = 366.55+91.43

∑ETP = ∑ETR + ∑Déf

∑ETP= 366.55+488.74

ETP= Interprétation du bilan hydrique :

- Le rapport $\frac{ETR}{P}$ = 0.80mm

Alors 80% des précipitations seront évaporées

- Le rapport $\frac{Def}{P}$ = 1.06mm

Alors le déficit agricole égal 100% des précipitations.

- Le rapport $\frac{ETR}{ETP} = 0{,}42$mm

Donc, les réserve d'eau sont insuffisante pour répondre à 40% de la demande en eau Evapotranspiration potentielle. La période supplémentaire de 4 mois sur 12 mois. La plupart des mois sont déficitaires.

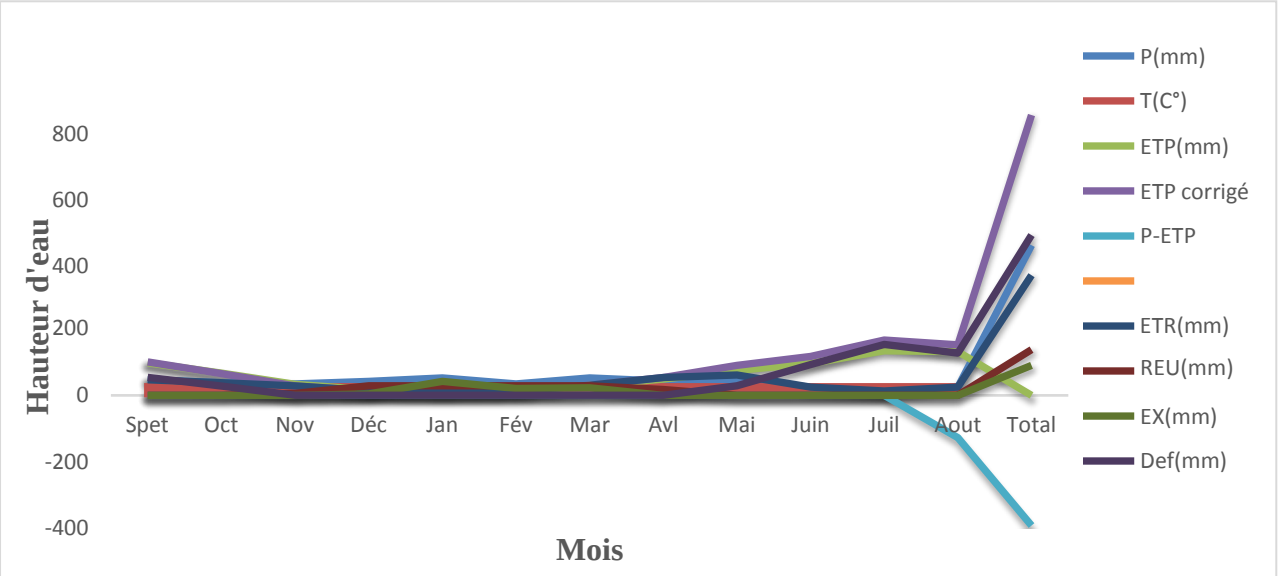


Figure 15 . Bilan hydrologique à la station de Tébessa, par la méthode de Thornthwaite pourla période (1999/2000 -2021/2022).

En observant attentivement le graphe du bilan hydrique, nous nous pouvons conclure que l'ETP est significative du mois de juillet jusqu'au mois de septembre. Cela rend donc indispensable l'irrigation. Dès le mois de novembre, une réorganisation du stock est observée, accompagnée d'uneaugmentation de la RFU. Ce qui atteint son maximum entre juin et aout. Après cette période, on observe une diminution de la RFU, signalant un épuisement du stock (figure 15).

NB : On remarque que le ruissellement est légèrement inférieur que l'infiltration ce qui n'est pas logique et cela est due à l'utilisation des formules empirique ainsi qu'à l'utilisation du bilan de Thornthwaite qu'est pessimiste en région aride et semi-aride.

5. Conclusion

La zone de Tébessa bénéficie effectivement d'un climat semi-aride. Ce type de climat est caractérisé par un hiver froid et pluvieux, et un été chaud et sec, influencé par des facteurs géographiques (éloignement de la mer, altitude et orientation des reliefs).

Les variations de la pluviométrie et des températures ont eu un impact sur la quantité et les caractéristiques des eaux par l'augmentation de la dissolution des formations géologique pendant les périodes de pluie et l'augmentation de la salinité en période sèche. La température moyenne annuelle est de 26.25°C et les précipitations moyennes annuelles sur une période de 22 ans (1999/2000– 2021/2022), sont estimées à 457,98mm. On estime que l'évapotranspiration réelle est de 398 mm, ce qui représente 80% des précipitations. Seulement 9,56 % des précipitations sont causées par le ruissellement, ce qui équivaut à 43,79. Cela suggère que de la nappe n'est pas alimentée uniquement par l'infiltration efficace, mais également par calcaires fissurés qui bordent la nappe. Seuls 47,64 mm peuvent être percolés grâce à l'infiltration, ce qui représente seulement 10,40% des précipitations. Les écoulements de l'Oued El kébir est influencé par le régime des précipitations.

Chapitre IV

Géophysique et Hydrogéologie



1. Introduction

L'exploration des formations géologiques des couches internes de la terre est un aspect essentiel de la géophysique, qui contribue à l'exploitation des ressources précieuses.

Les analyses géophysiques visent à identifier les lentilles à lithologie grossière, permettent de caractériser les différences dans la composition et la structure des matériaux géologique et leur profondeur. Cela facilite également la localisation des zones à forte salinité et minéralisation.

Ainsi elles permettent d'identifier les principaux accidents géologiques, tel que des bordures qui accompagnant le fossé d'effondrement, contribuant ainsi à une gestion efficace des ressources hydriques.

2. Prospection électrique

Trois études géophysiques ont été menées dans la région de Tébessa-Morsott, impliquant un total de 681 sondages électrique. **(CGG 1970 et 1975**). La Campagne CGG 1970 comporte :

-242 SE en ligne AB = 1000 m.

-105 SE en ligne AB = 3000 m.

La Campagne CGG 1975 est une réinterprétation des résultats de CGG 1970. L'étude STROJEXPORT 1978 comporte :

- 80 SE en ligne AB = 6000 m.

-242 SE en ligne AB = 2000 m.

-12 SE en ligne AB = 1000 m.

3. Echelle Des Résistivités

La réalisation de six sondages paramétriques à partir des forages 501. 502. 503. 508. FG1. SER1 a permis de déterminer l'échelle des résistivités suivants:

Tab.7. Echelle des résistivités des différentes formations géologiques.

Etage géologique	Formations géologiques	Résistivité (ohm.m)
Quaternaire	✓ Limons salés du centre de la plaine ✓ Limons et argiles ✓ Alluvions argilo-sableuses ✓ Alluvions sableuses ✓ Eboulis secs ✓ Eboulis humides	✓ 1-3 ✓ 5-10 ✓ 15-20 ✓ 25-50 ✓ 300-400 ✓ 7-100
Plio-quaternaire	✓ Marnes à gypse du Villafranchien ✓ Alluvions caillouteuses du Pliocène ✓ Alluvions argileuses du Pliocène	✓ 0,5-2 ✓ 30-50 ✓ 3-5
Eocène	✓ Calcaire blanc à silex Eocène moyen	✓ 100-200
Crétacé	✓ Marnes noires du Dano-Montiennes ✓ Calcaires Maestrichtien ✓ Marnes et calcaire marneux ✓ Calcaire Turonien ✓ Marnes et marno-calcaire Cénomanien ✓ Calcaire-dolomie Aptien ✓ Trais	✓ 2-8 ✓ 100-1000 ✓ 5-10 ✓ 50-1000 ✓ 5-25 ✓ 150-200 ✓ Variable suivant le faciès

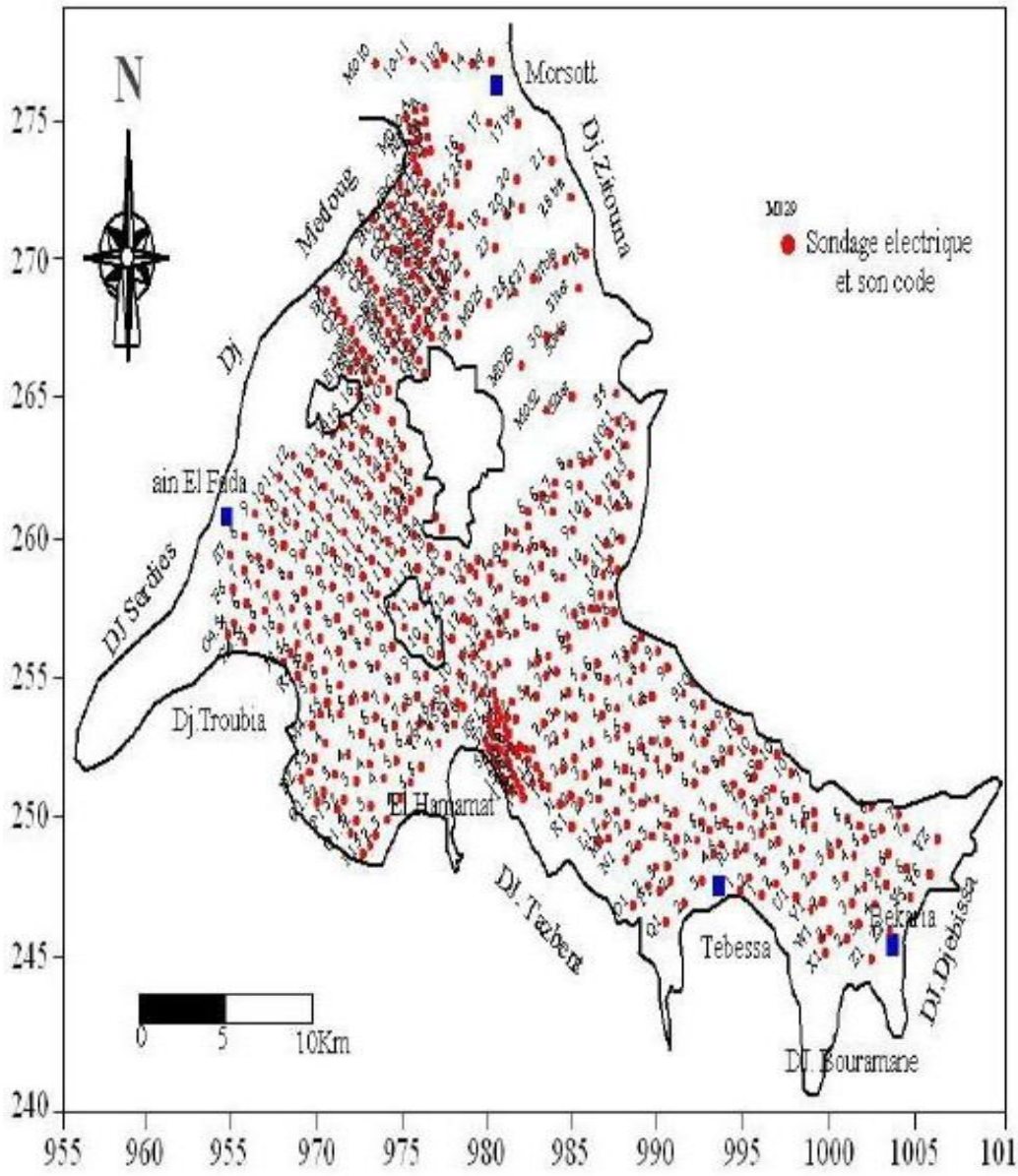


Figure 16. Carte de position des sondages électriques verticaux (SEV) **(CGG 1975)**.

3.1. Interprétation des résultats

3.1.1. Coupes géo électriques

Grace aux profils électriques, il a été possible de distinguer les zones suivantes :

a. **Zone de Bekkaria** : La figure 10 montre que cette zone est traversée par X.V.U , il est souligné que les niveaux suivants sont présents de bas en haut :

- Il y a un niveau bas où la résistivité varie de 2 - 10 Ω. m. ce qui correspond à une résistivité attribuable aux marnes Dano-Montiennes.

- Un niveau plus épais en bordure Sud

-A l'ouest, on observe une résistivité entre de 20 et 50 Ω.m, ce qui correspond aux cailloutis calcaires.

-il y a niveau de résistivité situé entre de 8 et 10 Ω .m, correspondant aux argiles détritiques.

- Un niveau de résistivité d'environ 10 à 30 Ω. M, correspond à une formation argilo-sableuse.

b. Zone de Tébessa :

Dans cette zone les profils Q.O.L montrent de bas en haut ce qui est représenté dans la figure 11 :

- Il y a une formation présentant une résistivité de 1 à 3 Ω.m, correspondant potentiellement aux formations salées selon l'échelle de résistivité mais qui augmente jusqu'au 10 Ω.m. Cela indique la présence de marno-calcaires associés d u gypse.

- On observe une résistivité de 10 à 20 Ω.m, associée à un faciès argilo-sableux au centre, et 50 Ω.m en bordure, indiquant la présence de cailloutis calcaires.

La résistivité de profil (O) varie considérablement en raison de la diversité du terrain. Au bord de ce profil, on remarque des niveaux élevés de résistivité, généralement entre 100 et 300 Ω .m suggérant la présence de matériaux plus résistants ou moins conducteurs dans cette zone. En surface, une résistivité de 2 à 10. Ω m correspond aux calcaires, tandis qu'en bordure, elle diminue ce qui pourrait être expliqué par la présence d'argiles détritique.

c. Zone d'Ain Chabro

Dans cette zone traversée par les profils J.G.F. plusieurs niveaux sont observés en (fig.12), notamment :

- Dans cette zone, on observe à la base une résistivité de 2 - 10 Ω .m, ce qui correspond aux marnes dano-montiennes.

-Sur le bord Sud- Ouest, une couche épaisse montre une résistivité de 30 à 70 Ω .m, identifiée comme des cailloutis calcaires. Cette couche disparait au centre de la plaine, ou elle est remplacée par des formations argilo-sableuses, comme indiqué sur le profil F.

-Un niveau de résistivité variant de 15 à 30 Ω .m, correspondant aux formations argilo–sableuses.

d. Zone de Morsott

Le profil géo électrique (MO) montre une série des niveaux, listés de bas en haut dans la figure 13 :

- Une formation initiale avec une résistivité de 1 à 3 Ω.m. qui pourrait indiquer la présence de formations salées selon l'échelle de résistivité, monte jusqu'au 10 Ω.m, il est probable que d e s marno-calcaires avec gypse.

- Le niveau de résistivité au centre varie entre de 10 et 20 Ω.m correspond à un faciès argilo-sableux, tandis qu'en bordure, cette résistivité monte à 50 Ω .m, indiquant la présence de cailloutis calcaires.

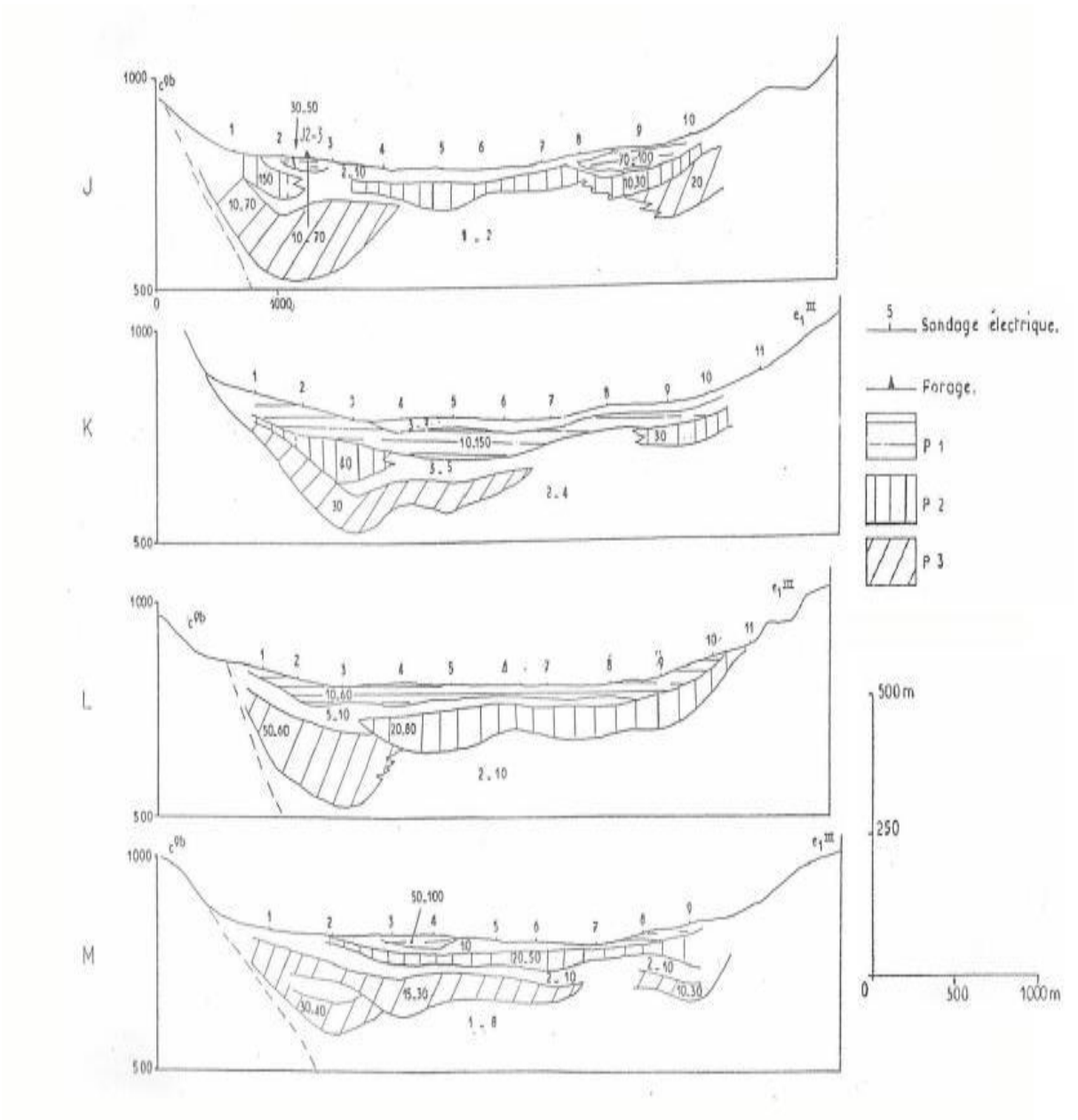


Figure 17. Coupes géo électriques à travers la plaine de Tébessa selon les profils (J, K, L et M) **(CGG 1975)**.

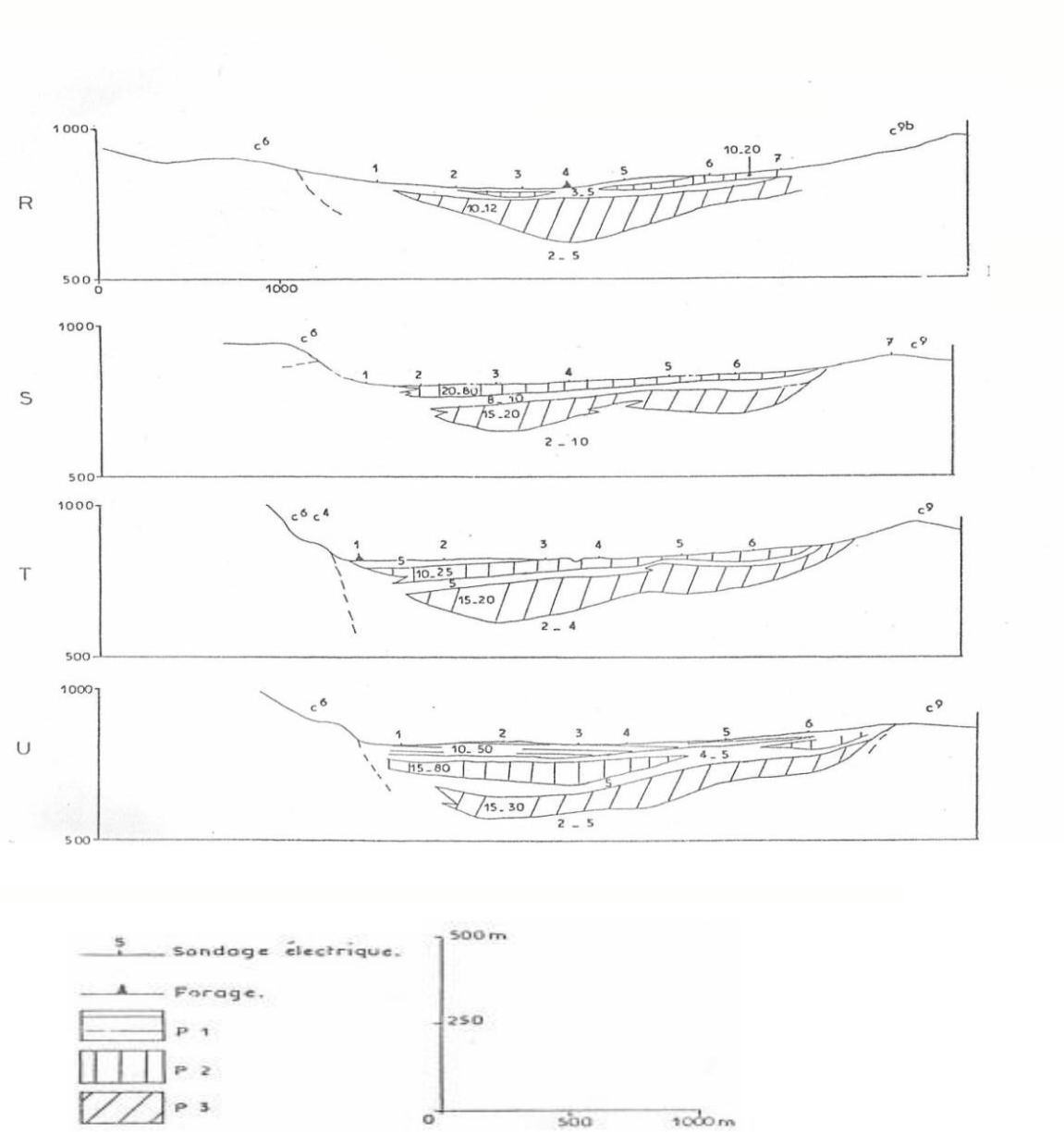


Figure 18. Coupes géo-électriques à travers la plaine de Tébessa selon les profils (R, S, T et U) **(CGG 1975)**.

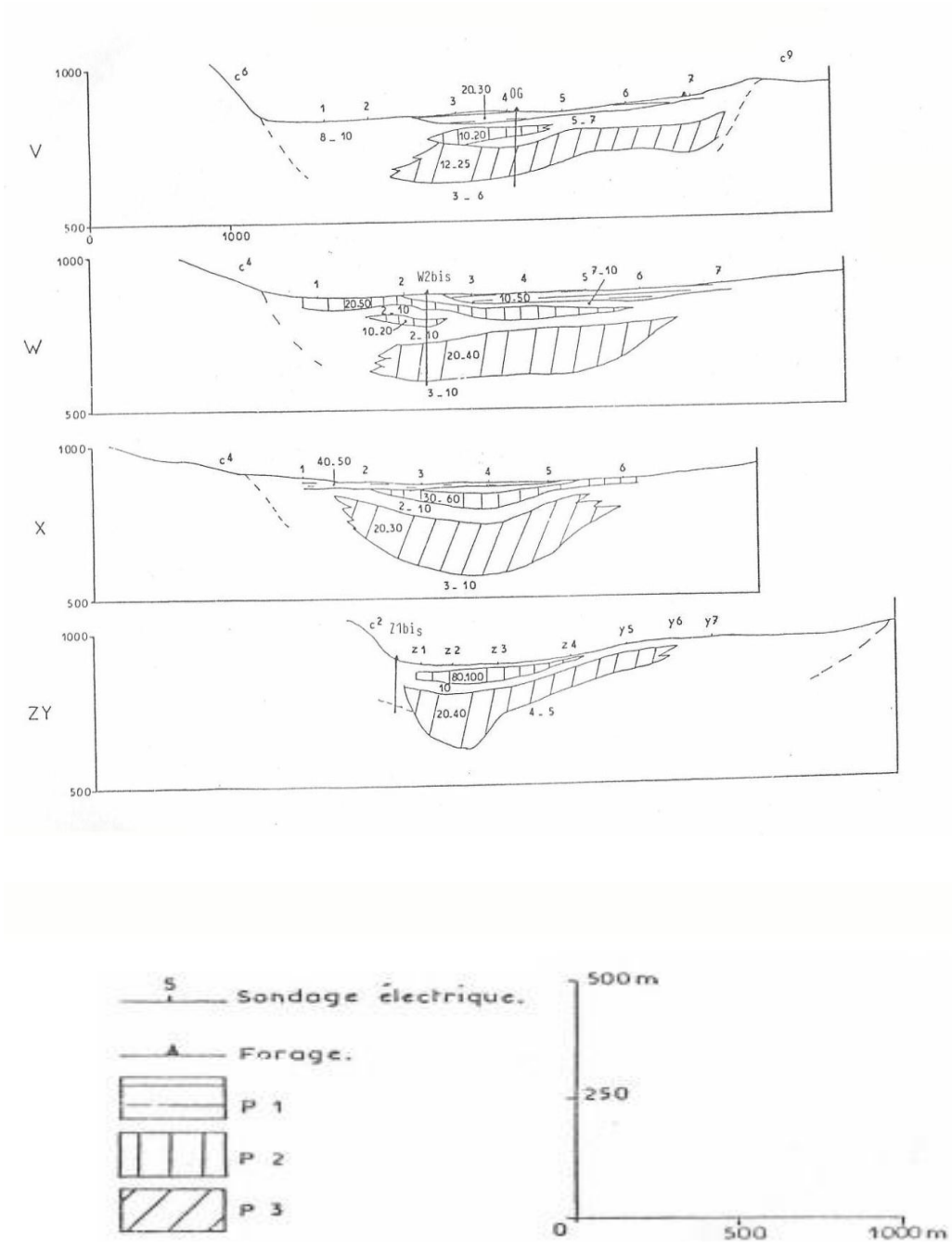


Figure19. Coupes géo-électriques selon les profils (V, W et X). **(CGG 1975).**

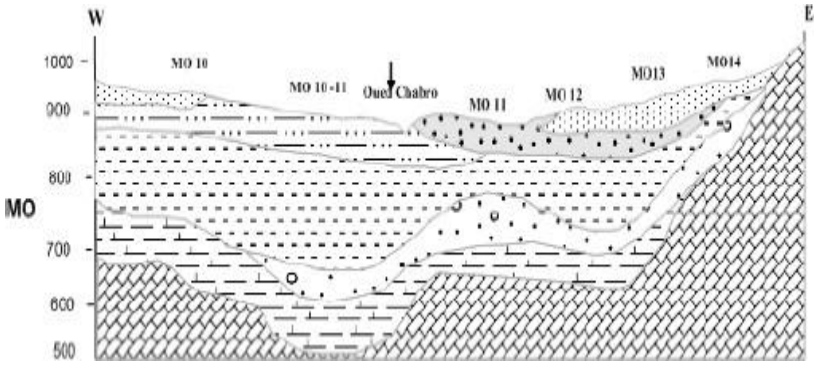


Figure 20. Coupe géo électrique (MO) de la zone Morsott **(CGG1975)**.

3.1.2. Carte des résistances transversales

Les mesures de la résistance transversale reflètent le dépôt quaternaire (alluvions anciennes, des dépôts d'épandage ancien). Cette carte met en évidence deux zones distinctes :

- Au sud, une zone à forte résistance transversale à fort gradient.

- Au centre, une vaste zone où la résistance transversale est faible (fig. 21).

a. Zone de forte résistance transversale

Elle est située à Ain Chabro, avec des résistances transversales allant 30 000 Ω .m^2 .Cependant, elle se réduisent en se dirigeant des bords vers le centre de la plaine, en raison l'augmentation de la quantité d'argile et de la forte teneur en sel.

b. Zone de faible résistance transversale

Au centre de la plaine, on observe une résistance transversale de 500 Ω .m^2, ce qui prouve la prédominance de la matrice argileuse dans le matériel du remplissage.

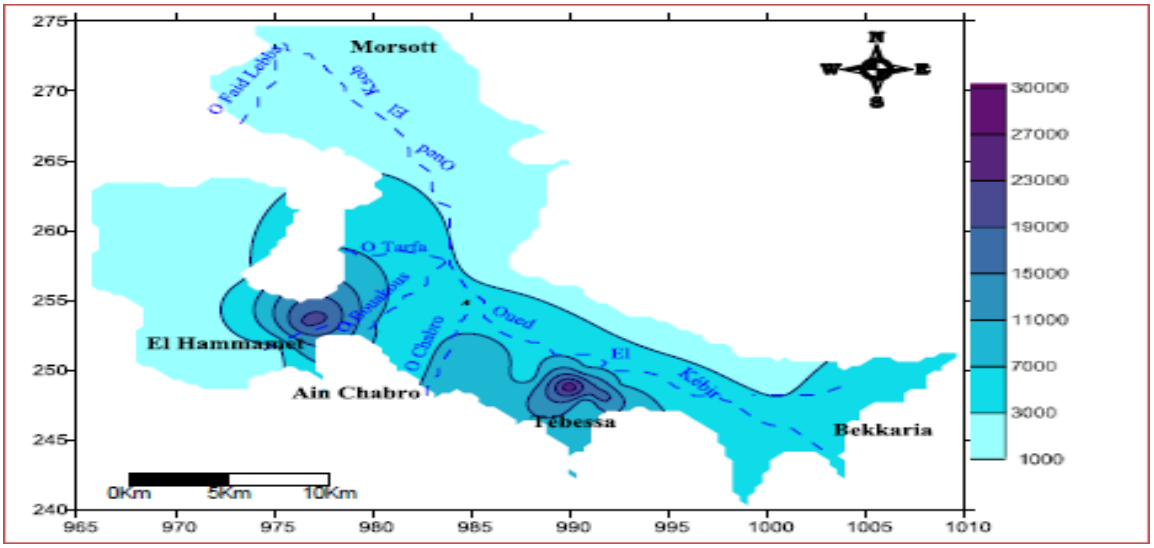


Figure21. Carte de résistances transversales brute de la plaine de Tébessa-Morsott **(CGG1975)**.

4. Carte du substratum

Une fois que la carte du substratum a été établie, elle est recouverte d'une couche conductrice de résistivité allant de 2,5 à 10 Ohm*m. Au milieu de la plaine, il y a une couche résistante aux bordures qui présente une résistivité variant de 150 à 250 Ohm m ; on remarque que :

- Le toit de substratum s'élève de 350 à 960 m d'altitude ; ce qui reflète la structure étroite du bassin Tébessa-Morsott ;
- La profondeur du substratum est inférieure au Nord de Hammamet à une profondeur maximale de 100m.Cependant, une profondeur de 350 m au Sud témoigne d'un réservoir fiable pour les eaux souterraines. En revanche, il se trouve à la surface du sol au Nord-Est de la plaine.
- Le substratum se situé entre 50 et 250 m de profondeur dans la zone de Ain Chabro, en direction de l'axe de la plaine ;
- Le substratum atteint une profondeur de 150 à 250 m à l'exutoire de la plaine, notamment au centre de la plaine.

L'ondulation du substratum a donné lieu à l'idée de plusieurs fossés au sein même du grand fossé de Tébessa-Morsott : fossé de Hammamet, Tébessa/Ain Chabro, Bekaria et celui de Morsott (fig.22).

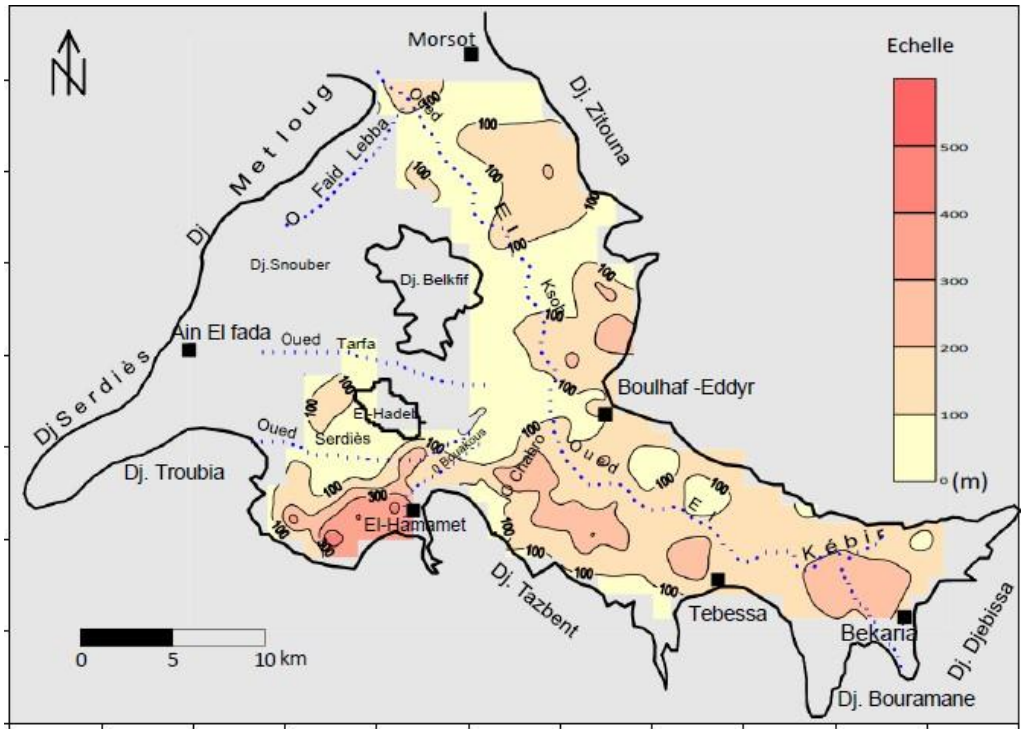


Figure 22. Carte de substratum **(BRAHMI, 2021)**.

5. Conclusion

En analysant la géophysique du bassin versant Tébessa-Morsott, dont nous avons présenté un aperçu précédemment, nous avons pu déterminer le système aquifère de cette région.

Grace à l'étude géophysique, on a pu repérer une structure synclinale comblée par un niveau de résistivité allant de 10 à 100 Ω .m, formé par les alluvions sableuses et argilo sableuses du Plio-Quaternaire. La base de ces formations est un niveau conducteur dont la résistivité varie de 2 à 8 Ω .m, ce qui correspond aux marnes dano- montiennes. Dans la partie Sud de la plaine Ain Chabro, l'épaisseur du remplissage alluvionnaire atteint les 300 m. Cependant, à une distance inférieure à 50 m dans la partie Nord de la plaine.

La résistance transversale (RT), révèle une zone avec des valeurs élevés atteignant 30000 Ω .m² qui se trouve aux bordures sud de la plaine. Il est possible que cette région soin propice à l'installation des forages d'exploitation des eaux souterraines.

6. Hydrogéologie

6.1. Introduction

L'hydrogéologie est la discipline scientifique qui explore la répartition et de la circulation de l'eau souterraines de la nappe profonde, en tenant compte de l'influence des formations géologiques sur l'eau. L'analyse hydrogéologique concentre sur la mesure des niveaux piézométriques, ainsi que sur la création des coupes hydrogéologiques et des cartes piézométriques. L'objectif de cette étude a analysé la manière dont les eaux souterraines sont utilisées. En connaissant les propriétés d'aquifère et compréhension du processus de circulation des eaux souterraines ainsi que de leur direction d'écoulement. Les ressources en eau souterraine de la zone étude sont limitées pour diverses utilisations

- Les puits dans la plaine, à l'usage limité, servent principalement à l'agriculture et sont rarement pour l'A.E. P
- Les 28 forages qui utilisent la nappe profonde.
- L'extraction des sources provenant des calcaires d'âge Turonien, Maestrichtienet Eocène de bordures (Ain Chabro, Kissa, Youkous…etc.).

6.2. Géométrie de l'aquifère

La recherche géophysique aidera à établir une relation entre les données géologiques et géophysiques. Deux prospections géophysiques majeures ont été menées dans la plaine Tébessa-Morsott ; la première en a été accomplie en 1970 par la Compagnie Générale de Géophysique (CGG) et la seconde par Stroy Export Bragué (SEB) en 1978. Il est important de noter que la direction d'hydraulique de la wilaya d'Annaba (D.H. W) entre 1973 et 1977 a réalisé la diagraphie de quelques forages. Au total ces études incluent 681 sondages électriques. Après cette étude, des forages ont été effectués afin de :

- Optimiser l'utilisation des formations de remplissage alluvionnaire.
- Distinguer les lentilles présentant une lithologie grossière et détecter les zones à forte salure.
- Acquérir une compréhension de la profondeur et la nature du sol ;
- Informer sur les graves accidents des bordures qui accompagnent le fossé d'effondrement.

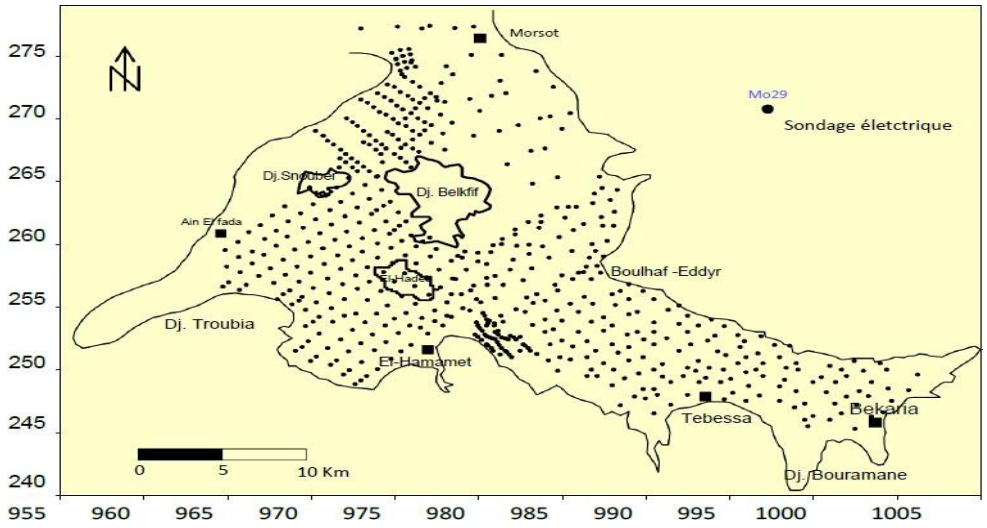


Figure 23. Carte de situation des sondages électriques **(C.G.G, 1978)**.

6.3. Indentification des différents niveaux aquifères

L'analyse conjointe des données géophysiques et des logs stratigraphiques des forages, a ont permis d'obtenir des informations plus précises sur les différents réservoirs de la plaine de Tébessa- Morsott. Ils sont proches ou superposés d'une étendue. Le système aquifère des formations du Mio- plio-quaternaire est le seul sujet d'étude car il est le plus utilisé dans la plaine. De même que leurs conditions d'exploitation sont très variées. On peut distinguer Deux ensembles :

6.3.1. Le milieu fissuré

Les chances de trouver un record du substratum spécifique dans le fossé de Tébessa-Morsott sont très limitées en raison de sa profondeur importante de 2 Km selon (**Zerdazi, 1990)**. Les calcaires Turoniens, Maestrichtiens et Campaniens forment les limites Nord Est et Sud de la plaine, sont également d'importants aquifères. A partir de l'essai de pompage, le résultat de l'aquifère du Maestrichtien révèle que la recharge est rapide car le débit d'exploitation est optimal. En revanche, la recharge de l'aquifère du Turonien est limitée.

6.3.1.1. L'aquifère des calcaires de Maestrichtien

L'étude des forages effectués dans les calcaires Maestrichtiens a révélé que ces formations fissurées sont aquifères profonds (T9, P1, P3, O2-3, O3, Q3-4 BIS).

6.3.1.2. L'aquifère des calcaires du Turonien

Les forages ayant pénétré les calcaires Turonien, ont montré que ces formations fissurées sont aquifères en profondeur (TUbis et T8).

Tab.8. Résultats des essais de pompage de la station d'étude (hydraulique de Tébessa) **(Debz, 2019)**.

Forages	TUBIS	Q3-4 BIS	T8	T9	P1	Q3	Q2-3	P3
Formations	Calcaire	Calcaire	Calcaire	Calcaire	Miocène	Miocène	Maestrichtien	**Miocène**
X en mètre	992.5	991.73	992.41	988.80	988.83	988.52	988.42	**988.95**
Y en mètre	246.25	248.04	245.70	246.61	247.26	247.67	247.12	**247.74**
Z en mètre	940	857.5	984	901.4	874	860	867	**863**
Profondeur en mètre	/	/	/	200	550	550	550	**550**
Niveau dynamique (m)	92.96	40.38	104.71	12.95	/	/	/	**/**
Niveau statique (m)	82.70	29	98.35	120	107	114	124	**112**
Débit variable (m^3/s)	/	/	/	10	40	40	20	**40**
Débit D'exploitation (M^3/s)	**30**	**30**	**15.64**	**5**	**30**	**30**	**20**	**30**

6.3.2. Le milieu poreux

La plaine de Tébessa-Morsott a fait l'objet d'études de nombreux géologues chercheurs notamment (**Djabri 1987, Rouabhia 2004 et Ghrieb 2007 et 2011)**. Ces études surle bassin de Tébessa ont révélé que le système aquifère de la plaine est principalement soutenu par dépôts alluviaux du quaternaire, il est constitué d'un mélange d'argile et de sables ou de cailloutis calcaires d'une épaisseur allant 10 et 400 m,

Les reliefs en bordures Nord-Est et Sud de la zone étude sont constitués de calcaires Turoniens, Maestrichtiens et Campaniens qui représentent des ainsi aquifères importants.

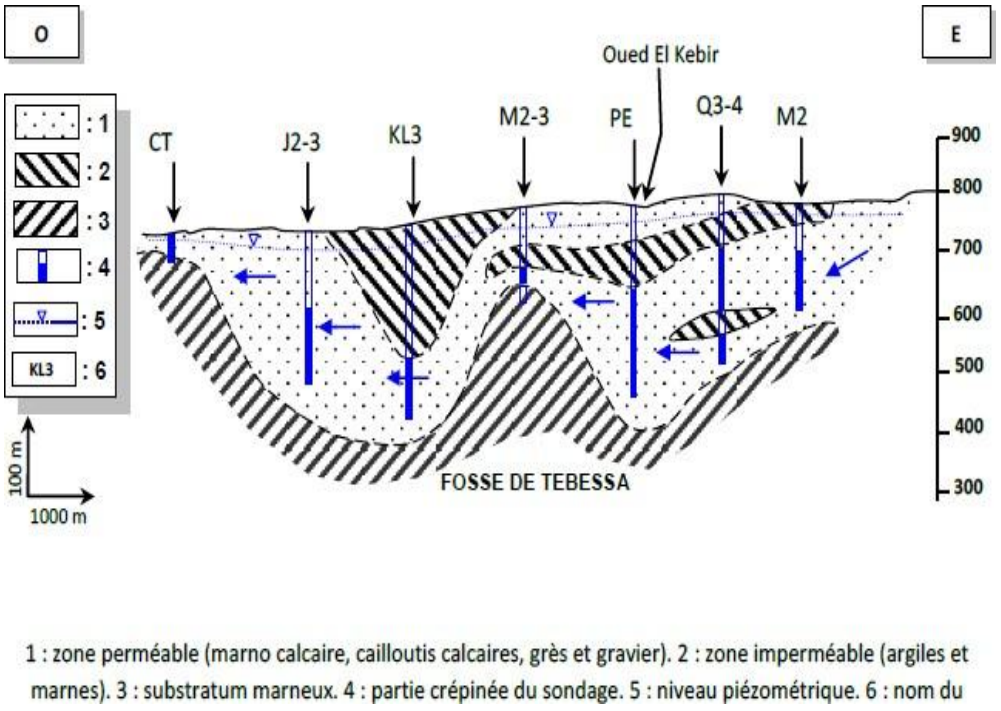


Figure24. Coupe hydrogéologique à travers la plaine de la Merdja. **(In : Rouabhia et al. 2009)**.

6.4. La piézométrie

En l'absence de sélection du suivi des débits à l'exutoire, ce qui n'était pas réalisable, nous avonsopté pour le suivi du niveau stable des forages de la plaine. Ainsi que le débit au niveau de l'exutoire, le niveau statique de l'aquifère peut être un bon indicateur del'évolution du plan d'eau de la nappe et ses réponses aux différentes sollicitations (anthropiques et climatiques).

Le niveau piézométrique varie dans le temps en fonction du bilan hydrologique (infiltration, évaporation, ruissellement). L'identification de la variation du niveau piézométrique est la première tâche de toute étude hydrogéologique, pour cette tache il faut connaitre les caractéristique statique et dynamique des forages (et/ou puits) de la zone étudiée ; sans forages, l'étude reste dans le domaine de l'hypothèse et de la spéculation.

6.4.1. Inventaire des points d'eau

En 2020, une étude piézométrique a été effectuée en fonction de la distribution des différents points d'eau de la nappe profonde (figure 25), ce qui a permis de créer une carte piézométrique.

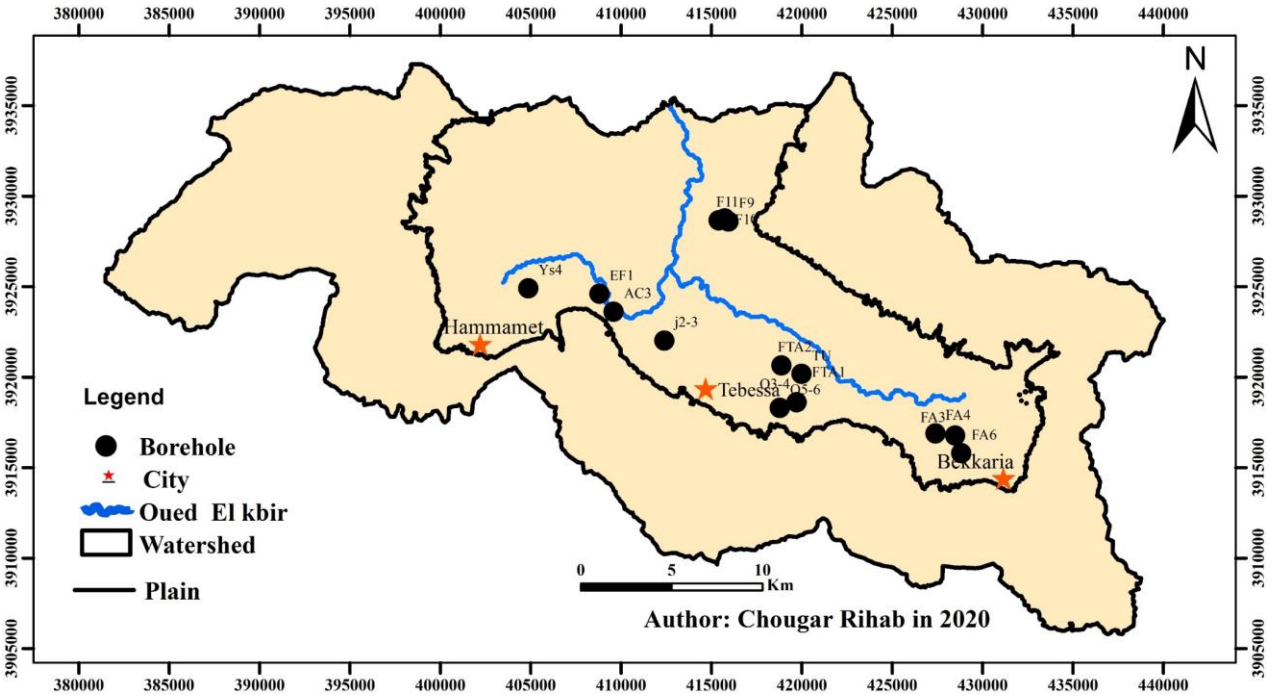


Figure 25. Carte d'inventaire des points d'eau en 2020.

6.4.2. Interprétation de la carte piézométrique (2020)

L'analyse de la courbe piézométrique est établie en 2020 révèle un l'écoulement est orienté de l'Est vers l'Ouest, en accord avec la topographie. Effectivement, Bekkaria est à une altitude de 900 m, tandis que Tébessa est à 800m et Ain Chabro se trouve à une altitude inférieure à 800 m (Fig.26). Grace à la morphologie piézométrique, il a été possible de repérer trois secteurs distincts :

- **Secteur de Bekkaria**

Les courbes piézométriques se déplacent de manière quasiment régulière. La direction de l'écoulement des eaux souterraines est orientée ESE – WNW. Cette zone est alimentée par les affleurements carbonatés e dj Bouromane et Dyr.

- **Secteur de Tébessa**

La morphologie piézométrique de secteur de Tébessa est irrégulière et convergente, en raison de l'hétérogénéité du remplissage alluvial de la nappe. La faible variation du gradient hydraulique oscille entre 0.5% et 1%. Toutefois, on constate quelques dépréciations dans la partie centrales et du Nord-Ouest de la plaine, a causées par le pompage très important des eaux souterraines.

- **Secteur Ain Chabro**

Les courbes piézométriques sont plus au moins étroites et deviennent plus éloignées dans le sens d'écoulement. En convertissant une zone de stockage et de drainage par Oued Chabro avec une diminution de 40 m de charge.

- **Secteur d'El Hammamet**

Avec des courbes piézométriques qui illustrent un pompage étendu dela nappe dans zone de l'Hammamet et une partie de ces eaux est drainée par L'oued Serdiès. L'alimentation de l'ouest El Hammamet est directement issue des affleurements de Dj Doukkane. L'orientation du cours d'eau souterraine est déterminée SSE-NNW.

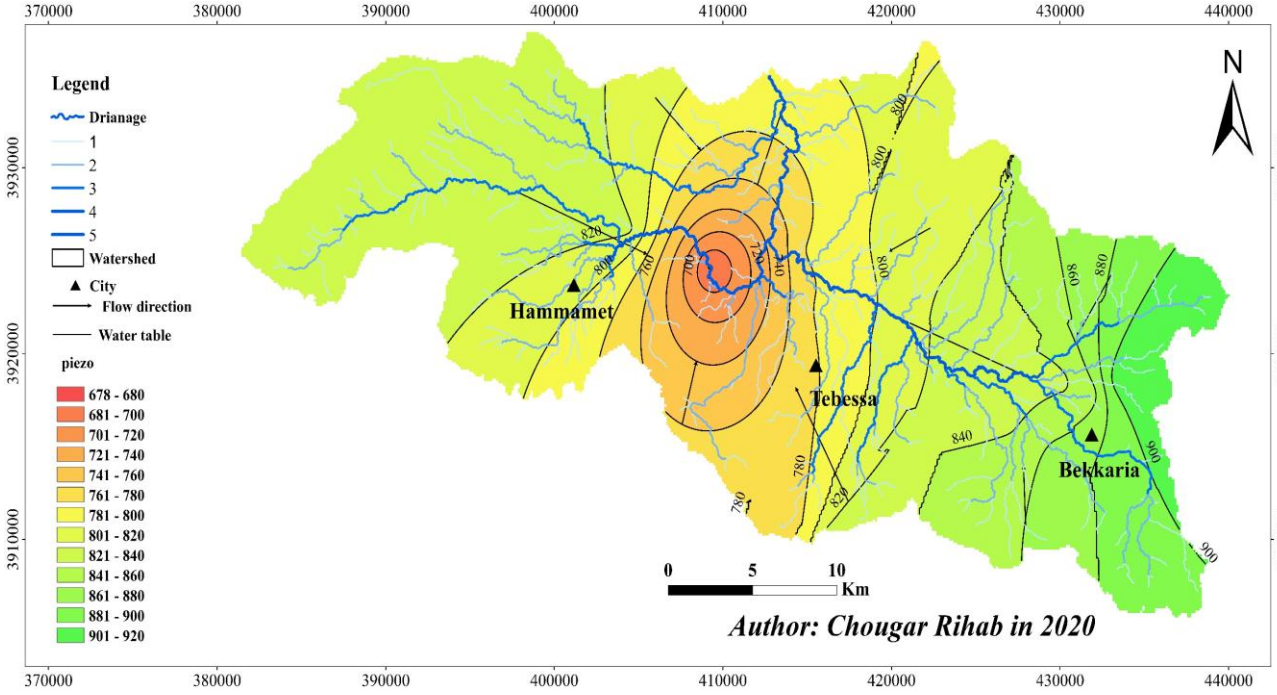


Figure 26. Carte piézométrique 2020 de la plaine de Tébessa.

6.4.3. Conditions aux limites d'aquifère de la plaine Tébessa-Morsott

La nappe est peu alimentée directement par les eaux de précipitation qui s'infiltrent directement à travers les cônes de déjections bordés. Au centre, il y a presque aucune infiltration en raison dépôts fins et argileux. Ainsi, l'alimentation indirecte revêt une importance et mérite d'être la plus prise en compte.

- **La bordure sud (méridionale)**

Le versant Nord de Dj Doukkane est couvert par Turonien moyen et le Maestrichtien moyen de Dj Stah, de même que les sources de Chabro et El Hammamet, détiennent une vaste zone d'alimentation l'aquifère de Tébessa.

- **La bordure Nord**

La limite hydrogéologique est constituée par les calcaires du Maestrichtien inférieur. Les failles permettent le contact entre les calcaires et le remplissage alluvionnaire. Créant nombreuses sources de perturbations (Kissa et Couchada) avec un débit limité. Au-delà de ce seuil, les formations carbonatées des bordures peu étendues en surface ont s'élèvent vers la plaine et forment une ligne d'alimentation. Cependant, la limite de Boulhef EL Dyr à Dj Zitouna est imperméable.

- **La bordure Est**

L'alimentation de la nappe est fournie par les formations carbonatées et argileuses rouges du trias de bordures de Dj Djebissa qui établit la frontière étanche. Au niveau Bekkaria, trois sources de débit variable émergent des grés et se déversent dans la plaine.

- **La bordure Ouest**

L'anomalie du contact avec les calcaires du Turonien du Djebel Belkfif présente une limite imperméable ; avec pendage dirigé vers le remplissage quaternaire (A.N.R.H).

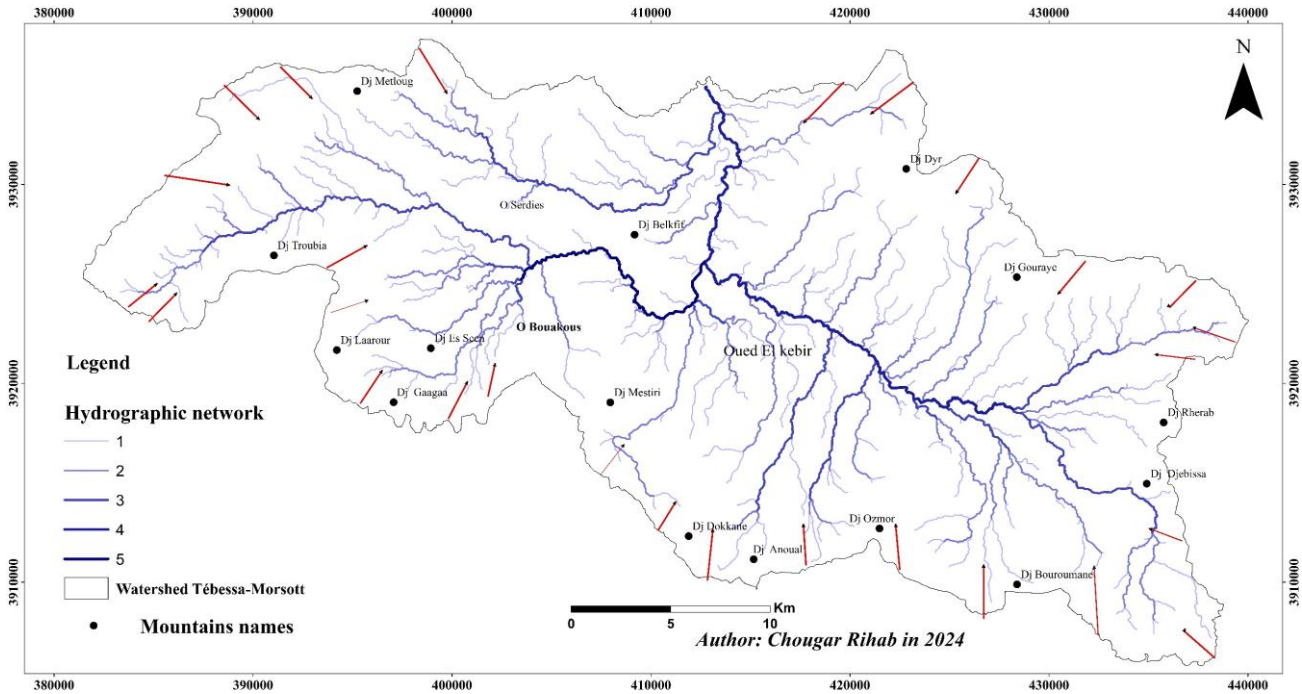


Figure 27. Carte des conditions aux limites.

6.5. Conclusion

L'étude hydrogéologique montre que la direction d'écoulement des eaux souterraines dirigé d'Est vers l'Ouest et le drainage s'effectue par Oued Elkebir.

La zone d'étude est composée principalement par un remplissage mio-plio- quaternaire, former une importante nappe, en particulier au centre de la plaine de Tébessa, avec une couverture marneuse en surface, en profondeur, il y a des sables et cailloutis calcaires. Les bordures calcaires situées au sud et nord de la région rechargent ce système.

Chapitre V

Matériels et méthodes



1. Introduction

Cette étude vise à analyser les paramètres physico-chimiques des eaux souterraines et à examiner les dangers de pollution de ces eaux.

Dans cette optique, nous exposerons le processus de traitements de l'image satellitaire, les conditions et les procédures d'échantillonnage, les techniques de mesure et d'analyse des échantillons.

Dans ce travail, des échantillons ont été collectés sur divers endroits de la région de Tébessa et les diverses analyses réalisées ont été menées au niveau du laboratoire de l`hydrogéologie à l`université de Tébessa et le laboratoire de (Ferfos- Bir el Ater). Nous allons exposer les concepts généraux sur l'indice de qualité de l'eau et le matériel et la méthodologie adoptée durant notre expérimentation.

2. Matériels

2.1. Les images (MNT)

Un Modèle Numérique de Terrain (MNT) est une image tridimensionnelle du relief terrestre, réalisée grâce à des missions radar comme SRTM (terrain Shuttle Radar Topography Mission), qui permet de visualiser de manière précise les variations d'altitude et les formes du terrain. Cette image fournie par deux organismes américains, la NASA et la NGA. Ces informations sur l'altitude ont été collectées lors d'une mission de 11 jours en février 2000 menée par la navette spatiale Endeavour (STS-99), en utilisant l'interférométrie radar à une altitude de 233km. **(H, Debbar, 2017)**.

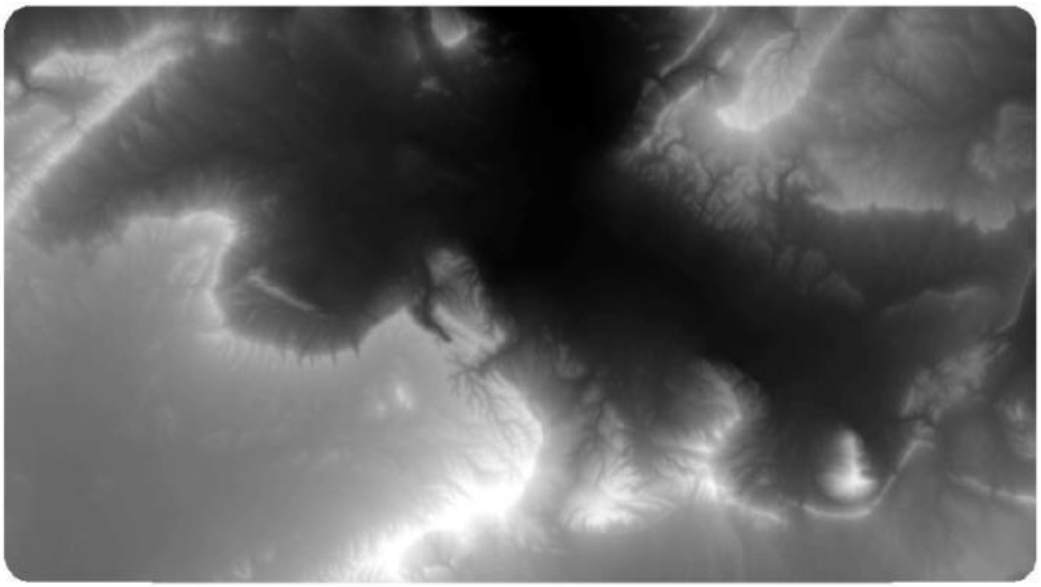


Figure 28. Modèle numérique de terrain de la zone d'étude.

2.2. Matériel des échantillons

Dans le but d'analyser la qualité de l'eau, seize échantillons des eaux souterraines ont été collectés dans le bassin versant Tébessa-Morsott en 2020. Nous avons examiné divers des paramètres physico-chimiques tels que la conductivité électrique, température, le pH, ainsi que des paramètres chimiques tels que les éléments majeurs ; Les anions solubles (Cl^-, SO_4^{2-}, HCO_3^-) et les cations solubles (Na^+, K^+, Ca^{2+} et Mg^{2+}). Sur le terrain, on a effectué des mesures de la température, la conductivité électrique et le pH en utilisant une électrode en platine portable, d'un conductimètre et d'un pH- mètre. Pour garantir des résultats précis dans l'analyse d'eau, il est essentiel de bien préparer le laboratoire, en commençant par la collecte des échantillons dans des bouteilles appropriées pour ce type d'analyse, voici la procédure pour l'analyse chimique des éléments majeurs d'eaux souterraines :

- Les éléments chimiques les Chlorures, les Bicarbonates, le Calcium peuvent être analysés par titrimétrie, une méthode d'analyse quantitative en chimie.
- On peut quantifier la présence sulfates dans l'eaux par spectrophotométrie en utilisant une Méthode qui repose sur la formation d'un complexe coloré.
- La photométrie de flamme détermine les concentrations de sodium et potassium en mesurant la lumière émise par les éléments dans une flamme.
- On calcule la teneur en magnésienne de l'eau en déduisant la dureté totale et la dureté calcique Mg^{+2}= TH- Ca^{2+}.

- La dureté totale ou titre hydrotimétrique (TH) déterminée par complexométrie avec L'EDTA, qui se lie aux ions calcium et magnésium dans l'eau.

Tab.9. Les coordonnées des forages dans la zone d'étude.

	Les forages	XUTM	Y UTM
Ain Zerroug	EF1	408805,749	3924591,129
	j2-3	412396,587	3922004,248
	AC3	409593,422	3923598,267
Bekkaria	FA3	428491,767	3916755,837
	FA4	427397,298	3916876,645
	FA6	428829,685	3915782,045
	FTA1	419993,651	3920160,719
	FTA2	418871,821	3920634,018
Tébessa Centre-ville	TU	419993,651	3920160,719
	Q3-4	419722,159	3918594,96
	Q5-6	418790,201	3918284,383
Hammamet	Ys4	404867,035	3924895,614
Boulhef Eldyr	F10	415738,642	3928753,008
	F9	415948,519	3928589,132
	F11	415401,584	3928654,53

2.3. Les logiciels utilisés pour traitement de données

2.3.1. ArcGis version 10.8

ArcGIS Desktop comprend une suite d'applications intégrées : ArcCatalog, ArcMap, ArcGlobe, ArcToolbox ainsi que Model Builder. Il est vendu sous trois niveaux incluant plus ou moins de fonctionnalités : ArcView, ArcEditor et ArcInfo.

-ArcMap : application centrale assure toutes les tâches liées aux cartes, telles que cartographie, l'analyse spatiale et la mise à pages.

-ArcCatalog : agencement et gestion des données.

-ArcToolBox et ModelBuilder : géo traitement.

-ArcGlobe : visualisation 3D dynamique.

L'une des suites logicielles les plus complètes du marché, ArcGIS propose également de nombreuses extensions tels que Spatial Analyst (module raster) et 3D Analyst **(BOUDIAF Zahra, 2021)**.

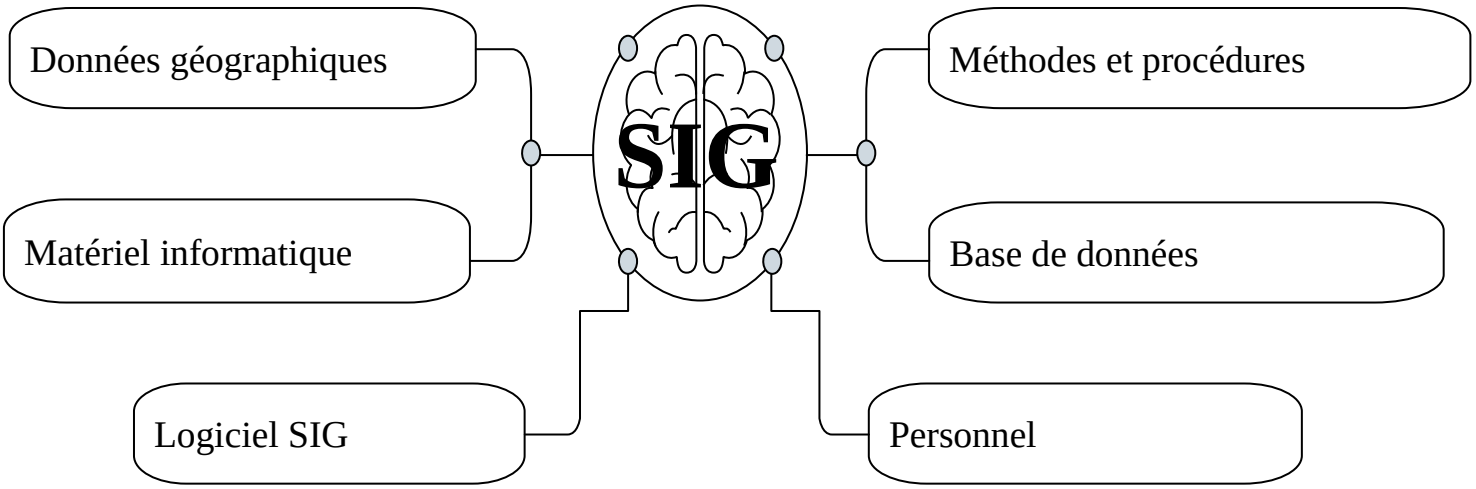


Figure 29. Schéma des composantes d'un SIG**.**

2.3.2. Diagrammes

Cet outil d'hydrogéochimie permet vérifier la précision des résultats d'analyses chimiques par calcul de la balance ionique, d'identifier les propriétés géochimiques et d'établir des diagrammes hydrochimiques tels que Piper, Schoeller, pour illustrer les différents faciès des eaux souterraines en se basant sur leur paramètre physicochimique.

2.3.3. Excel 2016

On l'a employé afin de traiter les données statistiques et l'illustrer les graphiques.

3. Méthodes de traitement des résultats

3.1. La réalisation de bassin versant

Le bassin versant est une zone géographique définie par les lignes de partage d'eaux, Etant chargé de recueillir les eaux de pluie jusqu'à l'exutoire.

Les étapes géo traitements pour la délimitation du bassin versant de Tébessa- Morsott sont les suivantes : Dans ArcGis, importez-le MNT et les autres données nécessaires. Effectuez un prétraitement rn utilisant l'outil "Fill" pour corriger les dépressions du MNT Créez le réseau de drainage avec les outils "direction de flox" et "accumulation de flux". Utilisez l'outil "Watershed " pour délimiter le bassin versant à partie d'un point de drainage, puis vérifiez les résultats et exportez les couches géographiques.

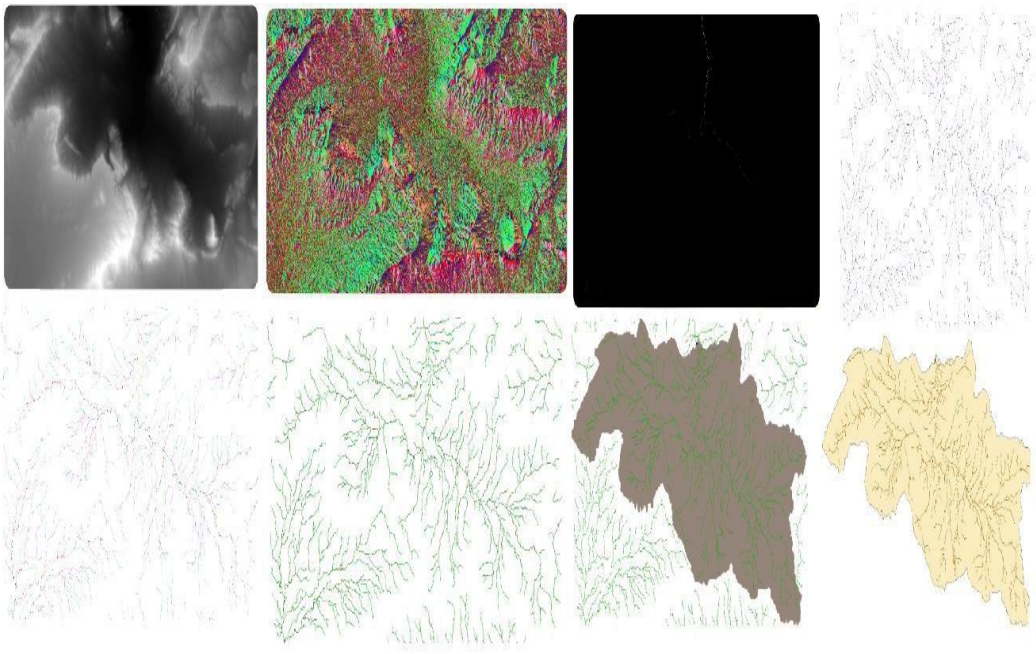


Figure 30. Les étapes géo-traitements pour la délimitationdu bassin versant de Tébessa-Morsott.

3.2. Interpolation des données physico-chimiques

L'emplacement précis, la latitude, la longitude et l'altitude des points d'échantillonnage ont été déterminés sur le terrain à l'aide de GPS. Les emplacements géographiques sont importés avec les paramètres physicochimiques des eaux souterraines après sa préparation dans le programme MS Excel dans le logiciel Arcgis 10.4 comme des points. Le projet de géo base de données a été mis en place afin de produire les cartes de répartition de certains paramètres physicochimiques d'eau **(Abraham Bairu, Nata Tadesse ,2013)**.

L'interpolation spatiale est le processus d'utilisation de points avec des valeurs connues pour des valeurs estimées à d'autres points inconnus. Les méthodes d'interpolation les plus couramment utilisées dans toutes disciplines sont pondération de distance inverse (IDW) et krigeage ordinaire (KO).

Les interpolateurs se distinguent essentiellement par leur corrélation spatiale des échantillons par distance. Le choix entre IDW et OK dépend du nombre d'observations disponibles pour les prédictions dans la fenêtre de recherche, il est important d'inclure les observations situées autour

du point de prédiction. La géométrie repose sur la compréhension empirique du phénomène étudié (**Agung Setianto, Tamia Triandini .2013)**.

3.3.L'indice de qualité des eaux souterraines (WQI)

3.3.1. Définition

L'indice de la qualité des eaux souterraines est un outil rapide pour étudier la qualité d'une source d'eau souterraine, (IQE) est une expression numérique basée sur un grand nombre des données, tels que les critères chimiques, physiques et biologiques. L'indice de qualité de l'eau (WQI) a été évalué pour le degré de pollution et la potabilité de l'eau **(N, Zair,2022)**. Afin de simplifier les choix en matière de gestion et de préservation des ressources en eau souterraine.

3.3.2. Historique

L'indice de qualité des eaux permet d'obtenir de manière efficace une grande quantité importante de données en une seule mesure significative et reproductible. Cette approche a d'abord été suggérée par Horton (1965) et Brown et al. (1970). La première formule proposée pour calculer cet indice prend en considération les paramètres essentiels pour évaluer la qualité des eaux de surface .et qui témoigne de l'interaction complexe de divers éléments essentiels pour évaluer et gérer la qualité de l'eau **(Liouet al., 2004 ; Tyagiet al., 2013)**.

Cet indice a été utilisé pour la première fois afin de caractériser les variations physico chimiques annuelles et leur influence sur la qualité de l'eau potable (**House et al., 1987 ; House,1990).**

3.3.3. Méthode du calcul d'indice de qualité l'eau

L'évaluation de la qualité des eaux a été réalisée en se basant sur les normes de qualité de l'eau potable établies par l'OMS. L'indice de qualité des eaux simplifie de données de surveillance, regroupant ainsi de nombreuses variations en seule valeur numérique. Ces indices aident à gérer la qualité en analysant les tendances régionales et d'évaluer l'impact de mesures d'intervention spécifiques (**Hongxing LI, CharlotteD Smith, 2019)**. Le calcul de l'IQE de 6 paramètres se fait en quatre étapes, chaque paramètre a été attribué un poids en fonction de selon son importance relative dans la qualité de l'eau potable (tableau 10), conformément aux approches méthodologiques décrites dans la littérature **(Sutadian et al.,2016)**

Le poids de 3 a été attribué aux paramètres, Chlorure, sulphate, et sodium. Le poids de 2 a été attribué aux paramètres calcium, bicarbonate et potassium. D'après leur rôle dans la qualité globale d'eau destinée à la consommation. Au cours de la deuxième étape, on calcule le poids relatif wi en utilisant l'équation suivante :

$$Pi = \frac{pi}{\sum_{i=1} pi} \quad (1)$$

Le poids relatif est défini comme Pi, ou pi est le poids de chaque paramètre et n est le nombre de paramètres

Au cours de la troisième étape, une échelle d'évaluation de la qualité, dénommée Qi sera utilisée pour chaque paramètre. La qualité est calculée en divisant concentration un paramètre par sa norme OMS (2004), puis en multipliant le résultat par 100.

qi= (Ci/Si)*100 (2)

Où qi est la cote de qualité, Ci est la concentration de chaque paramètre est exprimée en mg/L.et Si est la norme d'eau potable de l'OMS pour chaque paramètre est exprimée en mg/L. D'après les directives de l'OMS 2004, le mesure de SI est effectuée pour chaque paramètre chimique et utilisé pour calculer l'indice de qualité d'eaux selon l'équation suivante : SIi =Pi*qi (3)

IQE =Σ SIi (4)

Tab.10. poids relatifs des paramètres chimiques.

Paramètre chimique	Norme OMS	Poids (wi)	Poids relatif (Wi)
Na^+	*200*	3	0.17
Mg^{2+}	*50*	2	0.12
Ca^{2+}	75	2	0.12
K^+	12	2	0.12
Cl^-	250	3	0.17
SO_4^{-2}	250	3	0.17
HCO_3^-	120	2	0.12
Total		**Σwi =17**	**ΣWi=0.99**

3.3.4. Validation de la cohérence des poids relatifs (méthode AHP) :

Afin d'assurer la fiabilité des poids relatifs Wi attribués aux paramètres chimiques dans le calcul de l'indice de qualité des eaux (IQE), une validation a été effectuée à l'aide de la méthode de l'Analytic Hierarchy Process (AHP) développée par Saaty (1980). La matrice de comparaison par paires a été construite en utilisant le rapport direct des poids attribués à chaque paramètres $\boldsymbol{A[i,j] = wi/wj}$**.(Gorgij et al,2021)**

Le vecteur propre normalisé représentant les poids relatifs a été estimé à l'aide de la moyenne géométrique des lignes de la matrice, suivie d'une normalisation telle que **Σwi=1**.

- **Vérification de cohérence**

Pour vérifier la cohérence interne des jugements, plusieurs indicateurs ont été calculés :

1. **Valeur propre dominante λ_{max}** : obtenue à partir de la moyenne des rapports (A*W)/W.
2. **Indice de cohérence (Cl) :** CI= (λ_{max} -n)/(n-1)
3. **Ratio de cohérence (CR) :** CR= CI/RI, ou RI est l'indice aléatoire fourni par Saaty en fonction de ^{n}(RI= 1.24 pour $^{n=6}$).

Les résultats numériques sont :

λ_{max} =7, CI=0,05, CR=0.04

Puisque CR<0,10, la matrice de jugements est considérée comme parfaitement cohérence et les poids wi peuvent être utilisés en toute confiance dans le calcul final de l'IQE.

L'IQE a été calculé en additionnant les valeurs de chaque sous- indice de chaque échantillon d'eau souterraine. Les valeurs calculées de l'IQE sont habituellement divisées en cinq classes (tableau 11) eau excellente, bonne, pauvre, très mauvaise et impropre à la consommation.

Tab .11. Classification de la gamme et de la catégorie d'eau de l'OMS.

Gamme d'indice de qualité des eaux	Classe d'eau	Utilisation possible
<50	Excellente eau	**Eau potable, agriculture et industrie**
50-100	Bonne eau	**Eau potable, irrigation et industrie**
100-200	Mauvaise eau	**Irrigation et industrie**
200-300	Très mauvaise eau	**Irrigation**
>300	Impropre à la consommation	**Prévoir un traitement adéquat avant Utilisation**

Tab.12. Degré de qualité (Qi), sous- indice de chaque paramètre chimique(SIi), IQE et classification de l'eau de chaque échantillon d'eau souterraine.

Les forages	Na^+		Ca^{+2}		K^+		Mg^{+2}		Cl^-		SO_4^{-2}		HCO_3^-		IQE	Class
	Qi	SIi	Qi	SIi	Qi	SIi	Qi	SIi	Qi	SIi	Qi	SIi	Qi	SIi		
EF1	8,05	1,37	133,60	16,03	35,83	4,30	62,22	7,47	56,72	9,64	23,04	3,92	162,67	19,52	62,25	Bonne
j2-3	8,50	1,45	89,33	10,72	43,33	5,20	44,22	5,31	44,52	7,57	139,20	23,66	181,98	21,838	75,74	Bonne
AC3	10,00	1,70	122,83	14,74	32,50	3,90	72,90	8,75	18,12	3,08	84,48	14,36	223,67	26,84	73,37	Bonne
FA3	8,55	1,45	172,93	20,75	35,83	4,30	113,54	13,62	116,52	19,81	71,20	12,10	224,68	26,962	99,00	Bonne
FA4	6,25	1,06	60,83	7,30	44,17	5,30	46,24	5,55	66,40	11,29	90,80	15,44	204,35	24,522	70,46	Bonne
FA6	7,35	1,25	105,80	12,70	40,83	4,90	70,00	8,40	68,30	11,61	92,00	15,64	233,38	28,006	82,50	Bonne
FTA1	9,15	1,56	134,67	16,16	24,17	2,90	121,06	14,53	90,48	15,38	103,68	17,63	196,00	23,52	91,67	Bonne
FTA2	7,95	1,35	99,39	11,93	40,00	4,80	82,40	9,89	24,08	4,09	168,00	28,56	284,30	34,116	94,74	Bonne
T3	10,75	1,83	106,83	12,82	59,17	7,10	87,50	10,50	40,00	6,80	138,00	23,46	244,00	29,28	91,79	Bonne
TU	6,90	1,17	103,25	12,39	31,67	3,80	76,20	9,14	23,64	4,02	111,20	18,90	281,62	33,794	83,22	Bonne
Q3-4	8,35	1,42	214,67	25,76	40,83	4,90	122,00	14,64	102,00	17,34	138,40	23,53	264,17	31,7	119,29	Mauvaise
Q5-6	9,90	1,68	149,33	17,92	22,50	2,70	36,00	4,32	55,20	9,38	116,00	19,72	274,17	32,9	88,63	Bonne
Ys4	9,45	1,61	112,21	13,47	52,50	6,30	40,08	4,81	28,36	4,82	200,00	34,00	144,37	17,324	82,33	Bonne
F10	11,55	1,96	100,47	12,06	62,50	7,50	70,98	8,52	59,96	10,19	120,00	20,40	172,83	20,74	81,37	Bonne
F9	10,95	1,86	114,36	13,72	55,00	6,60	67,10	8,05	73,99	12,58	27,95	4,75	170,83	20,5	68,07	Bonne
F11	9,45	1,61	101,53	12,18	57,50	6,90	34,02	4,08	15,20	2,58	180,00	30,60	163,43	19,612	77,57	Bonne
EF1	8,05	1,37	133,60	16,03	35,83	4,30	62,22	7,47	56,72	9,64	23,04	3,92	162,67	19,52	62,25	Bonne

3.4. Réalisation des diagrammes hydrochimiques

Le diagramme hydrochimiques sont utilisés pour identifier les propriétés chimiques d'aquifère en affichant les concentrations relatives des ions principaux. Alors que les diagrammes de Kelly, Wilcox permettent d'évaluer l'aptitude des eaux à l'irrigation.

3.5. Calcul d'indice de saturation

La détermination d'indice de saturation est à base de la relation suivante IS =log (Qs/Ks)
Nous avons utilisé un logiciel de thermodynamique chimique pour modéliser les équilibres Chimiques et calculer l'indice de saturation dans les systèmes aqueux.

3.6. Aptitude des eaux à l'irrigation

La qualité de l'eau impacte directement la quantité et la diversité des activités agricoles, ainsi que la préservation de la qualité des sols, particulièrement dans une zone agricole. L'analyse chimique des zones d'irrigation permet d'identifier la présence des substances dangereuses pour la santé publique, les plantes et les sols. L'utilisation de diagramme de Wilcox, combinée au calcul de plusieurs indices tels que le SAR, le pourcentage de sodium (Na %) l'indice de perméabilité (IP), l'indice de Kelly (KR), la teneur en magnésium dangereux (MH) et l'indice de perméabilité de Doneen (Ps). Ces indicateurs fournissent une évaluation plus précise de l'aptitude des eaux à l'irrigation et permettent de mieux orienter les pratiques agricoles dans la région de Tébessa.

Pour l'évaluation de l'aptitude des eaux souterraines à l'irrigation, plusieurs indices largement utilisés en hydrogéologie ont été calculés à partir des concentrations ioniques majeure (exprimées en meq/L). Tableau suivant présente les formules adoptées ainsi que leurs références bibliographiques.

Tab13. Les indices d'aptitude des eaux à l'irrigation

Indice	Formule	Référence
SAR	$SAR = Na^+ / \sqrt{((Ca^{2+} + Mg^{2+}) /2)}$	Richards, 1954
Na%	$Na\% = ((Na^+ + K^+) \times 100) / (Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+)$	Wilcox, 1955
PI	$PI = ((Na^+ + \sqrt{HCO_3^-}) \times 100) / (Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+)$	Doneen, 1964
MH	$MH = (Mg^{2+} \times 100) / (Ca^{2+} + Mg^{2+})$	Szabolcs & Darab, 1964
PS	$PS = Cl^- + (SO_4^{2-} / 2)$	Doneen, 1964
KR	$KR = Na^+ / (Ca^{2+} + Mg^{2+})$	Kelly, 1963

Tab.14. Classification des indices par d'aptitude des eaux à l'irrigation

Indice	Classe	Interprétation
SAR	<10	Eau excellente pour irrigation
	10-18	Bonne à moyenne
	18-26	Mauvaise
	>26	Non recommandée
Na %	<20 %	Excellente
	20 - 40%	Bonne
	40-60 %	Admissible
	60-80%	Mauvaise
	>80%	Très mauvaise
PI	>75%	Classe I- Excellente
	25-75 %	Classe II- Admissible
	< 25%	Classe III- Non recommandée
MH	<50%	Eau appropriée
	> 50 %	Eau inappropriée
KR	<1	Eau appropriée
	>1	Eau inappropriée
PS	<3 meq/L	Excellente
	3-5 meq/L	Bonne
	>5meq/L	Mauvaise

Les indices calculés ont été interprétés en se référant aux classifications établies dans la littérature spécialisée. Cette démarche permet d'évaluer précisément l'aptitude des eaux souterraines à l'irrigation en tenant compte des risques liés à la salinité, la sodicité, et à l'effet sur la perméabilité des sols. Les résultats obtenus seront présentés et discutés dans les chapitres suivants accompagnés de diagrammes et analyses complémentaires.

3.7. L'indice de qualité de l'eau d'irrigation

L'indice de qualité de l'eau d'irrigation (IWQI) constitue un paramètre essential pour évaluer l'aptitude des eaux à préserver les propriétés du sol et à maintenir la santé des cultures. **(Gab et al.,2023)**. En effet, la présence de sels minéraux dans l'eau d'irrigation peut altérer la structure du sol ainsi que ses propriétés de perméabilité et d'aération. **(Hussein et al.,2024)**

Ces effets étant pris en compte dans le calcul de l'indice de qualité des eaux d'irrigation IWQI afin de déterminer adéquation à un usage agricole durable. L'IQWI intègre plusieurs paramètres essentiels (CE, sodium, chlorure, bicarbonate, SAR) chacun pondéré par un facteur (Wi) reflétant son importance relative **(Meireles et al.,2010).**

Les notes normalisées (Qi) de chaque paramètre sont calculées selon Ayers et Westcot. L'indice final, sans dimension, est obtenu par une formule pondérée combinant Qi

et Wi calculé selon l'équation suivante : $\mathbf{IWQI} = \sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{Wi} * \boldsymbol{Qi}$

Ou le poids Wi a été calculé selon la même méthode que celle utilisée pour l'indice de qualité de l'eau, déterminé précédemment tandis que Qi représente la valeur de qualité mesurée dans la plage admissible, le résultat de calcul IWQI est présenté dans le tableau 17 avec leur classification dans le tableau 16

$$\boldsymbol{Qi} = \mathbf{Qmax} - \frac{[(\boldsymbol{Xij} - \boldsymbol{Xinf}) * \boldsymbol{Qimap})]}{\boldsymbol{Xamp}}$$ Où

Xij = Le valeur mesurée pour chaque variable.

Xinf = Le valeur indiquant la limite inférieure de la classe

Qimap = Le fréquence de la classe.

Xamp = La classe de fréquence à laquelle appartient le paramètre.

Tab.15. Valeurs limites des paramètres utilisés dans l'évaluation de la qualité (qi)

Qi	CE (uS cm−1)	SAR	Na^+	Cl^-	Hco_3-
0-35	CE<750	SAR<2 or	Na^+<2or	Cl^-< 1 or	Hco_3- < 1 or
	CE≥3000	SAR≥12	Na^+ ≥12	Cl^-≥10	Hco_3-≥ 8,5
35-60	1500≤CE<3000	6≤ SAR<12	6≤ Na^+ <12	7≤ Cl^- <10	4,5≤ Hco_3- <8,5
60-85	750≤CE<1500	3≤ SAR<6	3≤ Na^+ <6	4≤ Cl- <7	1,5≤ Hco_3-<4,5
85-100	200≤CE<750	2≤ SAR<3	2≤ Na^+ <3	1≤ Cl- <4	1≤ Hco_3- <1,5

Tab.16. Classification de IWQI

Type de IWQI	Classe de IWQI
Impropre	0-40
Acceptable	40-55
Bonne	55-70
Très Bonne	70-85
Excellente	85-100

Tab.17. Le résultat de calcul l'indice de qualité de l'eau d'irrigation

Les forages	Na^+		Cl^-		CE		HCO_3^-		SAR		IWQI	Class
	Qi	Qi* Wi	Qi	Qi*Wi	Qi	Qi*Wi	Qi	Qi*Wi	Qi	Qi*Wi		
EF1	22,75	4,55	88,75	11,54	97,99	25,48	75,55	4,53	0,18	0,06	46,16	Acceptable
j2-3	22,05	4,41	91,93	11,95	59,52	15,48	73,44	4,41	97,25	32,09	68,34	Bonne
AC3	19,78	3,96	98,95	12,86	57,15	14,86	68,89	4,13	97,55	32,19	68,00	Bonne
FA3	22,05	4,41	56,95	7,40	59,12	15,37	68,77	4,13	4,02	1,33	32,64	Impropre
FA4	25,55	5,11	82,58	10,74	76,06	19,78	71	4,26	99,35	32,79	72,67	Très bonne
FA6	23,8	4,76	82,08	10,67	57,32	14,90	59,73	3,58	1,05	0,35	34,26	Impropre
FTA1	21	4,20	76,5	9,95	76,85	19,98	59,73	3,58	99,4	32,80	70,51	Très bonne
FTA2	22,93	4,59	97,35	12,66	79,75	20,74	56,79	3,41	99,55	32,85	74,23	Très bonne
TU	24,5	4,90	97,49	12,67	59,41	15,45	56,95	3,42	3,15	1,04	37,48	Impropre
Q3-4	22,23	4,45	59,53	7,74	93,8	24,39	57,95	3,48	7,17	2,37	42,42	Acceptable
Q5-6	19,95	3,99	89,16	11,59	57,01	14,82	57,4	3,44	97,7	32,24	66,09	Bonne
Ys4	20,65	4,13	96,25	12,51	93,99	24,44	77,56	4,65	96,9	31,98	77,71	Très bonne
F10	17,5	3,50	84,18	10,94	97	25,22	74,45	4,47	99,17	32,73	76,86	Très bonne
F9	18,37	3,68	80,65	10,48	92,99	24,18	74,67	4,48	95,8	31,61	74,43	Très bonne
F11	20,65	4,13	99,73	12,96	79	25,48	75,45	4,53	96,15	31,73	53,35	Bonne

3.8.Indice d'échange de base (i.e.b)

L'eau souterraine interagisse avec les roches qu'elles traversent, échangeant leurs ions, ce qui peut modifier leur composition chimique et les caractéristiques des roches. D'après Schoeller (1931), l'indice de base (i.e.b) correspond à la relation entre les ions échanges et les ions de la même nature dès leur origine

$i.e.b= r\,Cl^- - r(Na^+ + K^+)/r\,Cl^-$

Cet indice fournit des renseignements sur l'origine des eaux à savoir :

➢ Si l'indice d'échange de base est plus bas que 0 alors l'eau est cristalline.

➢ Si l'indice d'échange de base dépasse 0, cela signifie que l'eau d'origine sédimentaire.

Tous les points d'eau collectés dans la plaine d'étude ont un indice d'échange de base plus élevé, ce qui s'explique par la présence de chlorure.

3.9.L’analyse de composante principale

Les données d’échantillons d’eaux souterraines de Tébessa de la période 2020, ont fait l’objet d’une analyse en composantes principales ACP. Incluant 10 variables physico-chimiques (CE, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}, Cl^{-}, SO_4^{2-}, HCO_3^{-}, pH, TC◦) et 16 individus.

Chapitre VI
Hydrochimie



1. Introduction

La qualité des eaux souterraines est conditionnée par les paramètres physicochimiques car elle détermine les domaines d'utilisation de cette ressource (eau potable, industrielle, d'irrigation). L'étude hydrochimique vise à analyser les propriétés physicochimiques des eaux, identifier l'origine des eaux et d'étudier leur relation avec les formations géologiques environnantes, comprendre le mouvement de la nappe profonde et ses modalités d'alimentation, étude du processus de la minéralisation afin de diminuer les dangers de la pollution. La recherche hydrochimique repose sur l'analyse des échantillons d'eau. Nous avons étudié 16 pointsd'eau dans la zone d'étude pour reconnaitre et expliquer l'origine de la minéralisation des eaux et leur l'évolution dans l'espace.

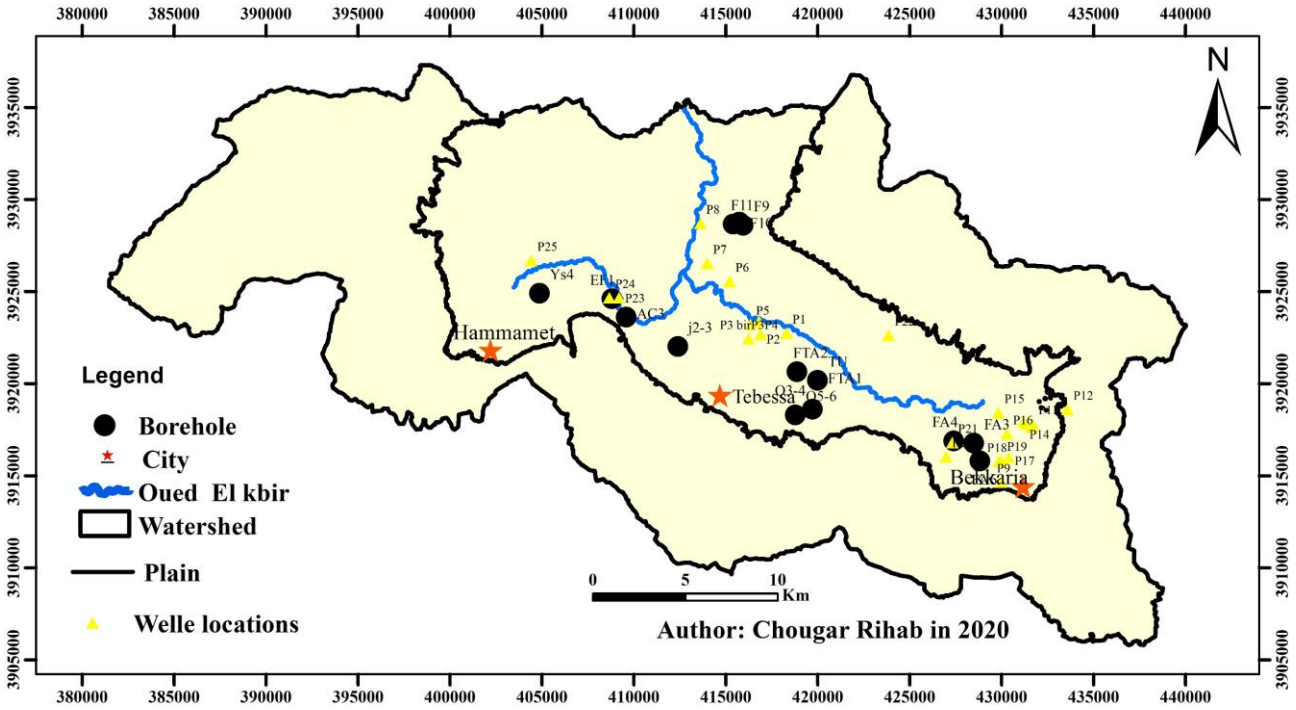


Figure 31. Carte d'inventaire des points d'eau dans la plaine de Tébessa-Morsott.

2. Description des résultats d'analyses chimiques de l'eau

Les résultats d'analyses physico-chimiques des eaux souterrainesde la plaine Tébessa présentés dans le tableau 18, comprennent les valeurs maximales, moyennes, minimales, médian et les écarts types :

Tab.18. Statistiques normales des paramètres des échantillons d'eaux souterraines.

Statistiques		pH	CE µS/cm	TDS (mg/l)	Ca^{+2} (mg/l)	Mg^{+2} (mg/l)	Na^{+} (mg/l)	K^{+} (mg/l)	CL^{-} (mg/l)	SO_4^{-2} (mg/l)	HCO_3^{-} (mg/l)
Max	18,3	11,1	1858	1948	161	61	23,1	7,50	291,30	500	341,16
Min	17,6	8,6	300,32	263	45,62	17,01	12,5	2,7	37,99	57,6	173,24
Moyenne	18	9,63	1142,37	984,46	94,27	37,31	18,19	5,23	147,06	294,7	261,94
Ecart-types	0,17	9,6	558.91	934	28,70	14,29	3,03	1,47	76,89	125,15	55,24
Médian	18,1	0,67	1239	479,94	84,16	35,49	18,19	4,90	141,8	290	261,94

2.1. Etude des paramètres physico-chimiques

2.1.1. La température de l'eau

La température de l'eau constitue un élément captivant dans le domaine de l'étude des eaux. Effectivement, elle a un impact significatif sur l'accroissement des réactions chimiques, les processus biologiques, et les caractéristiques physiques telles que la densité, la viscosité et la solubilité d'un système oxygéné en particulier**(Y, KAMENAN, 2021)**.

La variation spatiale de la température est comprise entre 17.60 et 18.3 °C. On observe que toutes les valeurs de température sont dans les normes algériennes (25 °C) ; influencées par la profondeur du niveau d'eau, et la variation climatique. Les données recueillies sont résumées dans la figure 32 ci-dessous.

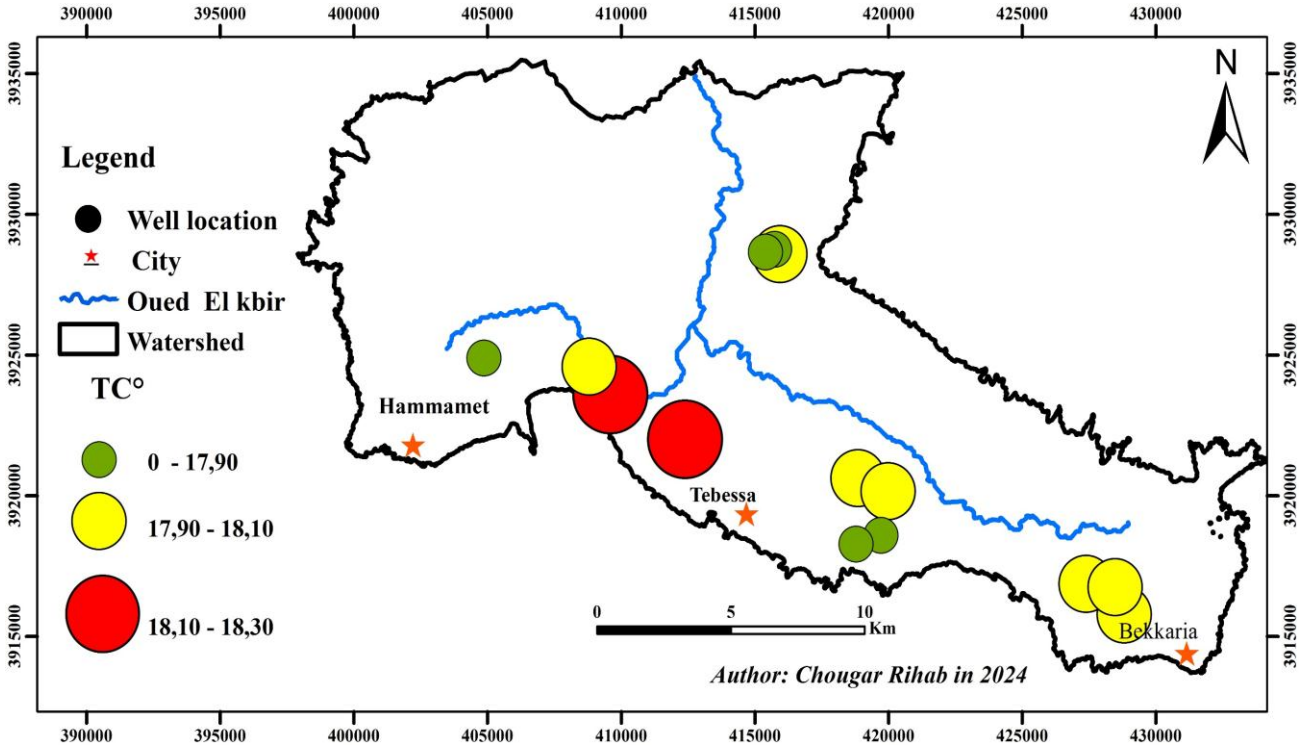


Figure 32 . Variation de la température des eaux souterraines dans la zone d'étude.

2.1.2. Le potentiel hydrogène (pH)

Le pH est un indicateur pour d'évaluer l'acidité de l'eau, mesurant la quantité d'ions d'hydro-gène (H^+). Le pH varie de 0 (très acide) à 14 (très alcalin), avec la valeur de 7 correspondant à une solution neutre à 25°C. Le taux de pH d'une eau naturelle peut fluctuer entre 4et 10 en fonction d'acidité ou la base des terrains traversés **(S, Bouslah, 2018)**. Le pH est influencé par la température et de la provenance de l'eau **(Dussart, 1966).**

Le pH influence la dureté, alcalinité, turbidité et conductivité de l'eau en modifiant les réactions chimiques .Les mesures indiquent des pH allant 8,6 et 11,1 **,** avec de moyenne de 9,63. Le bassin versant Tébessa-Morsott se distingue par des eaux alcalines avec des valeurs de pH dépassant la gamme normale retenue par la norme Algérienne entre 6,5 et 8,5. Les valeurs plus élevés au Sud le bassin 10à 11,1 sont due à la présence des calcaires et de la nappe phréatique, l'autre partie du bassin les valeurs sont comprise entre 8.6 à 9,85 .Une représentation cartographique de la distribution spatiale du pH est présentée dans la figure 33.

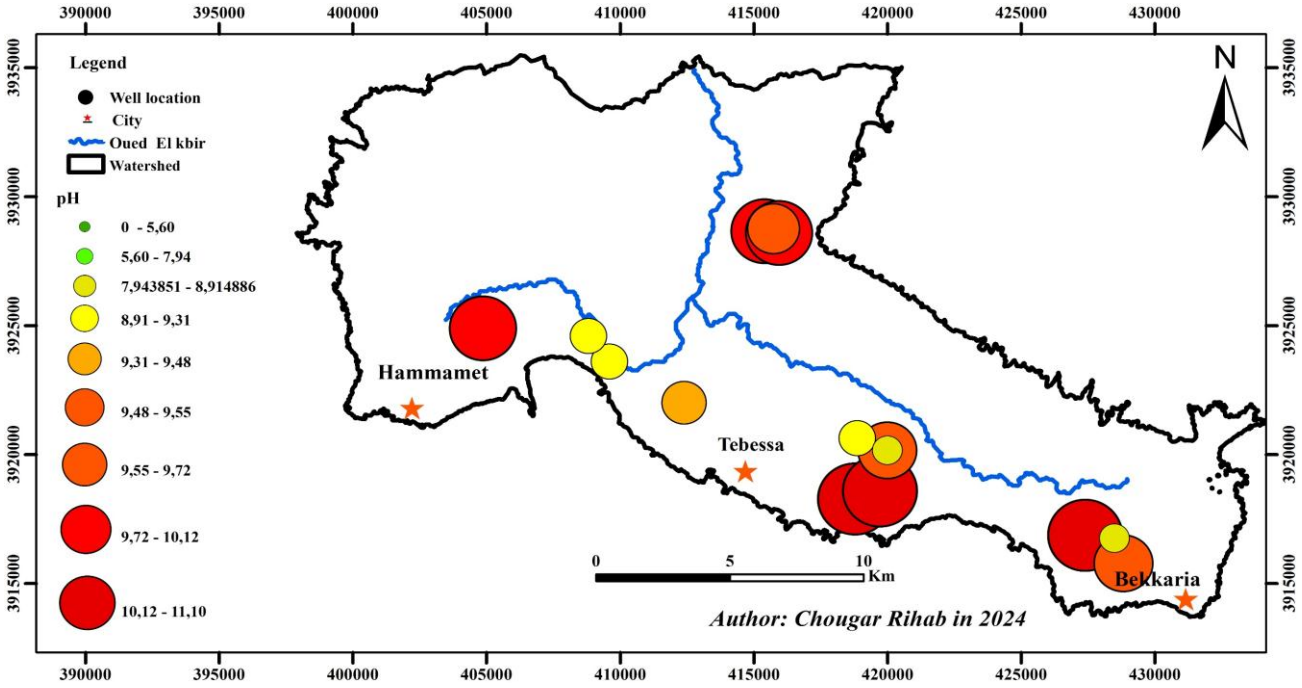


Figure 33. Distribution spatiale du pH dans la plaine de Tébessa-Morsott.

2.1.3. Conductivité électrique

La conductivité électrique est un indicateur du degré de minéralisation des eaux varie d'une matrice hydrique à une autre **(Y, KAMENAN,2021)**. Elle donne une estimation de la concentration des ions dissous dans l'échantillon, indiquant ainsi son degré de salinité **(CLEMENT et PIELTAIN, 2003).** Une corrélation existe entre la conductivité et la salinité de l'eau : 1ppm = 1.56 µ s/cm **(Z, BOULEGHLEM ,2015)**. Les eaux de la plaine affichent une conductivité comprise entre 300,32 et 1858 µ S/cm, avec une moyenne de 1142,37 µS/cm, les résultats obtenus sont bien supérieurs à la norme Algérienne de qualité de l'eau potable 2011 (1500 µ S/cm). Au Nord, Nord-Est et Ouest du bassin on observe des valeurs faibles (CE <1000 µS / cm), en relation avec la baisse de la concentration d'ions. Les valeurs plus élevées (CE >1500 µ S / cm) sont présentées en Sud et Est de la zone d'étude en raison du contact avec certaines formations géologiques triasique gypseuses et les évaporites à proximité Dj Djebissa. Quand la conductivité électrique de l'eau des puits domestiques est prédominante, cela indique souvent une bonne minéralisation de cette eau, ce qui témoigne de pollution dans cette nappe peu profonde. Cela pourrait être dû à des facteurs géologiques ou à des activitéshumaines mais les eaux souterraines sont moins minéralisées puisqu'elles sont protégées par les formations géologiques ci-dessus.

La carte de la répartition spatiale de la conductivité électrique est illustrée dans la figure 34.

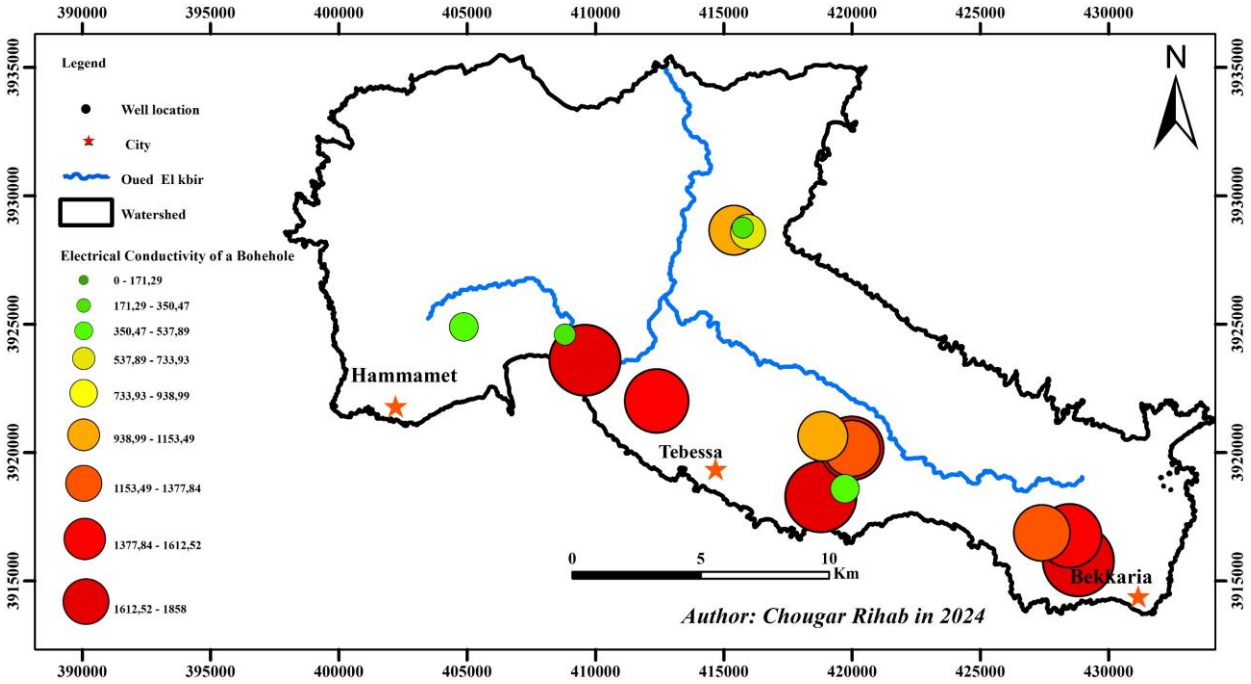


Figure 34. Distribution spatiale de la conductivité électrique dans la plaine de Tébessa-Morsott.

2.1.4. Total des solides dissous TDS

Le TDS représente la quantité totale des substances chimiques dissoutes dans les eaux. De manière générale exprimé en mg/l ou bien ppm. Cette mesure est importante pour évaluer les caractéristiques des eaux et sert indicateur important de sa pureté. TDS a été récompensé en 5 catégories selon la concentration ; Excellente (500), Bon (1000), Mauvaise (1500), Très mauvaise (3000), Inadapté (>3000) **(H, Nambi ,2016).** Les concentrations de TDS fluctuent entre 263 et 1948 mg/l, avec une moyenne de 984,46 mg/l, Cependant, dans la zone d'étude les valeurs obtenues demeurent nettement supérieures à la norme Algérienne de qualité del'eau potable (1000 mg /l).

Les grandes valeurs de TDS sont présentées dans le Sud -Est et Ouest, Sud -Ouest >1000 mg/l dues à la dissolution des évaporites Dj Djebissa et à l'Ouest Dj Belkfif et la dissolution des formations carbonatés des bordures,activités humaines (activités domestiques et agricoles). Le reste de la plaine les valeurs de TDS sont moyenne < 1000 mg/l. Une représentation cartographique de la distribution spatiale du TDS est présentée dans la figure 35.

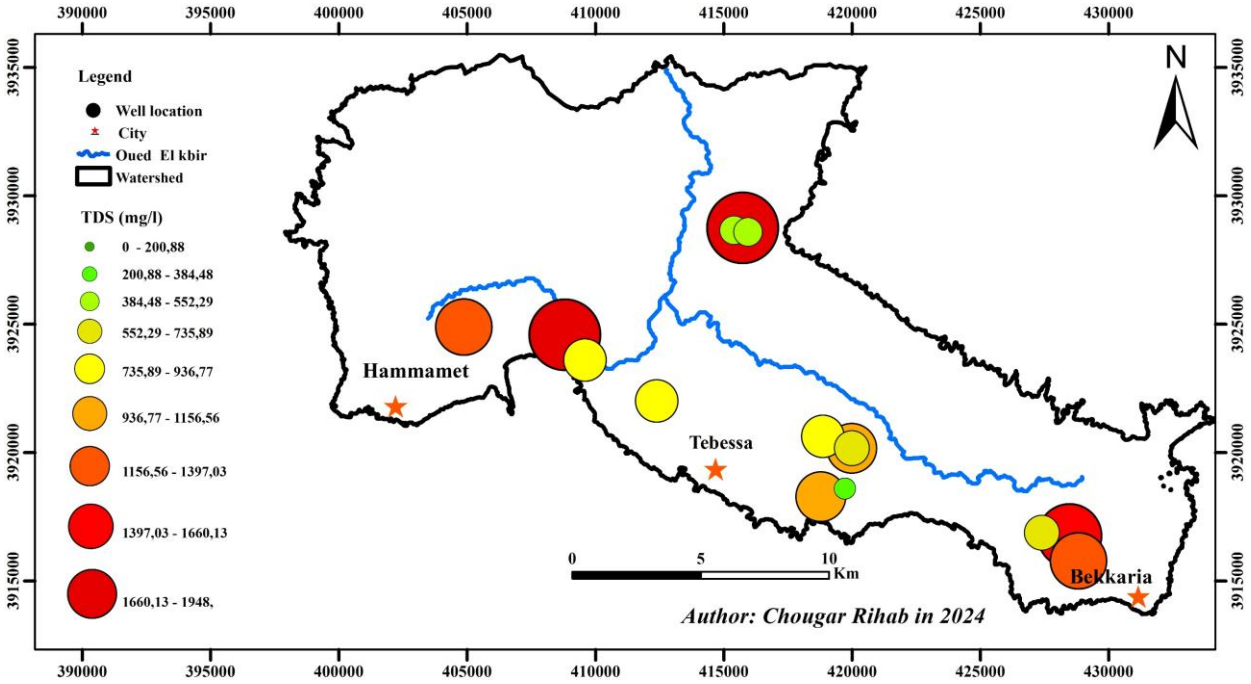


Figure 35. Distribution spatiale du TDS dans la plaine de Tébessa-Morsott.

2.1.5. Les éléments majeurs

a. Le calcium (Ca^{+2})

La présence du calcium dans la plaine de Tébessa est attribuée à la dissolution des formations carbonatés autour la plaine, la marne gypsifère du substratum **(L. GOUAIDIA and all. 2017)**. Les eaux souterraines de la zone d'étude contiennent une quantité de calcium allant de 45.62 et 161 mg/l, avec une moyenne de 94.27 mg/l, nedépassant pas la norme Algérienne pour l'eau potable (200 mg/l). Les valeurs de calcium dans la partie Sud-Est de la plaine sont de l'ordre de 100 à 161 mg/l, dans lesforages Q5-6, Q3-4 FA3 et FTA1, en raison de la présence du gypse de Dj Djebissa et les dépôts évaporitiques de Bekkaria et les valeurs restantes sont moyennes entre 45 et 100 mg/l.Une représentation cartographique de la distribution spatiale du calcium est présentée dans la figure 36

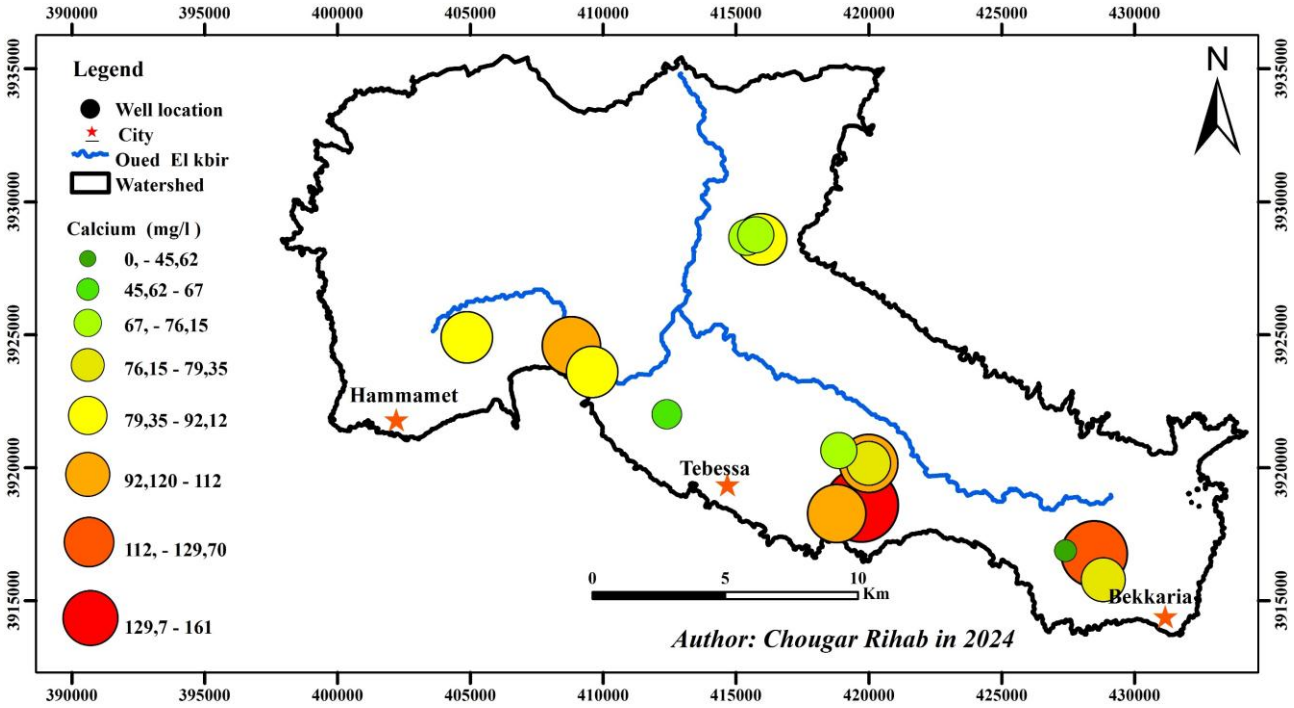


Figure 36. Distribution spatiale du calcium dans la plaine de Tébessa-Morsott.

b. Le Sodium (Na^+)

Le sodium joue un rôle important en agriculture notamment dans l'irrigation en raison de son effet sur la perméabilité des terrains **(Belkhiri, 2011)**. Sa présence est affectée par divers facteurs, tels que les formations géologiques, les activités industrielles et l'irrigation intensive. La teneurdu sodium reste très faible et varie entre 12,5 et 23,10 mg/l, avec une moyenne de 18,19mg/l, se conformant ainsi à la norme Algérienne (200 mg/l). Les teneurs en sodium entre 18 et 23 mg/l se trouvent au Nord-Est et Nord- Ouest de la zone d'étude, en raison du phénomène d'échange debase, les eaux usées domestiques, la présence d'argile et la marne gypsifère du substratum rocheux de la nappe. La présence du sodium est très faible dans le reste de la région La carte de la distribution spatiale de Na^+ a été présentée dans la figure 37.

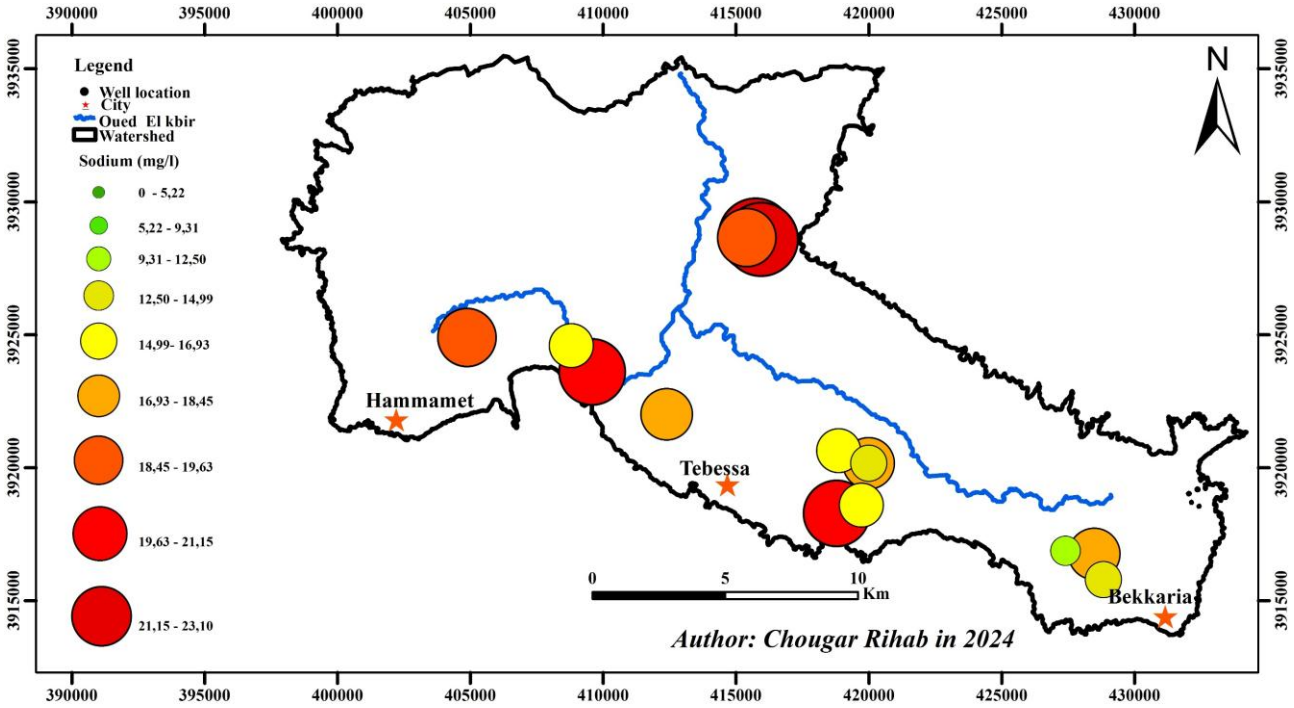


Figure 37. Distribution spatiale de sodium de la plaine de Tébessa-Morsott.

c. Le Potassium (K^+)

En générale, la concentration de potassium dans l'eau souterraines est faible et varie en fonction du taux d'engrais utilisés dans les activités agricoles.

Les valeurs du potassium dans l'eau varient entre et 2,7 et 7,50 mg/l, avecune moyenne de 5,23 mg/l ne dépassant pas la norme Algérienne pour l'eau potable (12 mg/l). Dans le Nord, Est, Ouest et au centre de la plaine, les valeurs élevées indiquent d'une activité agricole. En revanche, La concentration est inférieure entre 2 et 5 mg/l dans la région de Bekkaria et de Tébessa. La carte de répartition spatiale des k^+ a été obtenue dans la figure 38.

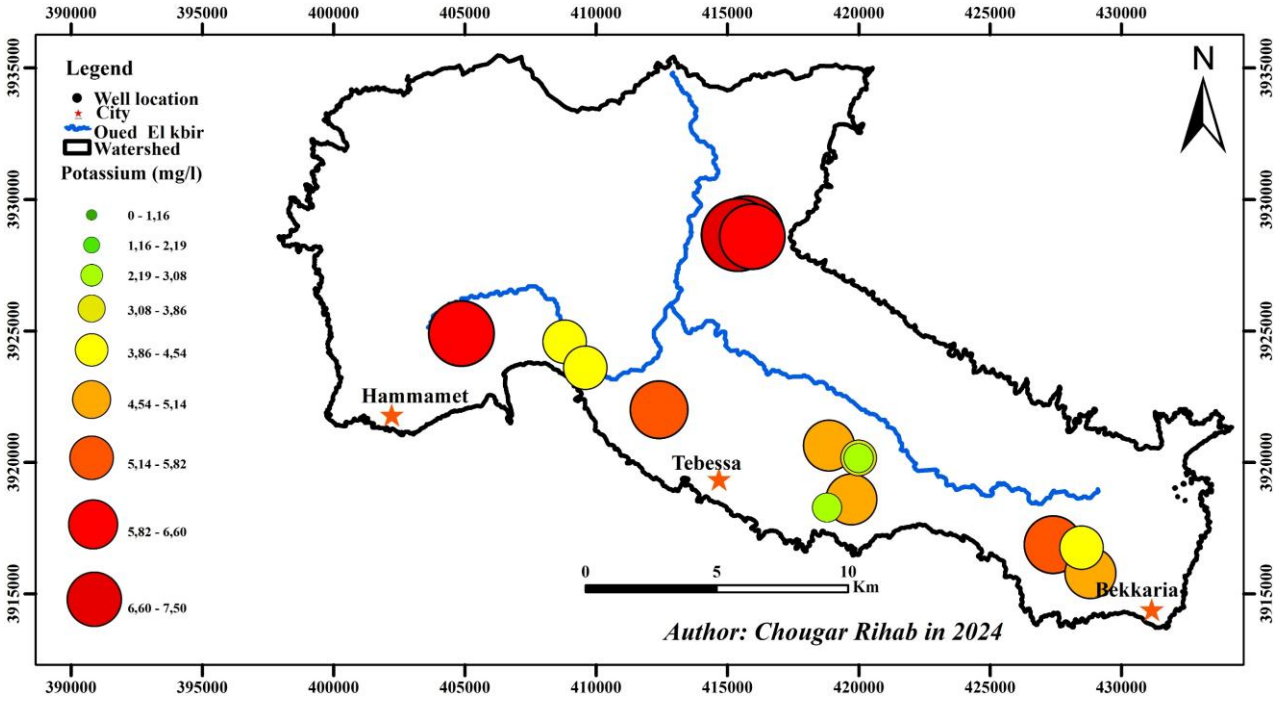


Figure 38. Distribution spatiale de potassium de la plaine de Tébessa-Morsott.

d. Le magnésium (Mg^{+2})

Dans les eaux souterraines, le magnésium est obtenu par la dissolution des formations carbonatés de bordures, des dolomies, des minéraux ferromagnésiens et à l'emploi d'engrais magnésiens. La teneur en magnésium varie entre 17,01 et 61 mg/l, avec une moyenne de 37,31mg/l

La majorité des valeurs sont conformes aux normes Algériennes de potabilité, qui sont de 150 mg /l. Les forages Q3-4, Q5-6, FTA1, FTA2, TU et FA3 se trouvent au le Nord-Est dela ville de Tébessa, à proximité de Bekkaria. Ils ont concentrations variant de 39 à 61 mg/l. En revanche, les concentrations du magnésium sont plus basses dans les parties restantes de la zone d'étude. La carte de la distribution spatiale des Mg^{+2} a été obtenue et présentée dans la figure 39.

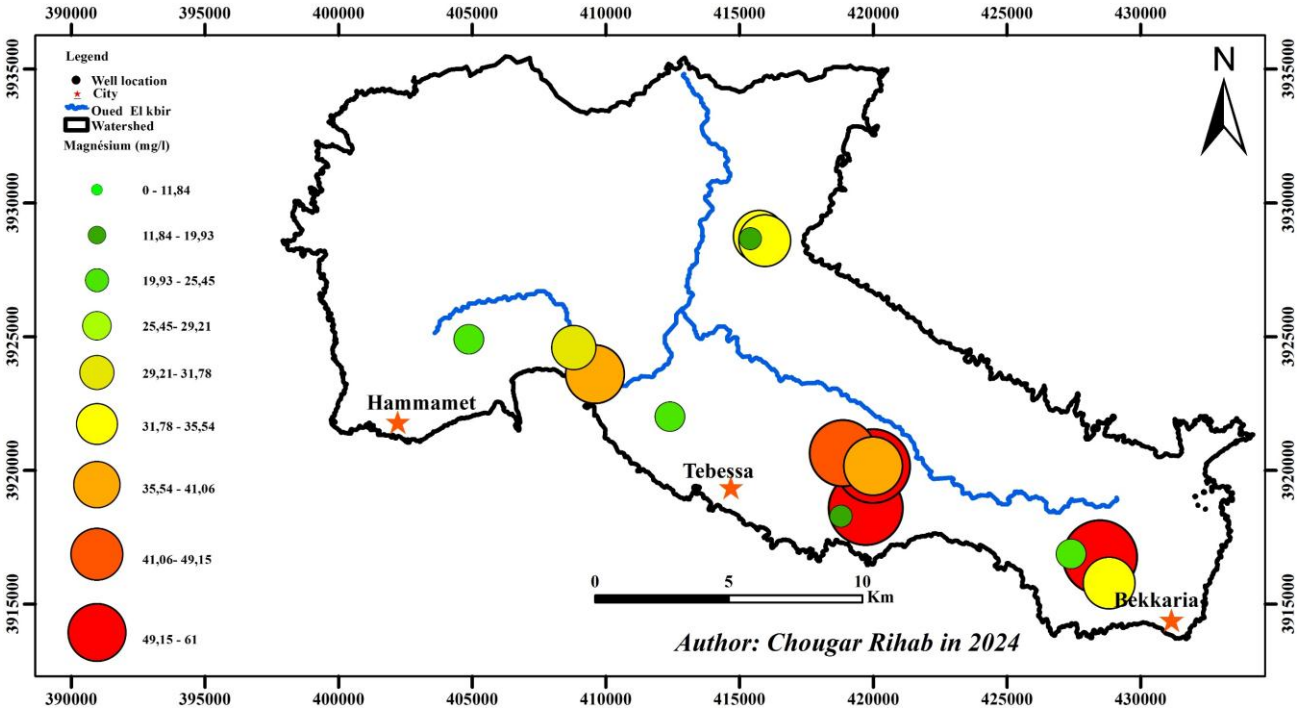


Figure 39. Distribution spatiale de magnésium de la plaine de Tébessa-Morsott.

e. Les Sulfates (SO_4^{-2})

Les sulfates se trouvent dans les eaux souterraines du bassin versant de Tébessa -Morsott en raison des dépôts atmosphérique, les restes industriels rejetés dans les Oueds, contact avec certaines formations géologiques triasiques gypseuses et les évaporites de Dj Djebissa et à l'Ouest près de Dj Belkfif ; les valeurs de sulfates comprissent entre 57,60 et 500 mg/l, avec une moyenne de 294,70 mg/l. On signale que 75 % des forages dépassent la norme Algérienne 250 mg/l. La concentration maximale en sulfates se situé dans la zone près de Tébessa et au Est et Ouest, résultant de la dissolution du gypse et d'anhydrite de Dj Djebissa, avec une concentration variante 270 à 500 mg/l. La concentration est inférieure à 250 mg/l dans le reste de la plaine. La carte de la distribution spatiale des sulfates a été présentée dans la figure 40.

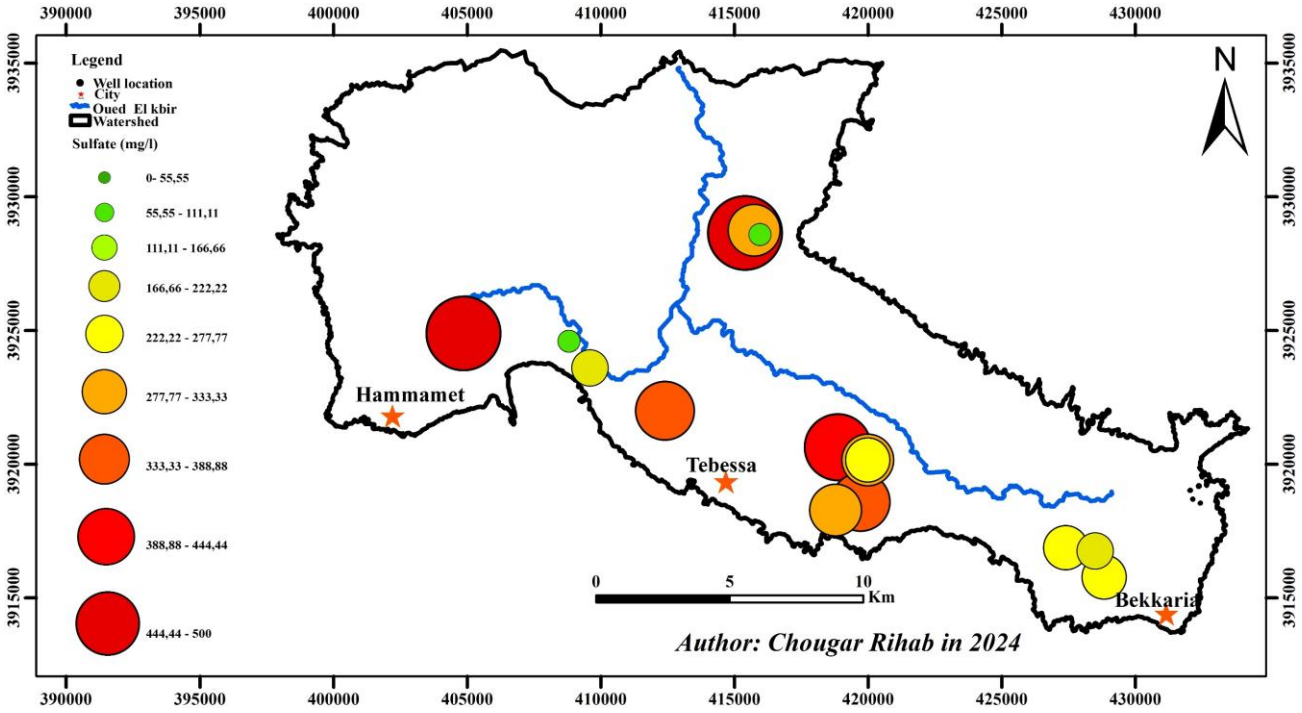


Figure 40. Distribution spatiale des sulfates de la plaine de Tébessa-Morsott.

f. Les Chlorures (Cl^{-})

C'est un élément largement distribué dans tous les types de roches sous différentes formes (**H, Nambi, 2016)**. Les chlorures peuvent également résulter de la dissolution des sels dans les terrains salifères, entrainant des concentrations élevées dans les eaux qui passent à travers les argiles (**Beaudry et Henry, 1984)**. Le teneur en chlorure varie de 37,99 et 291,30 mg/l, avec une valeur moyenne de 147,06 mg/l. Les résultats montrent que les taux de chlorures dans l'eau consommée dans la plaine du Tébessa-Morsott sont conformes aux normes Algérienne 250 mg/l, sauf quelques forages Q3-4, Q5-6, TU, FTA1, FTA2, FA3, FA4, FA6 avec des concentrations plus élevée, situées dans la région de Bekkaria en raison du lessivage des formations évaporitiques de Dj Djebissa et les marnes gypsifères du substratum de la nappe. La concentration de chlorure est moyenne au centre de la plaine due à la présence des dépôts alluvionnaires du quaternaire qui couvrent une grande partie de la région. La carte de variation spatiale des chlorures a été présentée dans la figure 41.

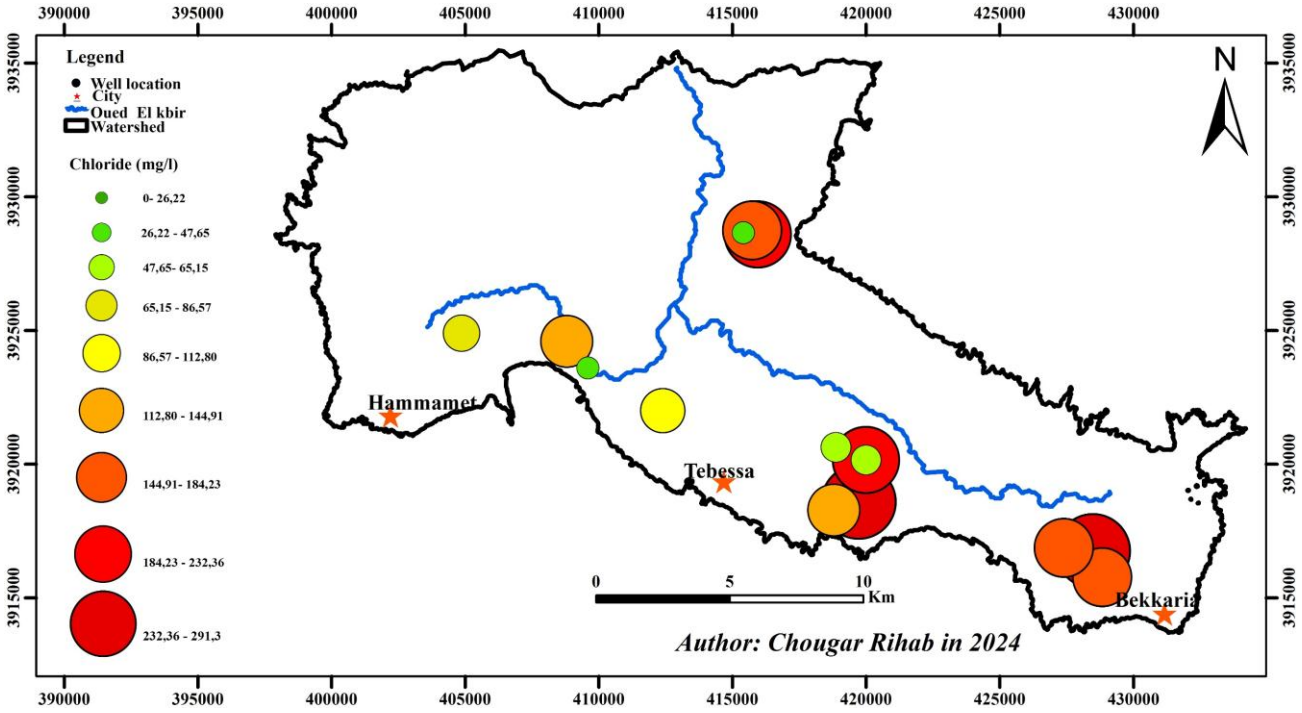


Figure 41. Distribution spatiale de chlorure de la plaine de Tébessa-Morsott.

g. Les Bicarbonates (HCO_3^-)

Les bicarbonates se trouvent dans les eaux souterraines en raison de la réaction entre le dioxyde de carbone et l'eau, formant l'ion bicarbonate (HCO_3^-). Les valeurs de bicarbonates variententre 173,24 et 341,16 mg/l, avec une moyenne de 261,94 mg/l, ces concentrations peuvent dépasser la limite de 120mg/l établie par la norme Algérienne. La teneur en bicarbonates dans les eaux souterraines de l'ouest et du Sud de la plaine est plus élevée, atteignant des valeurs supérieures à 250 mg/l. En particulier, dans la zone d'El Hammamet et du Tébessa, la dissolution de la formation du Maestrichtien et Turonien des bordures et les activités agricoles ; l'utilisation d'engrais contenant des carbonates, l'irrigation dans les zones agricolespeut provoquer une augmentation de la concentration de bicarbonates dans les eaux. D'autre part, la concentration varie de 173 à 240 mg/l dans le reste de la plaine. La carte de distribution spatiale des bicarbonates a été présentée dans la figure 42.

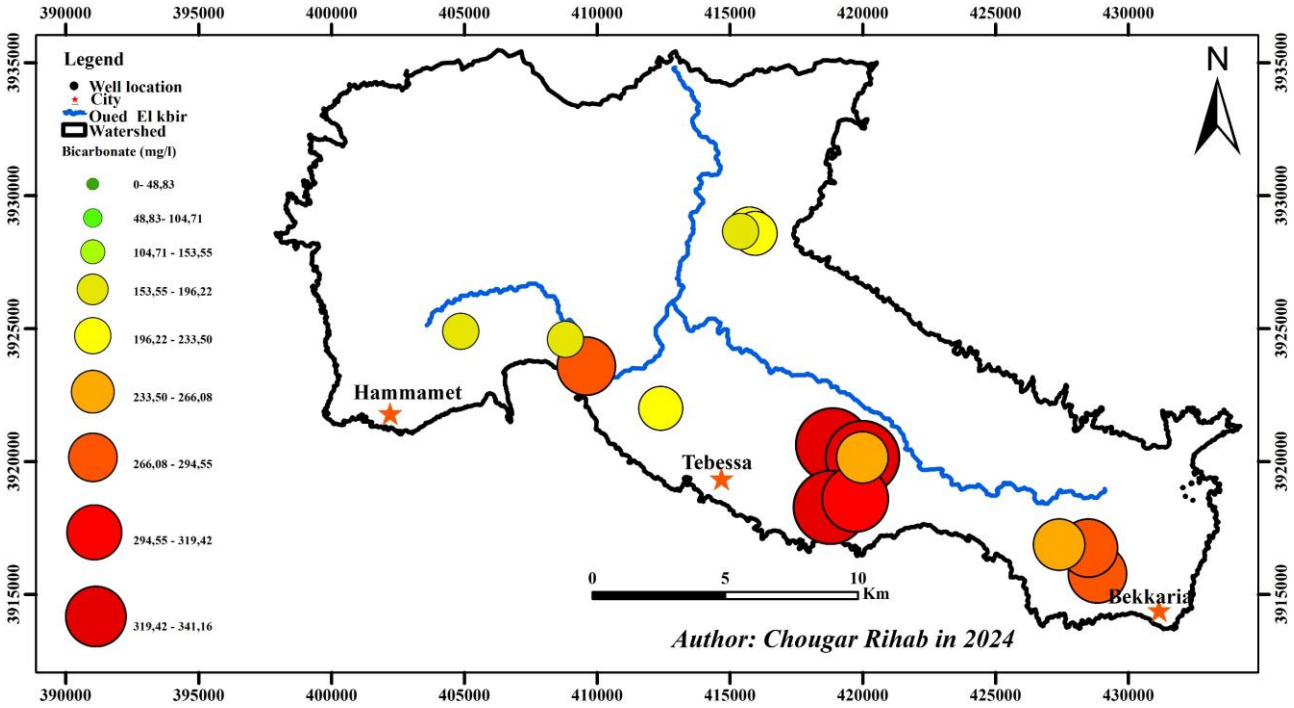


Figure 42. Distribution spatiale de bicarbonate de la plaine de Tébessa-Morsott.

3. Indice de la qualité de l'eau (IQE)

La méthode d'indice de qualité d'eau est une méthode efficace pour évaluer les eaux souterraines de la plaine Tébessa-Morsott. Cette étude utilise l'IQE pour déterminer la qualité de ces eaux. Tout d'abord, le poids relatif (Wi) de chaque paramètre physico- chimique a été mesuré en basant les normes l'OMS pour des eaux potables en 2004 (Tab.10).

En effet, six paramètres principaux sont considérés pour l'évaluation de la qualité des eaux de souterraines et analyser les caractéristiques chimiques : Calcium, Magnésium, sodium, potassium, Chlorures, sulfates et bicarbonates. Par la suite, on évalue la qualité (Qi) pour chaque paramètre en divisant la concentration par la norme de ces paramètres et on multiplie le résultat par 100, comme montre le tableau 12. L'évaluation l'indice de qualité WQI pour saison 2020 en se basant les résultats d'analyses physico-chimiques et les valeurs standards de l'OMS des eaux potables,

Les valeurs de l'IQE de nos paramètres fluctuent entre de 62,25 à 119,29, tandis que la classe de qualité des eaux est établie pour les 16 échantillons relatifs (Tableau 12). De cette manière, la classe de qualité bonne (50<IQE<100) a été repérée dans la majorité de la plaine étudiée avec une part de 80%. La classe qualité médiocre (100<IQE<200) a été signalée à proximité de Tébessa et de Bekkaria dans des forages Q3- 4, Q5-6, TU, FTA1, FTA2, FA3 de

20%. La qualité des eaux souterraines varie en fonction de la lithologie, l'hydrodynamique des eaux souterraines, les variations de climat, la présence de pollution. La création de la carte del'indice de qualité de l'eau. (Figure 43).

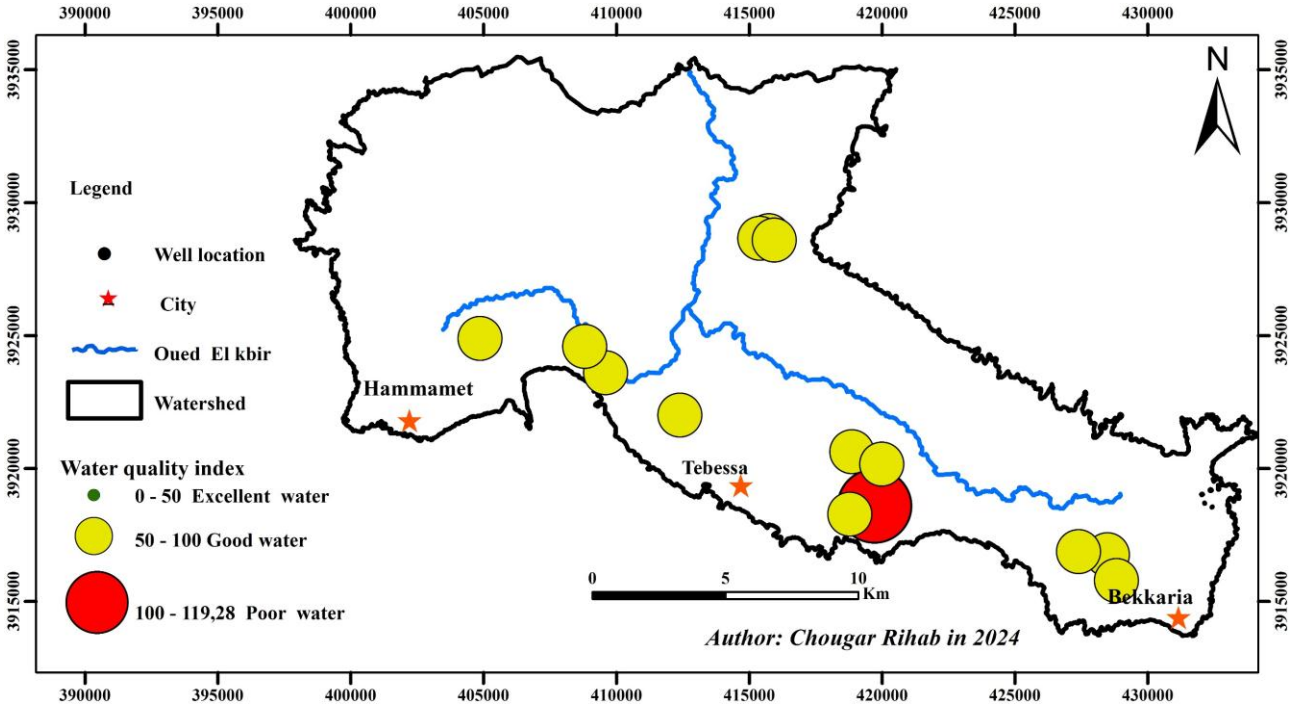


Figure 43. Distribution spatiale d'indice de la qualité d'eau de la plaine de Tébessa-Morsott.

3.1. Modèle de validation

3.1.1. Validation par les Chlorures

La mesure de l'indice de la qualité des eaux souterraines a été largement étudiée ces dernières années, car cette méthode est employée pour réduire la dégradation des eaux souterraines et le risque de la pollution, en raison de divers éléments présents dans nos plaines tels que des activités humaines, les effets du contact entre les eaux souterraines et les couches encaissante. Les résultats de l'indice de qualité d'eaux ont été validés en utilisant l'indicateur de la pollution les chlorures.

Les concentrations des chlorures contenus dans l'aquifère de notre région varient de 37.99 à 291,30 mg/l. La plupart étant inférieure à 250 mg/l (norme Algérienne). Ces mesures ont été effectuées principalement au centre et à l'Est de la plaine. La figure 44 montre que l'indice de qualité des eaux et la concentration de chlorure pour l'aquifère de Tébessa-Morsott sont généralement corrélés, à l'exception de quelques points. Les comparaisons entre les cartes de chlorure et l'indice de qualité de l'eau révèlent que les zones de mauvaise qualité de l'eau présentent des niveaux de chlorure supérieure 250 mg /l.

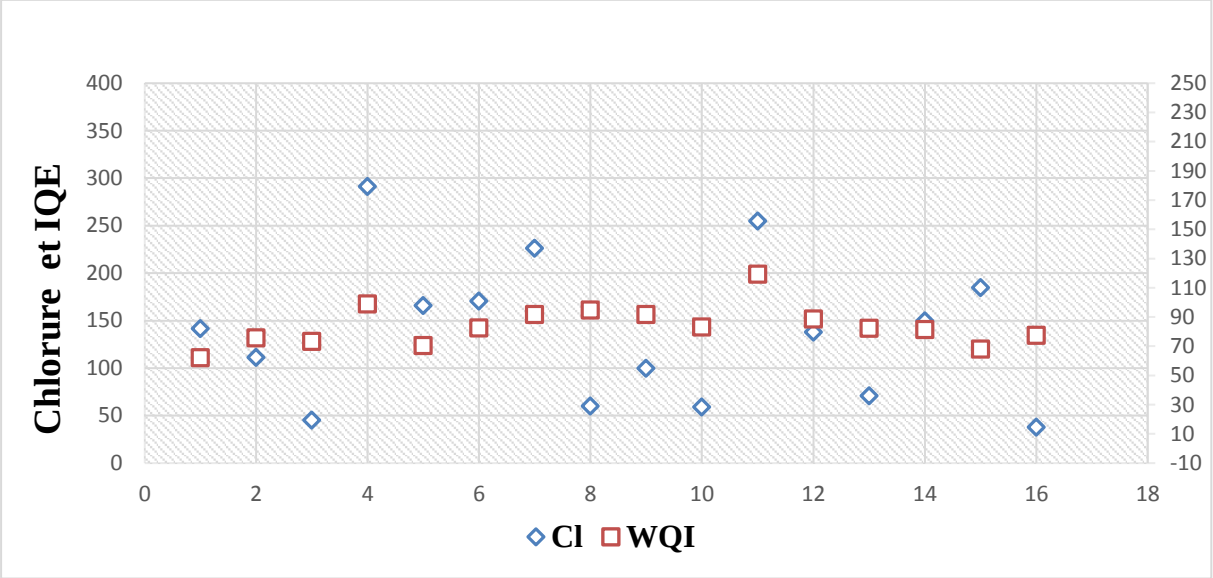


Figure 44. Variation de l'indice de la qualité d'eau avec la concentration de chlorure.

3.1.2. Influence des paramètres hydrochimiques sur l'indice (IQE)

Les rapports statistiques ont aidé à mesurer précisément l'impact des paramètres hydrochimiques sur l'indice de qualité de l'eau (water quality index).

Les diagrammes présentés dans les figures 45 à 49, indiquent qu'une meilleure corrélationde l'indice de qualité d'eau avec le sodium, calcium, sulfates et conductivité électrique.

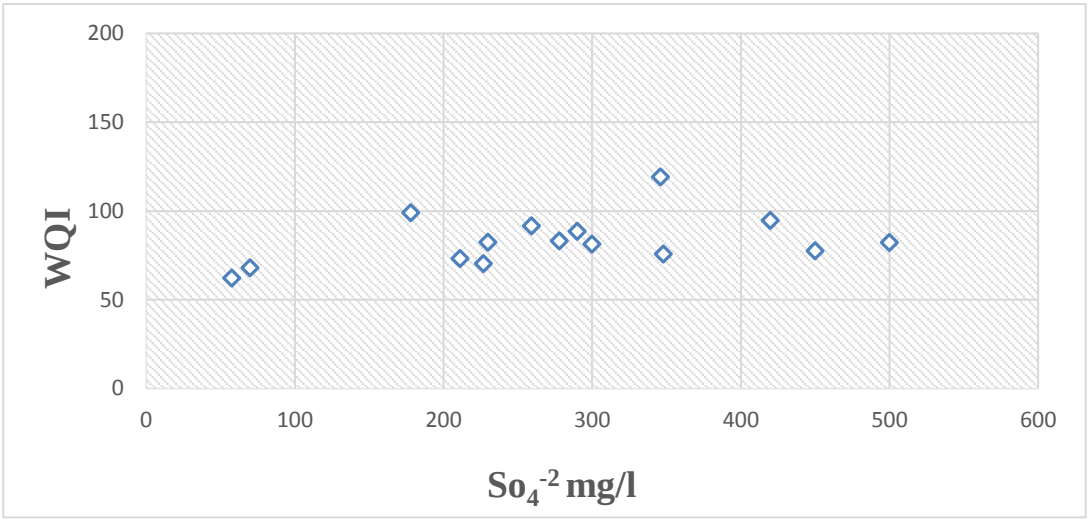


Figure 45. Diagramme d'effet entre WQI et sulfates**.**

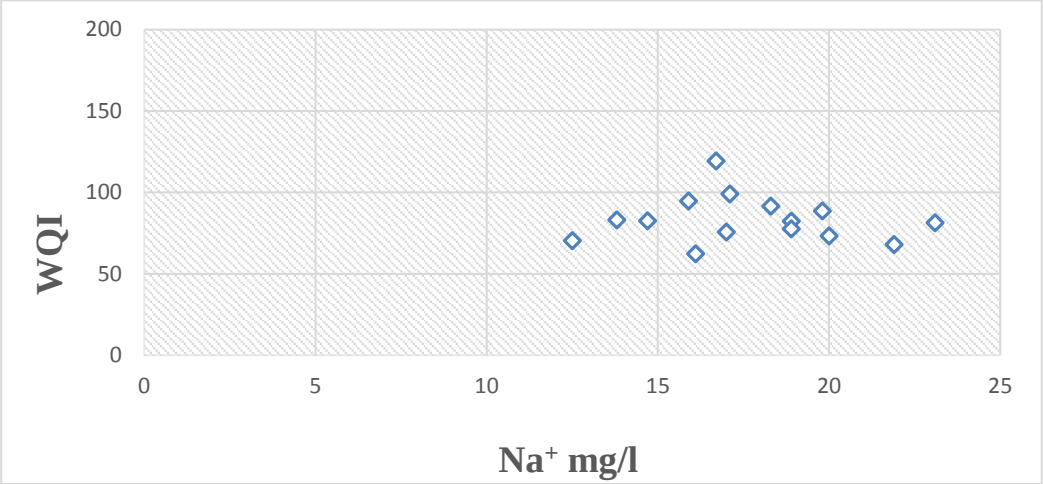


Figure 46. Diagramme d'effet entre WQI et sodium.

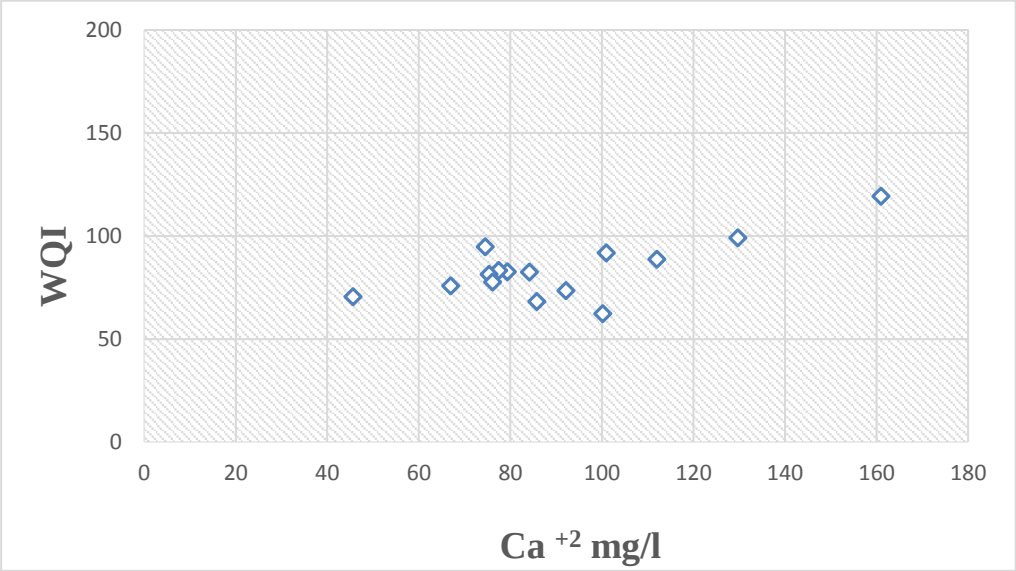


Figure 47 . Diagramme d'effet entre WQI et calcium.

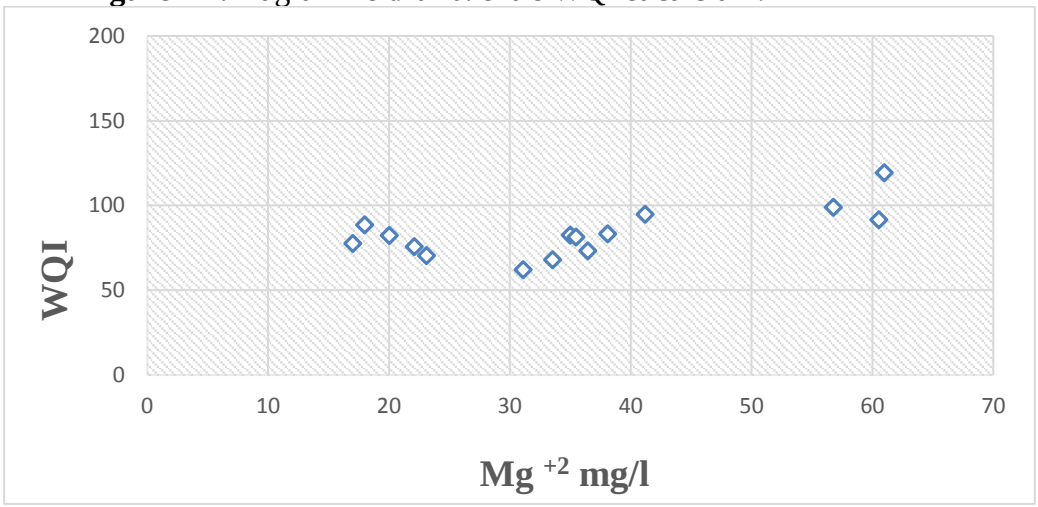


Figure 48. Diagramme d'effet entre WQI et magnésium.

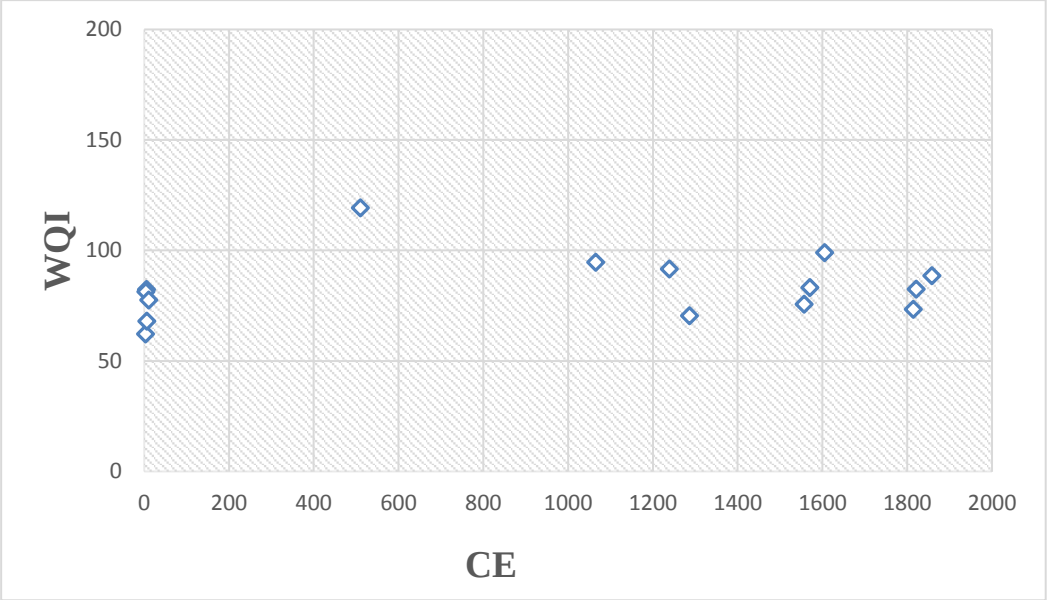


Figure 49. Diagramme d'effet entre WQI et conductivité électrique.

4. Représentation graphique des résultats

4.1. Détermination des faciès hydrochimiques

Les diagrammes de Piper et de Schoeller Berkaloff sont des outils essentiels pour étudier et exposer les propriétés chimiques des eaux souterraines permettant, ce qui permet évaluer de manière précise de leur qualité et de leur composition.

a. Diagramme de piper

Le diagramme de Piper est utilisés pour classer les eaux souterraines selon de leur composition chimique. En se référant aux concentrations relatives des éléments chimiques des eaux, il est possible de faciliter l'identification l'origine de ces ions. Le diagramme trilinéaire de Piper montre la relation ionique entre les paramètres hydrochimiques de la zone étude et leur répartition, en représentant les principaux cations et anions. L'étude des résultats du diagramme Piper des paramètres physicochimiques montre que les eaux souterraines du bassin versant de Tébessa-Morsott sont dominéespar les eaux chlorurées sulfatées calco-magnésienne. On remarquera deux facies principaux ; sulfaté calcique et chlorurés calcique dans la zone de Bekkaria et Tébessa. Par contre, dans la zone de Hammamet le faciès chimique est bicarbonaté calcique.

Le facies chloruré calcique, chloruré-magnésienne et sulfaté-calcique provient probablement de l'impact des évaporites de Dj Djebissa et par les phénomènes de lessivage des formations triasiques gypseuses.

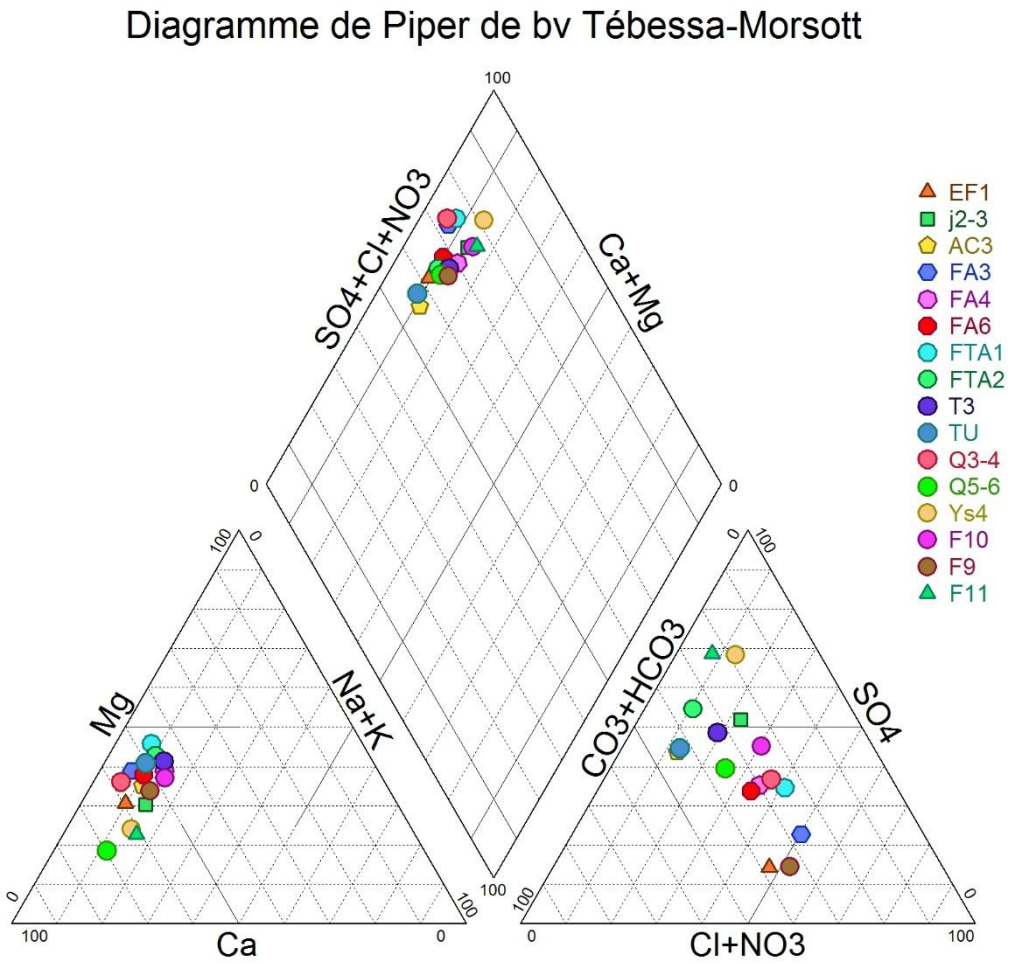


Figure 50. Facies chimique des eaux par le diagramme de piper.

b. Diagramme de Schoeller et Berkaloff

Les concentrations des paramètres (SO4, HCO3, Cl, Mg, Ça, Na et K) en (meq / l) ont été représentées par le diagramme semi- logarithmique pour la période de février 2020. Le diagramme de Schoeller dans figure 51 confirme le même résultat que le diagramme de piper, le faciès chimique dominant est le sulfaté calcique(SO_4, Ca) et chloruré calcique (Cl, Ca), ils témoignant de la présence de la minéralisation en raison lessivage des formations géologiques

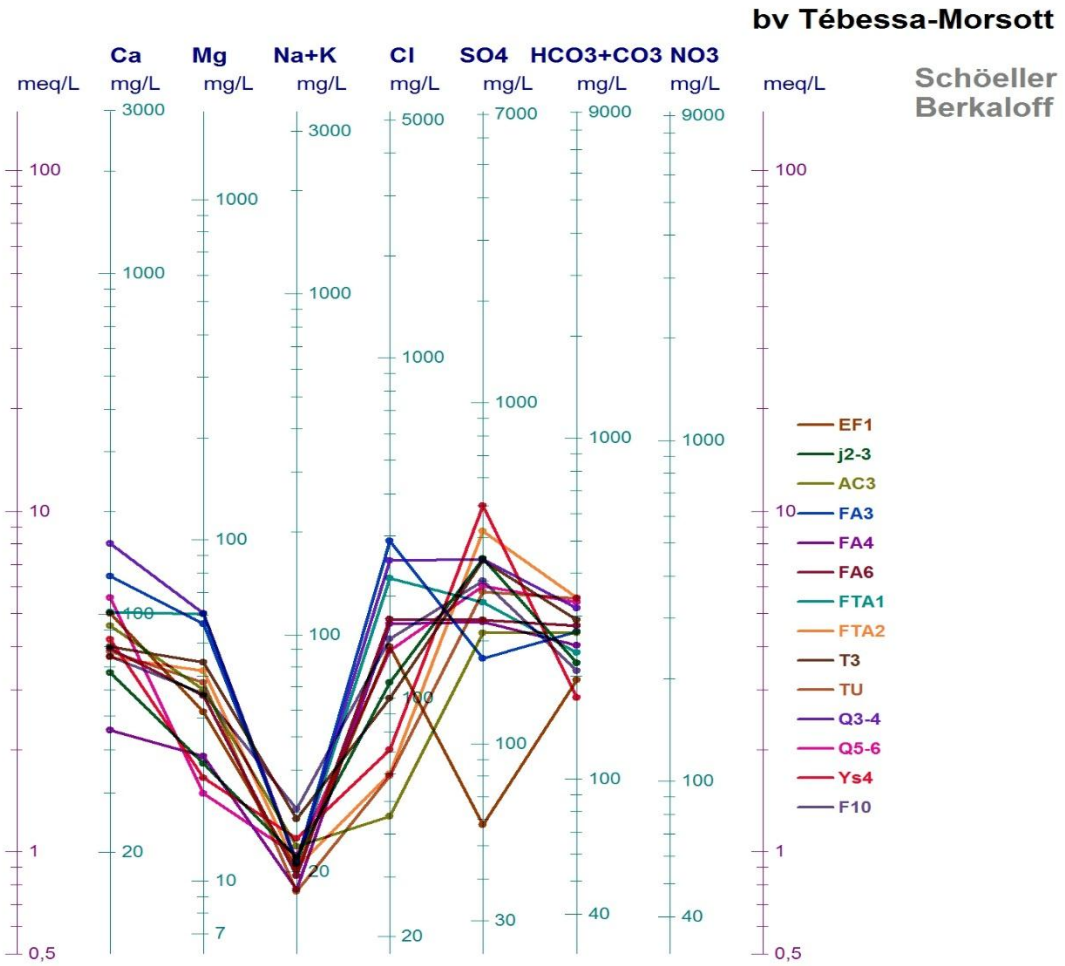


Figure 51. Diagramme de Schoeller Berkaloff de la plaine Tébessa-Morsott.

5. L'aptitude des eaux a l'irrigation

a. Diagramme de Wilcox

Le diagramme de Wilcox est un outil précieux en agriculture permettant de surveiller la salinité du sol et d'évaluer son impact sur les cultures ainsi que de gérer l'irrigation en fonction de ces niveaux. Il varie en fonction de la conductivité électrique (CE) ou la charge totale dissoute. L'indice d'adsorption du sodium (SAR) évalue le risque de la sodisation du sol causé par l'irrigation. Le diagramme est divisé en quatre classes : Excellente, bonne, admissible, mauvaise

Le diagramme de Wilcox révèle que 99% des eaux souterraines de nos plaine se classent Dans la catégorie‟ bonne" (figure 52)

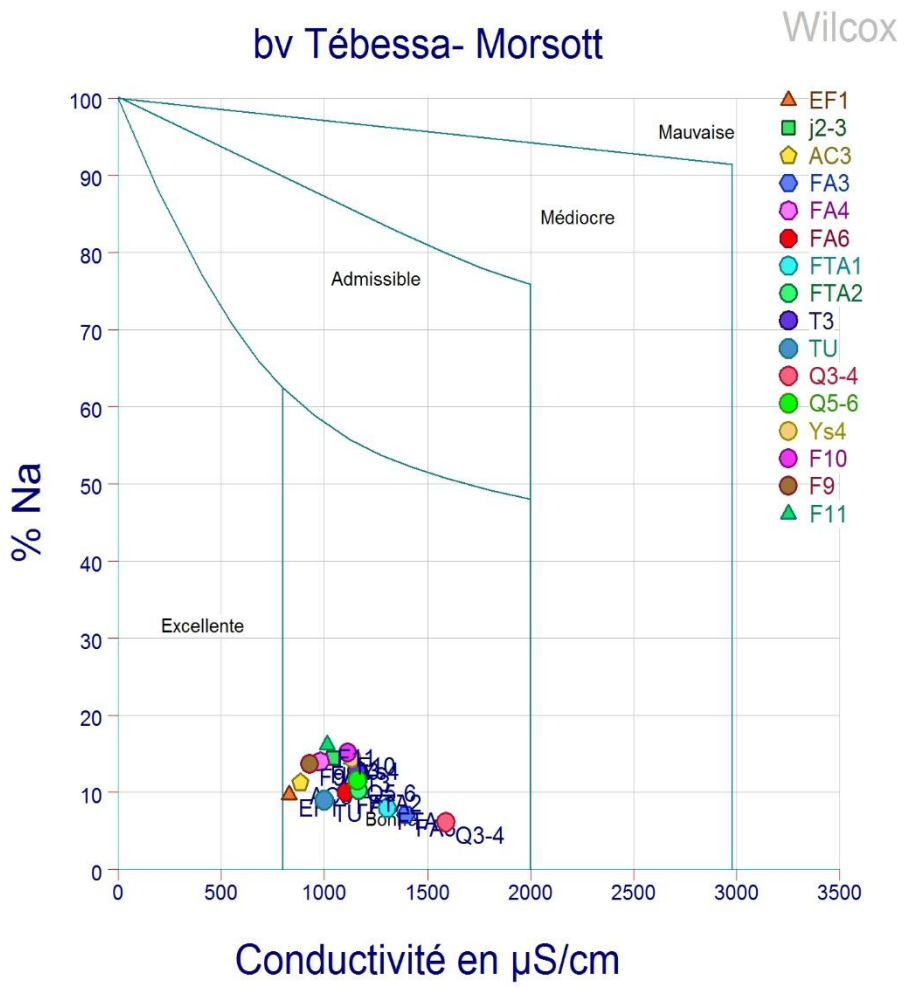


Figure 52. Diagramme de Wilcox de la plaine Tébessa- Morsott.

b. Diagramme de Richards

Le diagramme de Richards est un outil agrochimique qui montre le pourcentage d'eau retenue dans le sol en fonction de son humidité. Il contribue à la planification de l'irrigation, de la salinité et de la salinisation sodique des terrains. L'eau peut être classée en différentes catégories en fonction du taux d'adsorptiondu sodium (SAR) et concernant la teneur en eau, qui est représentée par la conductivité électrique en (µS/cm) à 25°C.

Suite d'étude du le diagramme de Richards des caractéristiques hydrochimiques de l'eau (Fig. 53) en fonction de sa conductivité électrique et de sa SAR, toutes les eaux examinées sont classées dans **la catégorie admissible (C3S1)**, ce qui se distingue par l'utilisation d'eau pour l'irrigation des cultures qui peuvent supporter le sel sur des sols bien drainés.

Il important d'utiliser de l'eau peu salée afin de prévenir les dégâts aux plantes. Idéalement, les eaux devraient être moyennement minéralisées, avec des risques de salinisation modéré et alcalinité faible.

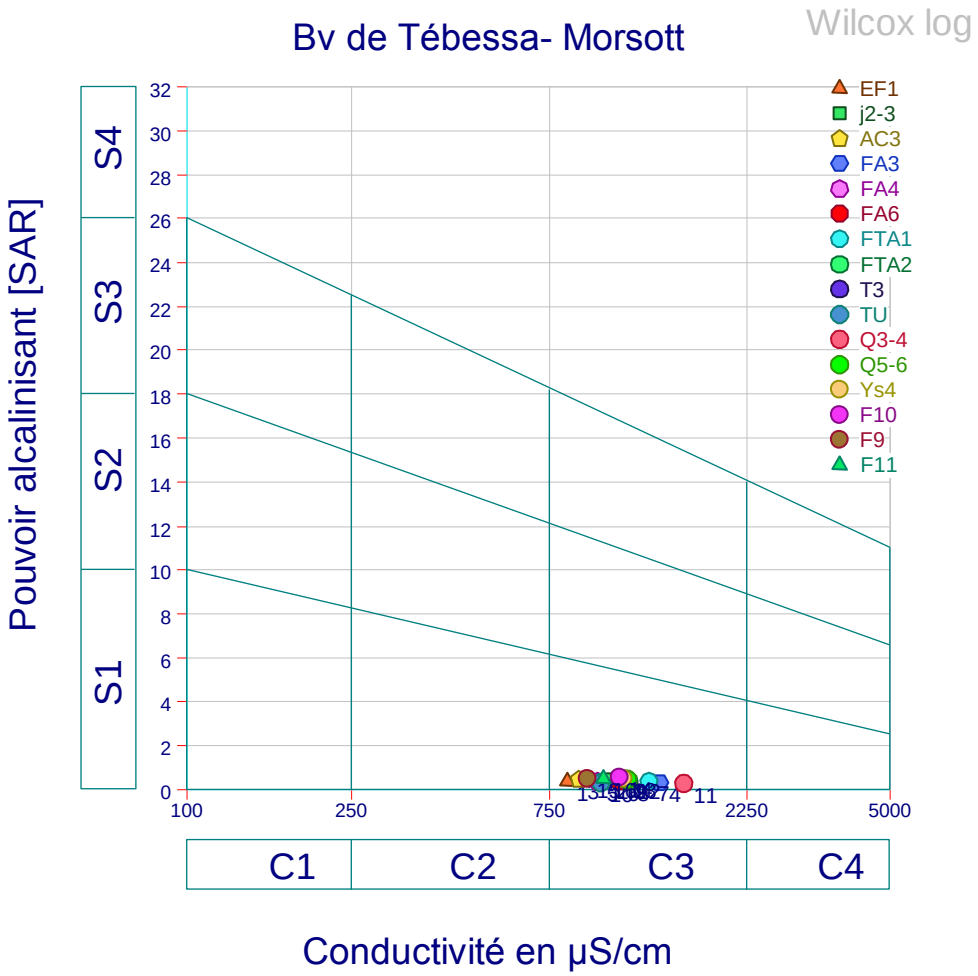


Figure 53. Diagramme de Wilcox de la plaine Tébessa- Morsott

c. Les indicateurs d'aptitude des eaux à l'irrigation

L'analyse des indicateurs d'aptitude des eaux à l'irrigation révèle que la valeur de SAR Inférieur à 10 situe ces eaux dans la classe excellente, indiquant une faible proportion de sodium susceptible d'affecter la structure du sol. Le Na % se positionne entre les classes bonne et excellente, traduisant une salinité modérée favorable à l'irrigation. L'indice de perméabilité oscille entre les classes admissible et non recommandée, ce qui suggère des variations de la capacité d'infiltration en fonction des échantillons. L'indice de risque magnésien (MH) ainsi que le Kelly's Ratio confirment tous deux l'aptitude des eaux à un usage agricole approprié.

Enfin, la salinité potentielle (PS) indique une répartition des échantillons entre les classes excellente, bonne et mauvaise, reflétant des conditions variables de contrainte saline à prendre en compte dans la gestion de l'irrigation.

Tab.19.les résultats du calcul des indicateurs d'aptitude des eaux à l'irrigation.

Les forages	SAR	Na%	PI	MH	KR	PS
EF1	1,99	14	20,4	23,69	0,12	4,30
J2-3	2,41	21	29,9	24,81	0,19	4,95
AC3	0,02	16	24,5	28,35	0,16	2,38
FA3	2,07	11	16,5	30,44	0,09	9,14
FA4	2,92	22	34,7	33,63	0,18	5,86
FA6	1,65	15	24,4	30,61	0,13	6,01
FTA1	1,64	12	18,7	37,47	0,11	7,73
FTA2	2,41	16	26,1	35,60	0,14	3,88
TU	2,09	14	24,9	32,98	0,12	3,11
Q3-4	1,31	9	14,5	27,48	0,08	8,99
Q5-6	2,07	15	25,3	13,85	0,15	5,40
Ys4	2,75	20	26,0	19,23	0,18	4,60
F10	2,54	23	28,0	32,02	0,21	5,79
F9	2,99	20	25,6	28,12	0,18	5,58
F11	3,21	23	29,4	18,26	0,20	3,41

d. L'indice de qualité de l'eau d'irrigation (IWQI)

L'indice de qualité d'eau d'irrigation (IWQI) a été déterminé à partir de plusieurs paramètres physico-chimiques des eaux souterraines, notamment la conductivité électrique, le sodium, SAR, les Chlorures et les bicarbonates. Le poids relatif Wi de chaque paramètre a été calculé selon la méthodologie décrite pour le calcul de WQI, et la valeur de qualité Qi a été déterminée conformément à l'équation présentée précédemment.

Le produit de Qi par le poids relatif a permis d'obtenir la valeur IQWI pour chaque échantillon. Les classes de l'indice sont présentées dans le tableau 16 et les résultats finaux dans le tableau 17, montrant une variation allant de la classe impropre à la classe très bonne.

Dans la région d'étude, les valeurs de l'indice varient entre 32,64 et 77,71, avec une moyenne de 59,67. Ainsi, 40 % des échantillons sont classés « très bons », 27% « bons », 13% « acceptables » et 20% appartiennent à la classe impropre. Ces résultats indiquent que, bien que la majorité des eaux souterraines de la région d'étude sont adaptées à l'irrigation, une proportion significative présente une qualité insuffisante.

Les valeurs élevées de L'IWQI correspondant à la classe bonne, se situent principalement à l'Est à l'Ouest et au Nord-Est de la zone d'étude, indiquant une meilleure qualité des eaux d'irrigation dans ces secteurs. Les valeurs faibles, classés impropre, sont localisées principalement à proximité de Bekkaria, en raison des formations triasiques présentes dans cette région. La carte de distribution spatiale d'indice de qualité de l'eau d'irrigation a été présentée dans la figure 54.

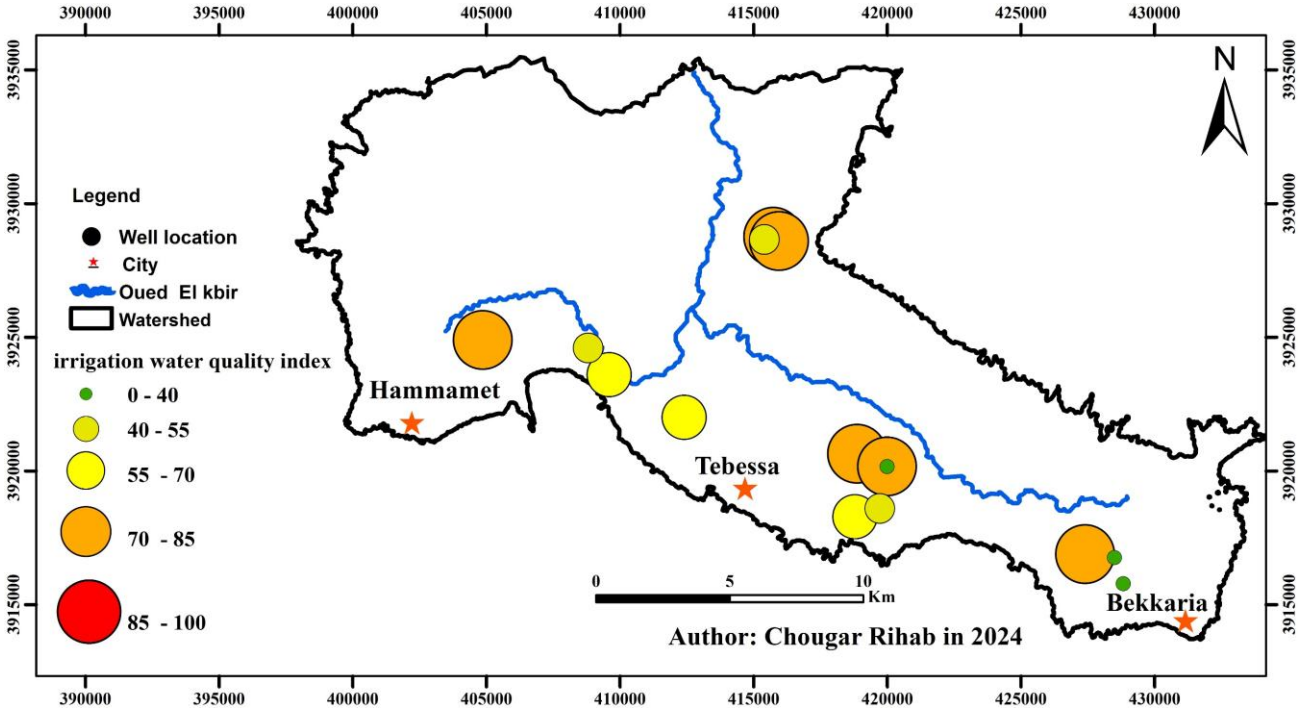


Figure 54. Distribution spatiale d'indice de la qualité de l'eau d'irrigation de la plaine de Tébessa-Morsott.

6. Indice d'échange de base (i.e.b)

La majorité des résultats d'indice d'échange de base d'eau du bassin versant de Tébessa sont positifs, indiquant la présence de diverses compositions chimiques de cette eau ainsi divers cations et anions. Cette diversité est en due à la présence de la formations sédimentaires couvrant toute la plaine de Tébessa-Morsott.

Tab.20. L'indice d'échange de base des eaux souterraines de la zone d'étude.

Les forages	IEB
EF1	0,97
J2-3	0,72
AC3	0,24
FA3	0,89
FA4	0,85
FA6	0,84
FTA1	0,86
FTA2	0,52
TU	0,58
Q3-4	0,88
Q5-6	0,76
Ys4	0,50
F10	0,71
F9	0,78
F11	0 ,06

L'indice d'échange de base de tous les échantillons d'eau dans la plaine de Merdja Est supérieur à 0, ce qui s'explique par la présence prédominante de Chlorure

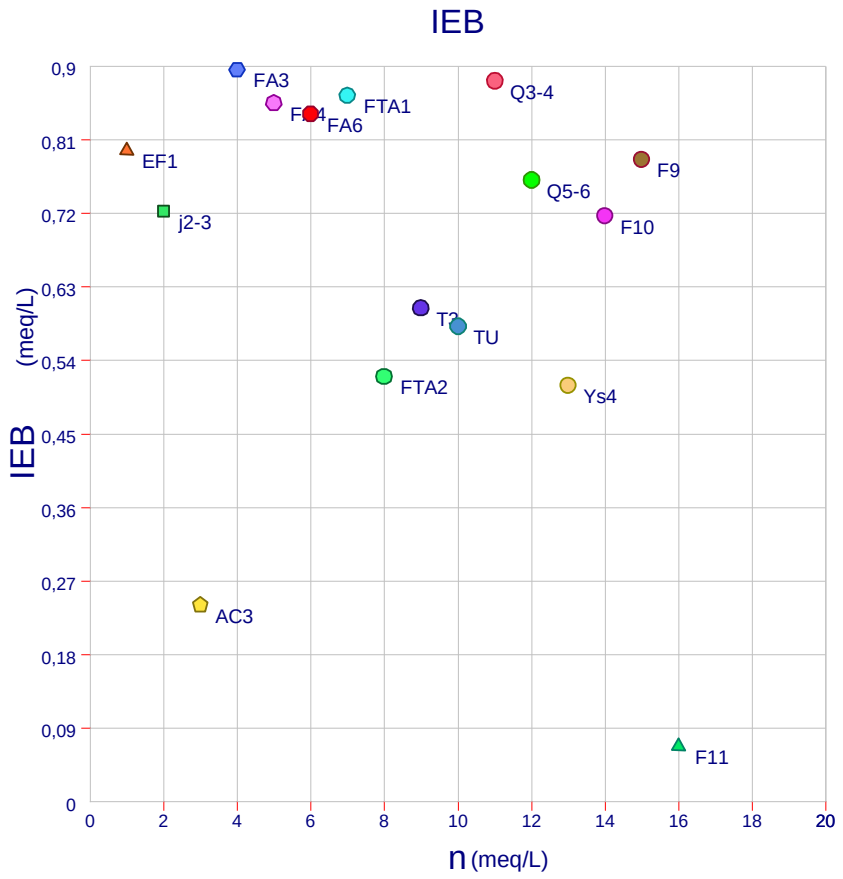


Figure 55. Variation de l'indice d'échange de base.

7. Indice de saturation

La condition des échantillons d'eau souterraine se manifeste par une saturation faible, avec un indice de saturation inférieur à 0 pour le gypse et anhydrite, tandis qu'ils sont en sur sursaturation pour la calcite, aragonite, avec un indice de saturation supérieur à 0. La dissolution du gypse et de l'anhydrite influence plus marquée sur la chimie de ces eaux que celle de la calcite, de l'aragonite et de la dolomite

Les degrés de saturation des minéraux carbonatés inférieurs dépassent 0. Sauf la valeur de calcite varie entre – 0.44 et 0.04, suivi de celle de l'aragonite quioscille entre - 0.69 et - 0.11 et enfin la dolomite a une valeur de -1.28 à -0.29. L'équilibre se situe dans l'intervalle de - 0.5 à + 0.5.

Les degrés de saturation des minéraux évaporitiques sont inférieurs à ceux des autres minéraux. L'indice de gypse varie de -1.58 à -0.84, tandis que l'indice de l'anhydrite l'indice varie - 1.82 à - 0

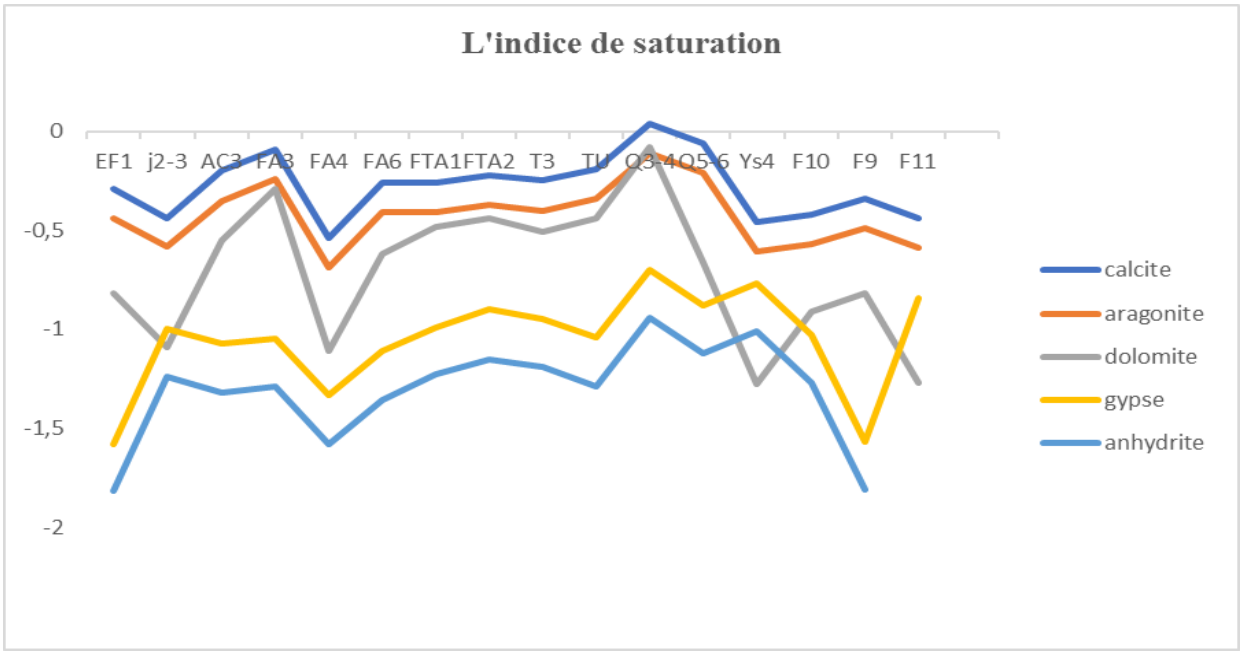


Figure 56 .la variation de l'indice de la saturation.

Tab.21. Indice de saturation de la région de Tébessa.

	Minéraux carbonatés			Minéraux évaporitique	
Les puits	**Calcite**	**Aragonite**	**Dolomite**	**Gypse**	**Anhydrite**
EF1	-0 ,29	-0,44	-0,82	-1,58	-1,82
J2-3	-0 ,44	-0,58	-1,09	-1	-1,24
AC3	-0,20	-0,35	-0,55	-1,07	-1,32
F9	-0,34	-0,49	-0,82	-1,57	-1,81
FA3	-0,09	-0,24	-0,29	-1,05	-1,29
FA4	-0,54	-0,69	-1,11	-1,33	-1,58
FA6	-0,26	-0,41	-0,62	-1,11	-1,36
FTA1	-0,26	-0,41	-0,48	-0,99	-1,23
FTA2	-0,22	-0,37	-0,44	-0,9	-1,15
T3	-0,25	-0,40	-0,51	-0,95	-1,19
TU	-0,19	-0,34	-0,44	-1,04	-1,29
Q3-4	0,04	-0,11	-0,08	-0,70	-0,94
Q5-6	-0,06	-0,21	-0,66	-0,88	-1,12
Ys4	-0,46	-0,61	-1,28	-0,77	-1,01
F10	-0,42	-0,57	-0,91	-1,03	-1,27
F11	-0,44	-0,59	-1,27	-0,84	-1,09

8. Origines des éléments chimiques

8.1. Origine du calcium

Le diagramme de l'évolution du calcium en fonction des bicarbonates illustre que le calcium provient de la plaine de Tébessa-Morsott en raison de la présence formations carbonatées qui bordent l'aquifère et les formations triasiques de djebel Djebissa. L'analyse révèle que parmi 16 échantillons, 5 ont une origine carbonatée.

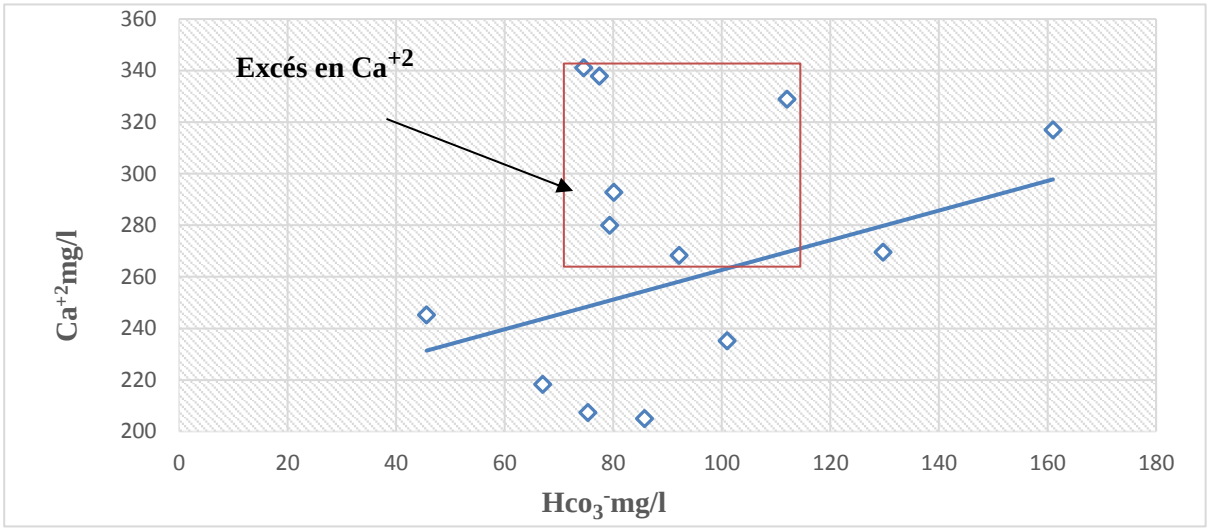


Figure 57. Ca vs HCO3- dans la plaine de Tébessa-Morsott**.**

8.2. Origine du chlorure et du sodium

L'interprétation du graphique d'évolution du sodium en fonction du chlorure figure 58 montré que la dissolution des formations Triasiques près de Bekkaria est responsable de la présence de chlorure et de sodium. Le diagramme indique également une source supplémentaire de sodium due au phénomène d'échange de base. Il s'agit de l'interaction de l'eau avec l'argile. En favorisant l'adsorption des ions calcium après la libération des ions sodium.

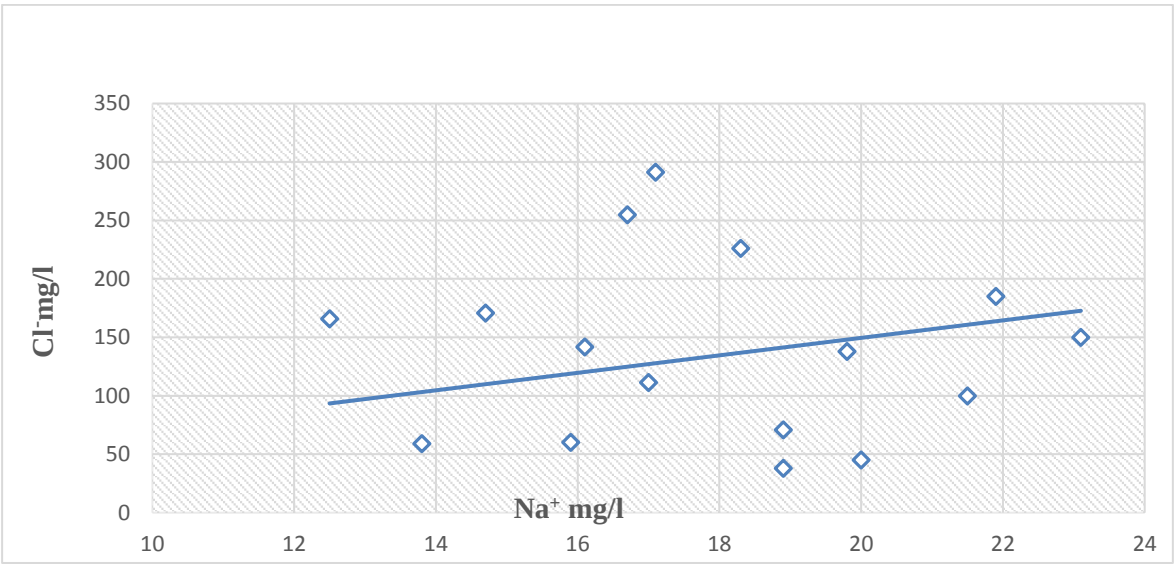


Figure 58. Na vs Cl dans la plaine Tébessa-Morsott.

Le degré de salinité augmente en raison de la présence des formations d'évaporitiques, de la dissolution de l'halite dans les formations carbonatées et du phénomène d'échange de bases, comme le montre le diagramme précédent.

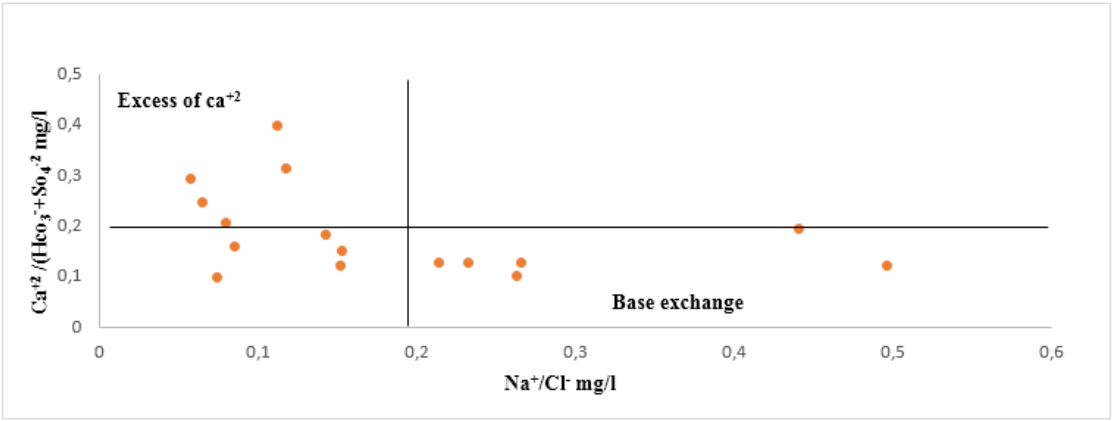


Figure 59. L'échange de base de la plaine de Tébessa-Morsott.

8.3. Origine des éléments $HCO3^-$, $SO4^{-2}$ et Cl^-

En examinant le diagramme A, qui illustre la variation des anions en fonction de la conductivité, on constate que :

En règle générale, une concentration croissante des anions est associée à une augmentation de la conductivité électrique des eaux souterraines. Le graphique de la relation $HCO3^-$/ (Cl^- +$SO4^{2-}$) permettent d'examiner les éléments qui influencent la variation de sa conductivité électrique, ces ions jouant un rôle essentiel dans ce phénomène. Le diagramme identifie deux pôles carbonaté et évaporitiques, ce dernier ayant une forte concentration

En ions chlorure et sulfates. Ce pôle, caractérisé par une conductivité élevée, supérieures à 1200 µS/cm, regroupe plus de 50% des points d'eau sur le diagramme. Les zones distantes des formations des évaporites du Trias montrent des valeurs de la conductivité inférieures à 1200 µS/cm, principalement en raison de la présence des formations carbonatées. En revanche, lorsque la conductivité dépasse1200 µS/cm elle est principalement due à une forte concentration d'ions évaporitiques.

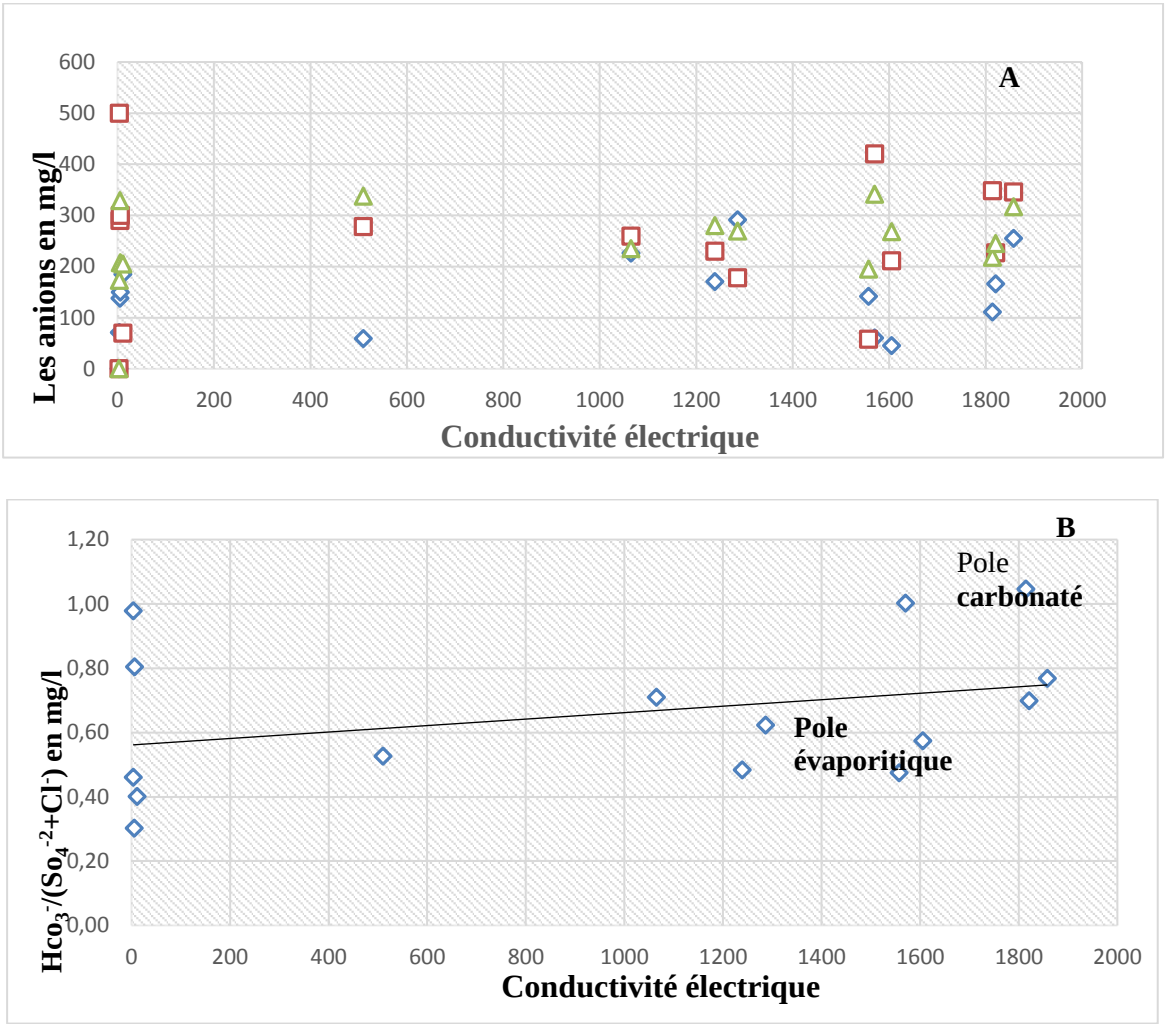


Figure 60. (A, B). Evolution des anions en fonction de la conductivité électrique.

9. Analyse en Composante Principale (ACP)

La technique de l'analyse en composantes principales a été employée afin d'analyser les échantillons issus des eaux souterraines de la plaine de Merdja (forage d'eau). 10 variables physico-chimiques ont été examinées dans les données brutes (CE, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}, Cl^{-}, SO_4^{2-}, HCO_3^{-}

, pH, TC◦) lors de cette analyse. Et pour traiter 16 individus, nous avons sélectionné 10 axes (Tableau.22) ou elle est représentée en pourcentage % dans Tableau.23. La variation des paramètres physicochimiques des eaux se classe en deux catégories principales .la première catégorie regroupe les paramètres de salinité (Cl, TDS, minéralité), Un deuxième groupe de paramètres présente une variabilité moyenne.

Au départ, il est nécessaire de réaliser une corrélation afin d'évaluer les relations entre les différentes variables. Les coefficients de corrélation évaluent la force et la nature des relations entre les variables, fournissant des informations sur leur interdépendance dans les données analysées.

Tab .22. Résultat de l'analyse de la matrice de corrélation des paramètres de la qualité de l'eau souterraine.

	Ca^{+2}	Mg^{+2}	$Na^{+}+k^{+}$	SO_4^{-2}	Cl^{-}	HCO_3^{-}	TC°	TDS	pH	CE
Ca^{+2}	1									
Mg^{+2}	**0,632**	1								
$Na^{+}+K^{+}$	-0,008	**-0,189**	1							
SO_4^{-2}	**0,587**	**0,655**	-0,089	1						
Cl^{-}	-0,115	-0,227	0,1	-0,446	1					
HCO_3^{-}	0,302	0,335	-0,544	0,049	0,064	1				
TC°	-0,206	0,197	-0,394	0,092	-0,436	0,064	1			
TDS	-0,090	-0,090	0,165	-0,012	-0,145	-0,264	-0,067	1		
pH	0,084	-0,451	0,036	-0,033	0,213	0,210	-0,475	-0,355	1	
CE	-0,004	0,141	-0,606	0,066	-0,099	**0 ,643**	0,437	-0,103	-0,008	1

Après avoir réalisé une analyse en composantes principales ACP (Tableau. 23), il apparait que la variable CE est fortement corrélée positivement avec la $HCO3^{-}$,avec un coefficient de 0.64. Cela indique l'impact de de ces éléments sur la charge carbonatée des eaux souterraines dans la région. Les éléments carbonatés calcium et magnésium sont fortement corrélées positivement entre eux, avec une valeur 0,63. La corrélation entre les chlorures et magnésium et calcium est forte, avec un (R = 0,65) et (R = 0,58). Ces liens peuvent suggérer une augmentation de la salinité des eaux souterraines.

9.1. Analyse de l'espace des variables

Les variables sont projetées sur le plan factoriel F1-F2, ce qui l'axe F1 représente 29.28 % de la variance et est déterminé par (CE, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}, Cl^{-}, SO_4^{2-}, HCO_3^{-}, pH, TC◦). Il distingue ainsi les eaux minéralisées aux eaux peu chargées. L'expression de variance du facteur F2 vertical est de 20.65%. Les axes F1 et F2 sont responsables de la détermination du cercle ACP, ce qui représente 49,92 % de la variance globale (Fig.62) et il a été confirmé de manière positive par (CE, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Cl^{-}, HCO_3^{-}) et en termes négatifs par $SO4^{2-}$ et TDS. Finalement, l'utilisation d'analyses multivariées a permis d'évaluer l'impact des processus géologiques sur l'eaux souterraines tels que les minéraux carbonatés, dolomitiques, évaporitiques et salifères dans l'aquifère.

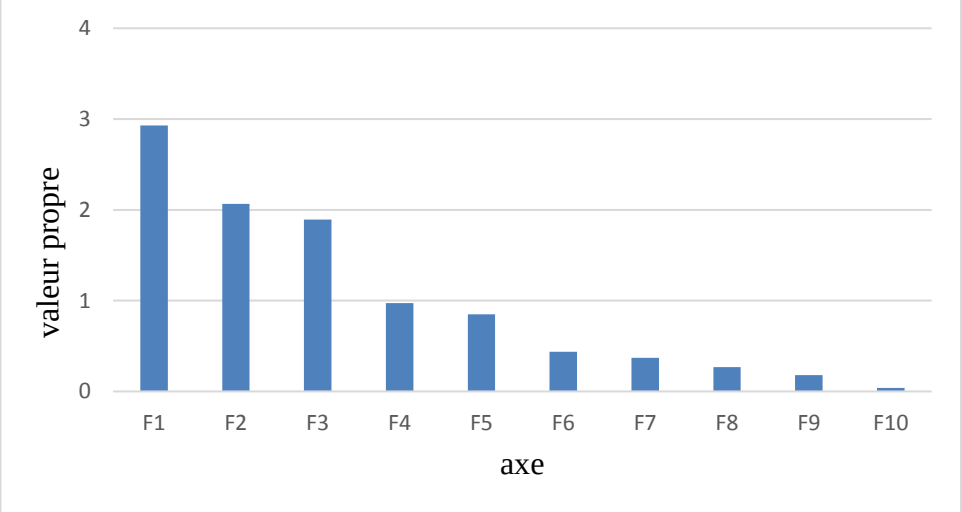


Figure 61. Indices Histogramme des valeurs propres de la zone étude.

Tab .23. Différents variables et axes (bassin versant de Tébessa- Morsott).

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
Valeur propre	2,928	2,065	1,894	0,972	0,848	0,436	0,370	0,269	0,180	0,038
%variance	29,278	20,646	18,942	9,724	8,478	4,355	3,703	2,687	1,804	0,382
%cumulé	29,278	49,924	68,866	78,590	87,068	91,423	95,127	97,814	99,618	100

Tab. 24. Corrélations entre les variables et les facteurs (Tébessa-Morsott).

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
Ca^{+2}	0,503	-0,387	-0,648	0,113	0,060	0,077	-0,069	0,379	-0,077	-0,018
Mg^{+2}	0,766	-0,431	-0,194	0,280	-0,262	0,020	-0,026	-0,156	0,051	0,127
$Na^{+}+K^{+}$	-0,624	-0,526	-0,172	-0,033	-0,095	0,494	0,213	-0,052	0,043	-0,010
Cl^{-}	0,611	-0,543	-0,288	-0,264	0,119	-0,228	0,289	-0,142	0,060	-0,078
SO_4^{-2}	-0,437	0,401	-0,348	0,561	-0,287	-0,185	0,284	0,075	0,095	-0,013
HCO_3^{-}	0,619	0,553	-0,310	0,233	0,133	0,248	-0,173	-0,131	0,186	-0,076
TC°	0,512	0,081	0,709	-0,222	-0,241	0,075	0,116	0,227	0,225	0,005
TDS	-0,173	-0,404	0,387	0,427	0,676	-0,039	0,031	0,045	0,117	0,025
Ph	-0,257	0,435	-0,647	-0,454	0,290	-0,022	0,065	0,042	0,148	0,090
CE	0,628	0,576	0,191	0,065	0,232	0,172	0,327	-0,001	-0,207	0,031

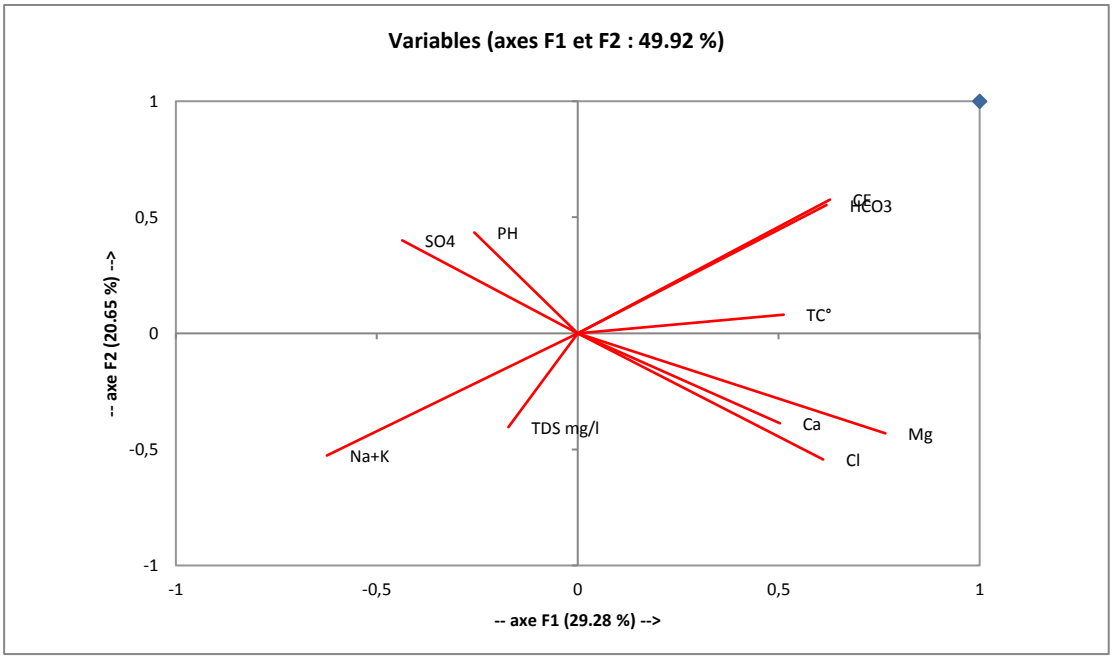
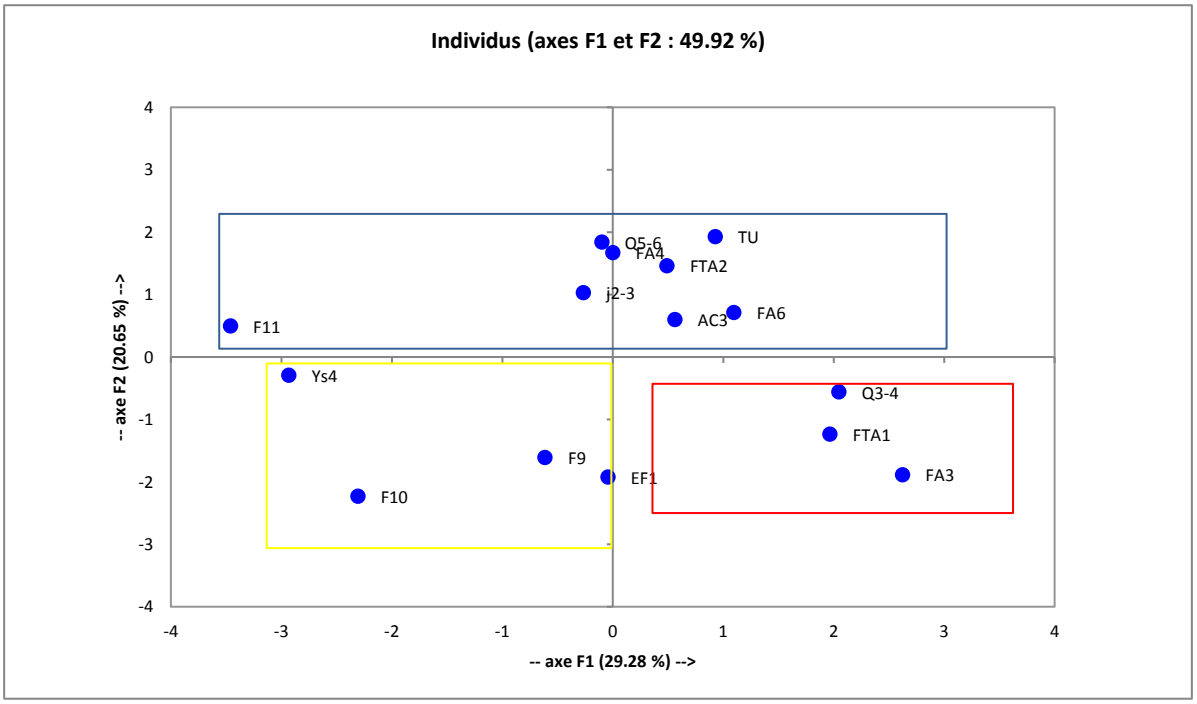


Figure 62. Espace des variables de l'ACP globale.

9.2. Analyse de l'espace des individus

Nous pouvons identifier des individus trois groupes en projetant les individus sur le plan (1-2) cela nous amène à identifier trois catégories : Le premier groupe (TU, j2-3, AC3, FA3, FTA2, Q5-6, FA4) se caractérise par des niveaux élevés desconductivités électrique, sulfate et bicarbonate.

La concentration de calcium, magnésien, chlorure, sont élevées dans le deuxième groupe (Q3-4, FTA1, FA3, EF1). La présence de sodium dans les forages (F9,Ys4, F10) caractéristique du troisième groupe. Donc, La géologie locale entraine une modification des caractéristiques chimiques des eaux en raison du lessivage des roches encaissantes.



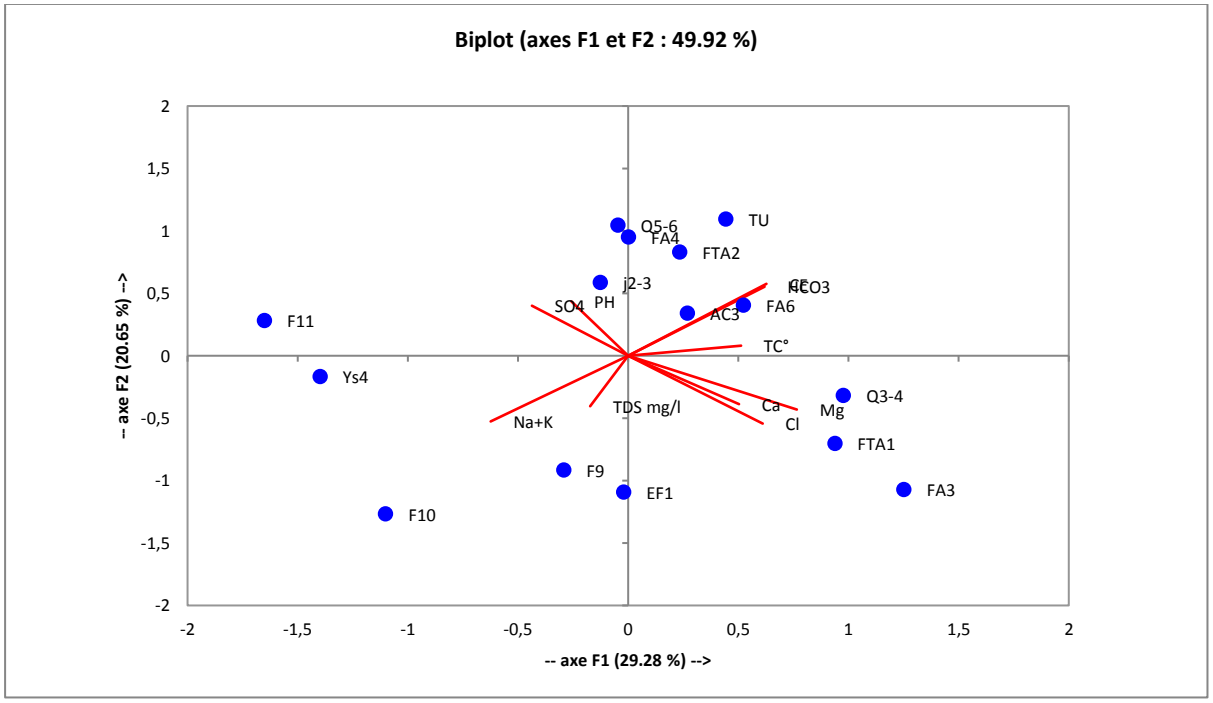


Figure 63. Projection des individus sur le plan factoriel (1-2).

10. Exploration de la nappe superficielle par les puits domestiques

L'analyse de la qualité des eaux de la nappe profonde a bien montré met en évidence sa protection contre la pollution en raison sa profondeur et capacités épuratrices du sol.

Cette situation nous a incité à donc à analyser la nappe superficielle à l'aide des puits domestiques, en se focalisant uniquement sur la conductivité électrique en raison de son rôle crucial dans l'évaluation de la minéralisation totale.

Tab. 25. Les puits domestique (bassin versant de Tébessa- Morsott).

Les puits	X	Y	CE
P1	418313,63	3922740,2	700
P2	416906,25	3922676	3114
P3	416804,93	3922426	3628
P3-bir	416804,93	3923378	3210
P4	416337,04	3923210,5	2572
P5	415219,39	3925551	3642
P6	414010,05	39265527	2478
P7	413633,7	3928703	2130
P8	429995	3914643	3140
P9	431642	3917641	1020
P10	431697	3917810	3716
P11	433577,27	3918599	1001
P12	431367	3917801	750
P13	431198,31	3917911,5	1100
P14	429835,08	3918415	2220
P15	430393,23	3917265	3716
P16	429862,81	3915990,1	700
P17	429986,19	3915761	3114
P18	426989,31	3915824	3628
P19	427318,1	3916035	3210
P20	423864,58	3916800	2572
P21	409205,09	3922630	3642
P22	408671,55	3922630	2478
P23	409205,09	3924716	2130
P24	408671,55	3924662	3140
P25	404436,83	3926683	1020

10.1. Conductivité électrique CE

Le bassin versant de Tébessa-Morsott présente une conductivité électrique allant de 700 à 3716 µ S/cm,avec une moyenne de 2294,73 µ S/cm. Une grande majorité des valeurs de conductivité électrique plus élevées que la norme Algérienne pour l'eau potable 2011 (1500 µ S/cm). On observe des valeurs de la conductivité supérieures à 1500 µ S / cm au Sud et à l'Est de la zone étude. Du fait de l'exposition aux formations triasique gypseuses aux évaporites. Les valeurs élevées de conductivité électrique révèlent une pollution des eaux de la nappe superficielle, qui peut être attribuée à des causes géologiques ou des activités humaines.

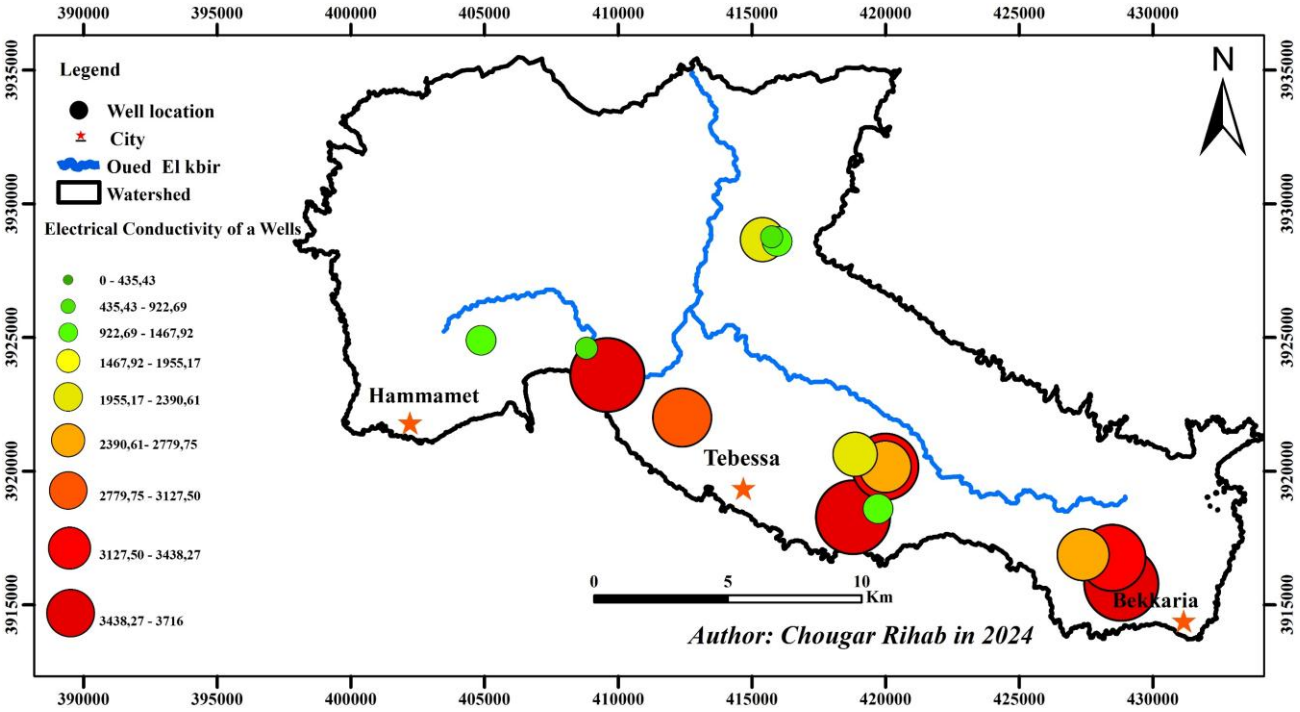


Figure 64. Distribution spatiale de la conductivité électrique des puits dans la plaine de Tébessa-Morsott.

11. Synthèse de la vulnérabilité à la pollution des eaux par la méthode DRASTIC

Différentes techniques sont employées pour évaluer la sensibilité des eaux souterraines à la pollution, avec différents buts, tels que la gestion des anthropiques et des polluants, parmi ces techniques, il y a la méthode DRASTIC.

Cette approche consiste à évaluer la vulnérabilité des nappes phréatiques à la pollution. La méthode DRASTIC analyse la profondeur de la nappe, la recharge nette, les matériaux du sol, la topographie et la conductivité hydraulique de l'aquifère. Elle permet d'identifier les

risques de contamination et de proposer mesures préventives.

Dans cette section, nous avons synthétisé les études de vulnérabilité développée par divers auteurs.

D'après les études DRASTIC de (**Derias T, 2014. Bouchagoura F, 2019et Djebassi T, 2021.**), il est apparu que la vulnérabilité à pollution des eaux dans le bassin versant de Tébessa-Morsott est principalement due aux activités humaines et aux les formations géologiques.

La carte de vulnérabilité indique que les niveaux de vulnérabilité de la nappe de la plaine de Tébessa varient de très faible à élevé .

Plusieurs auteurs experts ont effectué la mesure de l'indice DRASTIC dans nos plaines, ce qui permis de créer plusieurs cartes de vulnérabilité, montrant quatre classes distinctes de niveau vulnérabilité :

- Au centre de la plaine et le long de l'Oued Chabro-Ksob, se trouve une zone se vulnérabilité très faible à faible qui est impactée par les activités agricoles et les rejets urbaine. Les zones urbaines en bordures telles Tébessa, Hammamet, Ain Chabro et Morsott présentent une vulnérabilité moyenne à forte (**Derias T,2014)**.

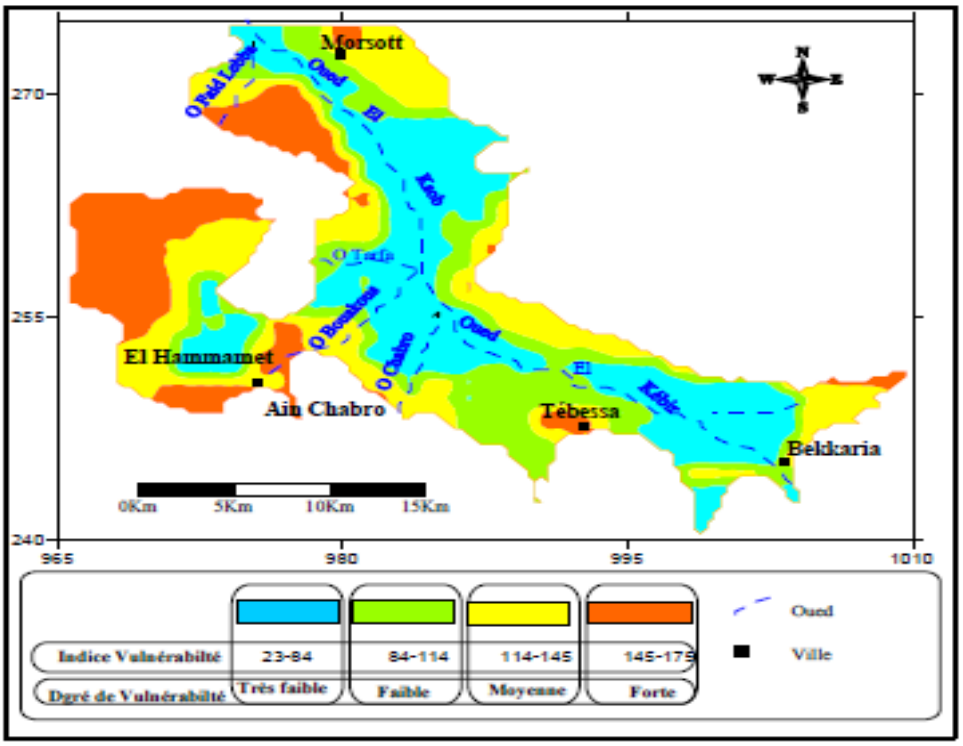


Figure 65. Carte de vulnérabilité à la pollution de la nappe aquifère Tébessa-Morsott (Application de la méthode DRASTIC) **(Drias T, 2014)**

- La vulnérabilité de la plaine alluviale de Tébessa est généralement moyenne, avec une forte intensité près ville de Tébessa. Puisque ses zonessont généralement caractérisées par une activité agricole, l'emploi des fertilisants doit être contrôlé et rationnel **(Bouchagoura ,2019).**

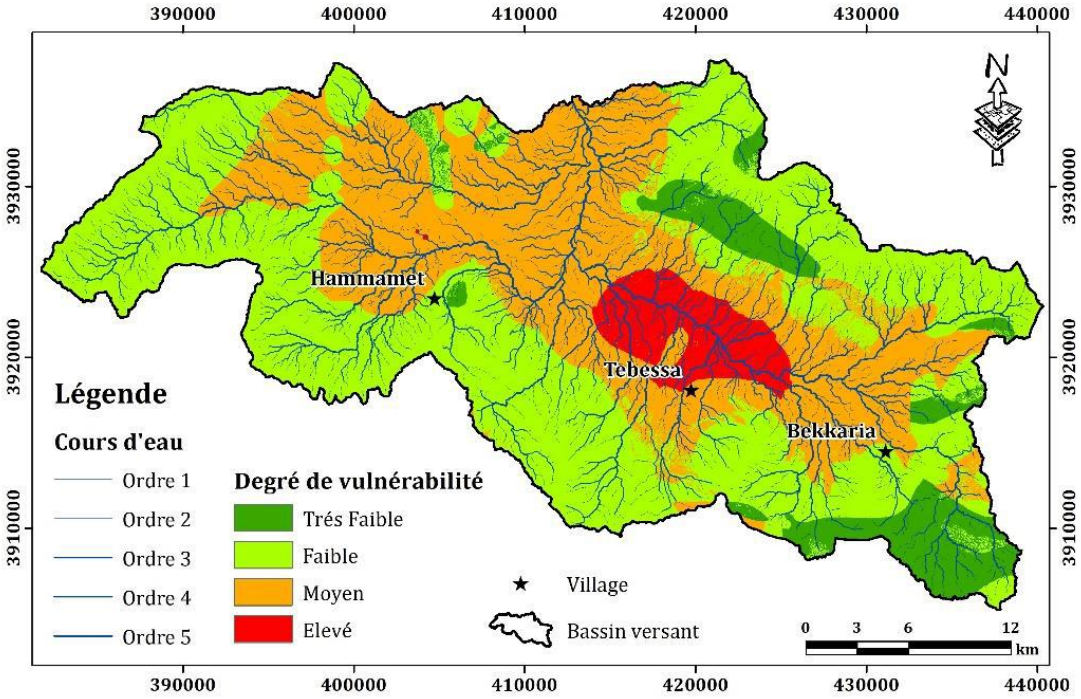


Figure 66. Carte du degré de vulnérabilité dans le bassin versant de Tébessa.

(Bouchagoura, 2019).

- Le centre et principalement le secteur Nord- Ouest de la plaine et le chef-lieu de la wilaya, présentent une vulnérabilité élevée à très élevée. Le Sud-Est de la zone de Bekkaria, se caractérise par faible à modérée vulnérabilité (**Djebassi T 2021).**

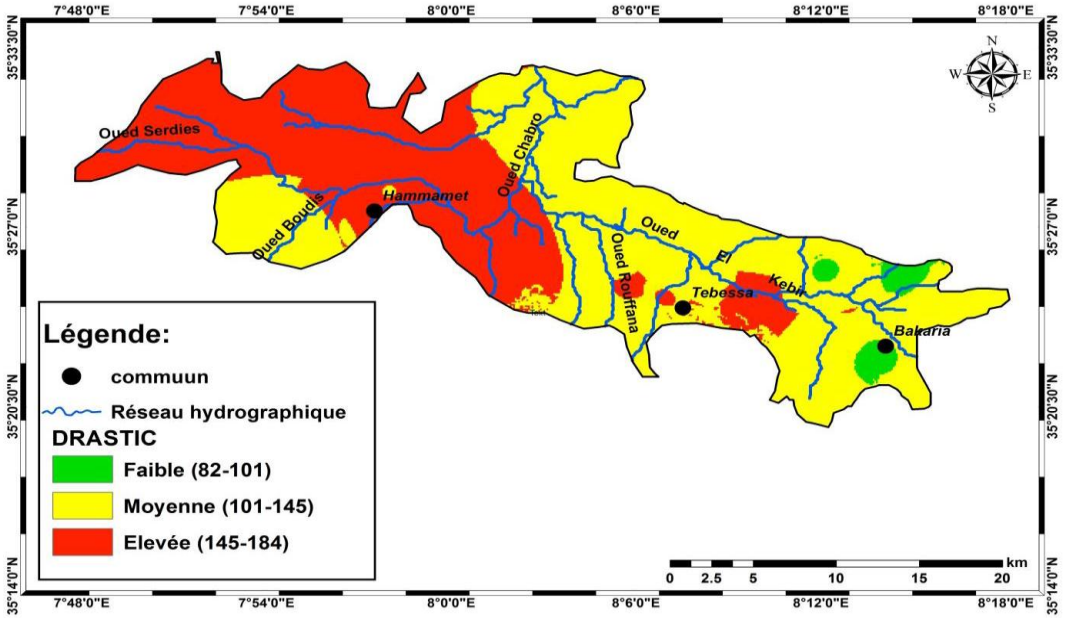


Figure 67. Carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la région de Tébessa selon la méthode DRASTIC. (**Djebassi, 2021)**.

Le jumelage des cartes de vulnérabilité à la pollution par la méthode DRASTIC établies par différents chercheurs, indiquent que les eaux de la nappe superficielle de nos plaines sont globalement vulnérables à la pollution.

12. Conclusion

L'étude hydrochimique a pour but d'identifier différents facteurs qui affectent la qualité des eaux souterraines tels que la diversité des formations géologiques, le climat, Les activités humains (industriels, l'utilisation excessive des engrais chimiques).

Les résultats des analyses physicochimiques des eaux souterraine de la plaine de Merdja révèlent une détérioration de leur qualité. Les analyses révèlent un pH alcalin et conductivité électrique moyenne allant de 3.32 à 1858µS/cm, indiquant une minéralisation modérée. Ces eaux qui ont une charge chimique faible, répondent aux normes algériennes en matière d'eau potables.

- D'après les résultats des diagrammes de piper et de Schoeller des caractéristiques del'eau Na+, SO_4^{2-} et Mg^{+2} Cl^-, K^+, Ca^{2+}, HCO_3^-, de plaine de Tébessa-Morsott montrent que la présence de deux facies dominants, à savoir le sulfaté calcique et le chloruré- calcique, varie en fonction de la lithologie de l'aquifère et des conditions d'alimentation.

- La classification de RICHARDS, qui repose sur la corrélation entre le taux d'adsorption %du sodium et la conductivité électrique, considère que les eaux souterraines de la région de Tébessa- Morsott sont dans la classe admissibles, avec une salinité élevée et une alcalinité modérée.
- Selon la classification de Wilcox basée sur la conductivité électrique et la présence sodium dans l'eau, il est prouvé que la plupart les eaux souterraines présentent une qualité bonne.

- L'indice de la qualité de l'eau révèle que 80% des échantillons des eaux souterraines sont de bonne qualité et peuvent être consommés directement, tandis que, 10% sont jugés médiocre à mauvaise.
- L'ensemble des indicateurs d'aptitude à l'irrigation montre que les eaux étudiées présentent globalement une bonne qualité, caractérisée par un SAR excellent, un Na % Favorable, ainsi que des valeurs de MH et KR appropriées. Toutefois, les indices PI et PS révèlent des variations allant de conditions excellentes à mauvaises, soulignant la nécessité d'une gestion raisonnée de l'irrigation.
- L'évaluation de l'IWQI a mis en évidence une variabilité de la qualité des eaux souterraines ; des valeurs élevées (eaux de très bonne et bonne qualité pour l'irrigation) ont été observées à l'Est, à l'Ouest, au Sud et Nord-Est, tandis que des valeurs faibles (eaux impropres à l'irrigation) apparaissent près de Bekkaria sous l'influence des formations triasiques.
- L'analyse en composante principale indique que les formations géologiques locale telles que formations carbonatées et évaporitiques, influencent sur les eaux souterraines.

- L'application de la méthode DRASTIC aux puits domestiques a permis d'évaluer la vulnérabilité de la nappe superficielle à la pollution. En considèrent que la nappe profonde est protégée. Cependant, la carte de conductivité électrique a révélé une forte minéralisation due à la même cause de pollution, soit par l'activité anthropique ou en raison des caractéristiques géochimiques.

Conclusion générale

La cartographie des cartes de vulnérabilités permet de comprendre les degrés de la salinité des eaux souterraines et de détecter la présence éventuelle de pollution. L'évaluation du développement hydrogéologique et les changements hydrochimiques jouent un rôle essentiel dans la préservation et la gestion des eaux souterraines.

Le niveau de la minéralisation des eaux dans la zone d'étude varie en fonction des caractéristiques géologiques, climatiques, hydrogéologiques et de la détection des activités humaines.

La région de Tébessa est située près frontière Tunisienne (Nord-Est Algérie),il s'agit d'un fossé d'effondrement présentant une structure synclinale. Elle est née du grand mouvement tectonique du Villafranchien et du Pléistocène. Leur lithologieest dominée par des formations triasiques gypsifères qui entourant l'aquifère à l'Est de Dj Djebissa, ainsi que les calcaires Turoniens, Maestrichtiens etCampaniens qui forment les reliefs en bordures Nord Est et Sud de la plaine. Le bassin versant est exposé à un climat semi-aride.

Le climat se distingue par un hiver froid et faiblement pluvieux, ainsi que par d'été chaud et aride. Sur une période de 22 ans (99/2000 – 2021/2022) la moyenne annuelle de précipitation est d'environ 457,98 mm.

La température moyenne interannuelle est de 26.25° C exacerbe la diminution des ressources en eau due à la sécheresse, surtout au cours de l'année dernière.

L'hydrogéologie du bassin Tébessa-Morsott est dominée par des dépôts sédimentaires datant des périodes mio-plio quaternaire, qui forme un système d'aquifère important, en particulier au centre de la plaine. La surface de cette région marneuse, avec de sable et des cailloux, tandis que des formations calcaires sont en profondeur.

La principale activité économique de la région repose entièrement sur agriculture ce qui explique l'utilisation massive d'engrais chimiques.

Les études sur la qualité des eaux souterraines ont été menées en utilisant des diagrammes et logicielde système d'information géographique, ainsi que la méthode de l'indice de qualité des eaux souterraines.

Les résultats de l'étude de l'eau des paramètres physiques et chimiques Na^{+}, SO_4^{2-}, PH, Cl^{-}, K^{+}, Ca^{2+}, HCO_3^{-}, EC et TDS de la plaine de Tebessa-Morsott révèlent que.

La température des eaux souterraines provenant des forages varie spatialement 17.60 à 18. 3°C.En termes un pH alcalin, les moyennes sont de 9,63 et des valeurs de conductivité électrique moyenne allant 3.32 à 1858µS/cm. Ces eaux sont riches en chlorures, avec de moyenne de 147,06 mg/l, en sulfates de 294,70mg/l, en sodium de 18,19 mg/l

En calcium de 94,27 mg/l, en magnésien de 37,31mg/l et en bicarbonate de 261,94mg/l.

Selon des diagrammes de piper et de Schoeller, il existe deux facies dominants sulfaté calcique (SO4 Ca) et chloruré calcique (Cl Ca), qui varient en fonction de la géologie locale de la nappe et des conditions d'alimentation. D'après l'analyse de Wilcox basée surla conductivité électrique et la présence de sodium dans l'eau pour les campagnes 2020 montre que la plupart des eaux souterraines des forages sont de qualité bonne.

L'évaluation de l'aptitude de ces eaux à l'irrigation, basée sur classification de RICHARDS qui analyse la relation entre le taux d'adsorption du sodium et la conductivité électrique, indique que les eaux moyennement minéralisées, présentant un risque de salinité et alcalinité faible.

En définitive, l'évaluation des indicateurs d'aptitude à l'irrigation montre que les eaux souterraines étudiées sont globalement favorables à l'usage agricole, avec un SAR excellent et une faible teneur en sodium. Toutefois, les variations relevées au niveau de Piet de la PS, allant d'une classe excellente à une classe mauvaise.

L'indice de qualité de l'eau d'irrigation confirme l'influence majeure des conditions géologiques sur la qualité des eaux souterraines d'irrigation, soulignant l'importance de leur prise en compte dans la gestion durable.

L'indice de qualité de l'eau est une importante méthode pour évaluer la qualitédes eaux souterraines. Cette méthode résumée de nombreuses données en seule valeur numérique et facilitant l'interprétation les résultats. L'intégration des SIG aide à identifier des tendances spatiales pour mieux gérer les ressources.

La cartographie de ces paramètres met en évidence des détails spécifiques sur les propriétés des eaux.

L'indice de qualité de l'eau révèle que 90% des échantillons des eaux souterraines sont de bonne qualité pour la consommation directe. Tandis que, 10%des échantillons d'eau sont médiocre à mauvaise. L'analyse en composantes principales montre que l'hydrochimie de l'eau est influencée par l'interaction entre l'eau et les roches ainsi que par la pollution agricole.

La connaissance de la minéralisation des eaux souterraines est clé pourassurer une gestion durable des ressources en eau dans la zone de Tébessa- Morsott.

Cela permet d'évaluer la qualité de l'eau et son risque de contamination, ce qui est crucial pour l'utilisation actuelle et à venir des ressources hydriques. Cette compréhension permet l'adoption de mesures de contrôle efficaces pour garantir la qualité de l'eauet prévenir la surexploitation.

Recommandations

- Une mise à jour détaillée de l'étude géophysique de la plaine de Tébessa -Morsott pour but l'identifier les variations et les nouvelles structures d'aquifère,
- Traitement des eaux usées par des stations dans chaque zone habitée contribue à Combattre la sècheresse et la désertification en fournissant de l'eau pour l'irrigation Ce qui renforce la production agricole et préserve les ressources naturelles.

- La gestion durable des eaux souterraines est essentielle pour préserver cette ressource pour les générations futures.
- La cartographie des risques de la salinité via un sur SIG aidera à mieux gérer et protéger les ressources eau,
- Réduire de la pollution de la surface et de subsurface pour prévenir la contaminationde la nappe phréatique,
- Limiter d'exploitation intensive des forages, surtout durant les périodes de Sècheresse, aide à contrôler la dispersion des eaux salées dans la nappe phréatique.

Abraham Bairu, Nata Tadesse .(2013).Utilisation du système d'information géographiqueet de l'indice de la qualité de l'eau pour évaluer la qualité des eaux souterraines à des fins de consommation pu pose dans les régions de Hewane ,Tigray,Nord de l'Ethiopie. Ethiopian Journal of Environmental Studies and Management Vol. 6 No.2.

Agung Setianto, Tamia Triandini .(2013).Comparaison des méthodes de krigeage et l'interpolation de poids de distance inverse dans l'extraction et l'analyse des linéaments. J.SE Asian Appl.Geol; Jan-Jun , Vol .5(1), pp. 21-29.

Amor Hamad et all. (2018). Modèle conceptuel pour les aquifères Karstiques par une analyse combinée des outils chimiques ,thermiques et isotopiques SIG dans le bassin transfrontalier Tuniso-Algérien. Arabian Journal of Geosciences (2018) 11:409.

Aoudjehane M., Bouzenoune A., Rouvier H., Thibieroz J. (1992). Halcinèse et dispositifs d'extrusions du Trias dans l'Atlas Saharien Oriental (NE Algérien). Géol. Medier, Marseilleise, XIX, PP. 273-287.

Bagnouls F. et Gaussen H. (1953). Saison sèche et indice thermique xérothermique. Doc. Carte product. Végét, sér. Généralités, 3(1), 47 p.

Beaudry T ET Henry TM, 1984. Chimie des eaux, edition. les griffons d'argiles, 1ère édition, INC Canada.

Belkhiri L. (2011). Étude de la pollution des eaux souterraines: cas de la plaine d'Ain Azel- Est Algérien. Doctorat en Sciences de lUniversit Hadj Lakhdar BATNA, Algrie, 121p.

Binet S, Spadini L, Bertrand C, Guglielmi Y, Mudry J, Scavia C .(2009). Variabilité de la concentration de sulfate dans les eaux souterraines dans les pentes rocheuses fracturées. Un outil pour identifier les zones instables actives Hydrol. Earth Syst. Sci. 2315–2327.

Boudiaf Zahra .(2021). Contribution d'un SIG à l'étude de la qualité des eaux souterraines de bassin du Hodna (Zone de M'sila)- Algérie.Mémoire de Master académique. Universite Mohamed Boudiaf - M'SILA.

Bougachoura Louiza .(2019). Étude de la qualité des eaux souterraines et vulnérabilité à la pollution d'une nappe superficielle à l'extrême Est algérien ,Cas de la région de Tébessa. Thèse de Doctorat d'État. Université Tebessa 64p.

Boukli hacene Chérifa. Systemes d'information géographique cours et travaux pratiques.Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen.

Références Bibliographique :

Bouleghlem . (2015). Etude hydrogéologique et évaluation des ressources en eau dans la région Azzaba-Guerbes.mémoire de magister. Université Badji Mokhtar-Annaba.

Bouslah Soraya .(2018). Etude de la qualite des eaux stockees a l'amont et les eaux d'infiltration a l'aval des barrages en remblai en Algérie.mémoire de Magister.Université Badji Mohktar- Annaba.

Bouzenoune A. (1993). Minéralisations péridiapiriques de l'Aptien calcaire : les carbonates de fer du gisement hématitique de l'Ouenza (Algérie Orientale). Thèse de Doctorat, Université Paris VI, 209 p.

Brahmi Smail. (2021). Caracterisation de la vulnerabilité de complexe aquifere Tébessa-Morsott NE Algérien Application de la Tomographie et SIG. Thèse de Doctorat d'État. Université Tébessa 21p.

Bentahar Fatima. (2010), Evolution tectono-sédimentaire de l'aptien de la région de telidjene Tébessa, Algérie Nord-Orientale. Mémoire Magister, Université de Tébessa, 119p.

Chemseddine Fehdi, Abdelkader Rouabhia .(2014). Qualité hydrochimique et microbiologique des eaux souterraines dans la région de Merdja,Tébessa au Nord-Est de l'Algérie. *Appl Water Sci* DOI 10.1007/s13201-014-0209-3.

Chevinine A., Popov Y., Douha D.J., Benzeroual M. (1989). Rapport sur les résultats de l'étude géologique complémentaire des feuilles 124 (Oued Kebarite), 125 (Ouenza), 150 (El-Aouinet) et 151 (Boukhadra) pour la préparation à l'édition des cartes géologiques au 1/50000. Partie 1, texte (1987-1988) O.R.G.M. Algérie.

Chikha Belgacem ,Bilal,Debbar Hocine. (2017). Etude Hydrologique et Hydrogéologique de la région de Tébessa par application de la télédétection et SIG. Mémoire de Master Académique, Universite Kasdi Merbah – Ouargla.

CLEMENT M., PIELTAIN F. (2003). Analyse chimique des sols, méthodes choisies. Ed. TEC, Paris, pp.386.

Compagnie Générale de Geophysique.CGG.(1975).prospection géophysique de la plaine de Tébessa. 22P.

De Martonne E. (1926). Aréisme et Indice d'aridité. Comptes Rendus de L'Academy of Science, Paris, 1395-1398.

Debbez Menal .(2019) Contribution à la reconnaissance de la potentialité aquifère du versant Nord de Djebel Doukane Tébessa . Mémoire de master, Université de Tébessa.

Références Bibliographique :

Djabri L. (1987). Contribution à l'étude hydrogéologique de la nappe alluviale de la plaine d'effondrement de Tébessa - Essai de modélisation - Thèse de Doc. Ing. de l'Univ. des Sci. et Tech. de Franche-Comté - Besançon - 176 p.

Djebassi Toufik.(2021). Caractérisation et cartographie des risques de pollution, par outil SIG, des eaux souterraines de la plaine de Tébessa (N.E Algérien) et essai de gestion intégrée de la ressource en eau. Thèse de doctorat. Université de Tébessa.

Dubourdieu G.(1956). Etude géologique de la région de l'Ouenza (confins algéro-tunisiens). Publications du service de la carte géologique de l'Algérie, Alger, N.S., 10, 659 p.

Durozoy G. et Bouillon M. (1956). Carte géologique de l'Algérie au 1/50000. Feuille 206. Tébessa. Service de la carte géologique de l'Algérie, avec notice explicative.

Dussart B (1966)-Limnologie .L'étude des eaux continentales .Gauthier -Villars,677 pages.

Gad,M.,Saleh,A.H.,Hussein,H.,Elsayed,S.,et Farouk,M.(2023). Water Quality Evaluation and Prediction Using Irrigation indices, Artificial Neural Networks, and Partial Least Square Regression Models for the Nile, Egypt. Water ,15(12), 2244

Gorgij, A.D., et al.(2021) Application of analytic hierarchy process (AHP) for water quality assessment .Environmental Monitoring and assessment,193(7).

H,Nambi. (2016). Analysis of Water Quality Index for Groundwater in Gudur Mandal, SPSR Nellore District - Integrated With RS And GIS. Int. Journal of Engineering Research and Applications ISSN: 2248-9622, Vol. 6, Issue 5, (Part - 2) May 2016, pp.09-15.

Hamad Omar ,Yousfi Rabiaa. (2004) .Apport des application statistique sur l'explication du chimisme de la nappe alluviale de la plaine de Meskiana ,Nord-Est Algérien. Mémoire de fin d'étude (Magter 2 hydrogéologie).Université de chahid elcheikh elaarbi tebessi, Tébessa.

Hongxing Li, Charlotte D Smith.(2019). Combiner l'analyse spatial et un indice de qualité de l'eau potable pour évaluer la surveillance. Int. J. Environ. Res. Public Health, 16, 357.

Housse,M.A., et Ellis,J.B (1987). The development of water quality indices for operational management. Water Science and Technology ,19,145-154

Hussein, E.E., Derdour, A., Zerouali, B., Almaliki, A., Wong, Y.J., Ballesta-de los Sabtos, M., Minh Ngoc, P., Hashim, M.A er Elbeltagi, A (2024). Groundwater qaulity assessment and irrigation water quality index prediction using machine learning algorithms.water.16(2),264.

Kamenan Y.(2020). Elaboration d'un modèle de protection des eaux souterraines en zone de socle : cas des aquifères fissurés du bassin versant de la Lobo à Nibéhibé (Centre-Ouest de la

Côte d'Ivoire).Thèse de doctorat. l'Université Jean LOROUGNON GUEDE.

Kowalski W.M., Hamimed M., Pharisat A. (2002). Les étapes d'effondrement des grabens dans les confines algéro-tunisiens. Bulletin du Service Géologique de l'Algérie, vol. 13, n°2, pp. 131-152.

Kowalski WM, Boudoukha A, Hemila MLet al. (1997) .Les stades d'effondrement du graben de Tébessa (confins Algéro-Tunisien) et la tectonique plicative Plio-Quaternaire. Bull. Soc. Hist. Nat. Pays de Montbéliard; p. 201-215.

Layachi Gouaidia, Defaflia Nabil et all .(2017). Origine de la minéralisation des eaux souterraines d 'un aquifere dans une zone semi - aride, cas de la nappe de la Merdja, Nord -Est Algérien. International Journal of Environment & Water ISSN 2052-3408.

Références Bibliographique :

Méghraoui,M. (1988). Géologie des zones sismiques di nord de l'Algérie (paléosismicité,tectonique active et synthèse sismotectonique). Thèse Doct.ès Sci. Université de Paris Sud (France) 356p.

Meirels,A.C.M.,de Andrade,E..M .,Chaves, L.C.G.,Frischkorn,H., et Crisostomo,L.A(2010). A new proposal of the classification of irrigation water.Revista Ciencia Agronomica,41(3),349-357**.**

Nedjari-Bellahsene, S. et Nedjari, A. (1984). Le Boukhadra : Esquisse paléogéographique aptienne. 5ème séminaire nationale des Sciences de la Terre, Alger, pp.102.

Othmanine A. (1987). Les minéralisations en fluorine, barytine, Pb, Zn et fer sidéritique autour du fossé de Tebessa-Morsott (Algérie). Relation entre paléogéographie aptienne, diapirisme, structure et métallogénie. Thèse de 3ème Cycle, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, France, 221 p.

Perthuisot V. (1994). Structures et géométrie des diapirs maghrébins. Essai de synthèse. Mémoires du Service Géologique de l'Algérie. N°6. pp.153-159.

Rouabhia A, Baali F, Hani A, Djabri L.(2009). Impact des activités anthropiques sur la qualité des eaux souterraines d'un aquifère en zone semi-aride Cas de la plaine de la Merdja, Nord Est de l'Algérie. Sécheresse. ;20(3):279-85

Rouabhia A, Baali F, Kherici N, Djabri L. (2004). Vulnérabilité et risque de pollution des eaux souterraines de la nappe des sables miocènes de la plaine d'El MA EL Abiod (Algerie). Sécheresse ;15:347–352.

S.Selvam1, R.Iruthaya Jeba Dhanamalaa.(2013). Analyse hydrochimique et évaluation de l'indice de qualité des eaux souterraines dans le district de Thoothukuni, Tamilnadu ,Inde du Sud. International Journal of Advanced Engineering Applications, (2013) Vol.2, Iss.3, pp.25-37.

Salmi-Laouar S. (2004). Contribution à l'étude géologique et gîtologique des minéralisations Pb-Zn-Ba-F dans la région de Messkiana : exemple des indices d'Essouabaa et de M'Kheriga (Atlas Saharien Oriental, Algérie). Thèse de Magister, USTHB, Alger.

Seghir K. (2008) . Vulnérabilité à la pollution, protection des ressources en eaux et gestion active du sous système aquifère de Tébessa Hammamet (Est Algérien). Thèse de Doctorat d'État. Université Badji MokhtarAnnaba 22p.

Sutadian,A et al (2016). Development of a water quality index for rivers in West Java ,

Indonesia.Ecological Indicators,61,503-515.

Tarek Derias. (2013). hydrogeologie du bassin versant de l'oued Ksob (Tébessa). vulnerabilite et protection de la ressource.Thèse de doctorat. Université de Houari Boumedienne,p11.

Références Bibliographique :

Thibitroz J. et Madre M. (1976). Le gisement de sidérite du djebel Ouenza (Algérie) est contrôle par un golfe de la mer aptienne. Bulletin de la Société d'Histoire naturelle d'Afrique du Nord. t.67, fasc.3-4, p. 125-150.

Tyagiet,S.,Sharma,B.,Singh,P.et Dobhal,R. (2013). Water quality assessment in terms of water quality index. American Journal of Water Resources ,1(3),34_38.

VILA J.M .(1980), La chaîne alpine de l'Algérie orientale et des confins Algéro-Tunisiens. Thèse de Doctorat- es -sciences, Université Pierre et Marie curie, Paris VI.

Zair Nadjet.(2022). Détermination de la qualité des eaux souterraines de la vallée d'ElOued (SE,Algérien),utilisation de l'indice de qualité des eaux souterraines(GWQI) et l'indice IPO. Algérie.Mémoire de Master académique. Université Echahid Hamma Lakhdar- ElOeud.

Zerdazi A. (1990). Etude gravimétrique du Mole d'Aire de l'Atlas Sahraoui septentrional oriental (Nord-Estde l'Algérie), Thèse de doctorat Sciences. Université de l'Ausane. Suisse. 213 p.

Zereg Salah.(2010). Impact des retours d'eau d'irrigation sur la ressource en eau souterraine des régions semi arides, exemple des plaines de Tébessa, Chéria et El Ma El Abiod, Est Algérien**.** Mémoire de magistère. Université Colonel Hadj Lakhdar – Batna 6p.

Les sites de web

http://www.researchgate.net

https:// www.refseek.com

https://eduction.iseek.com

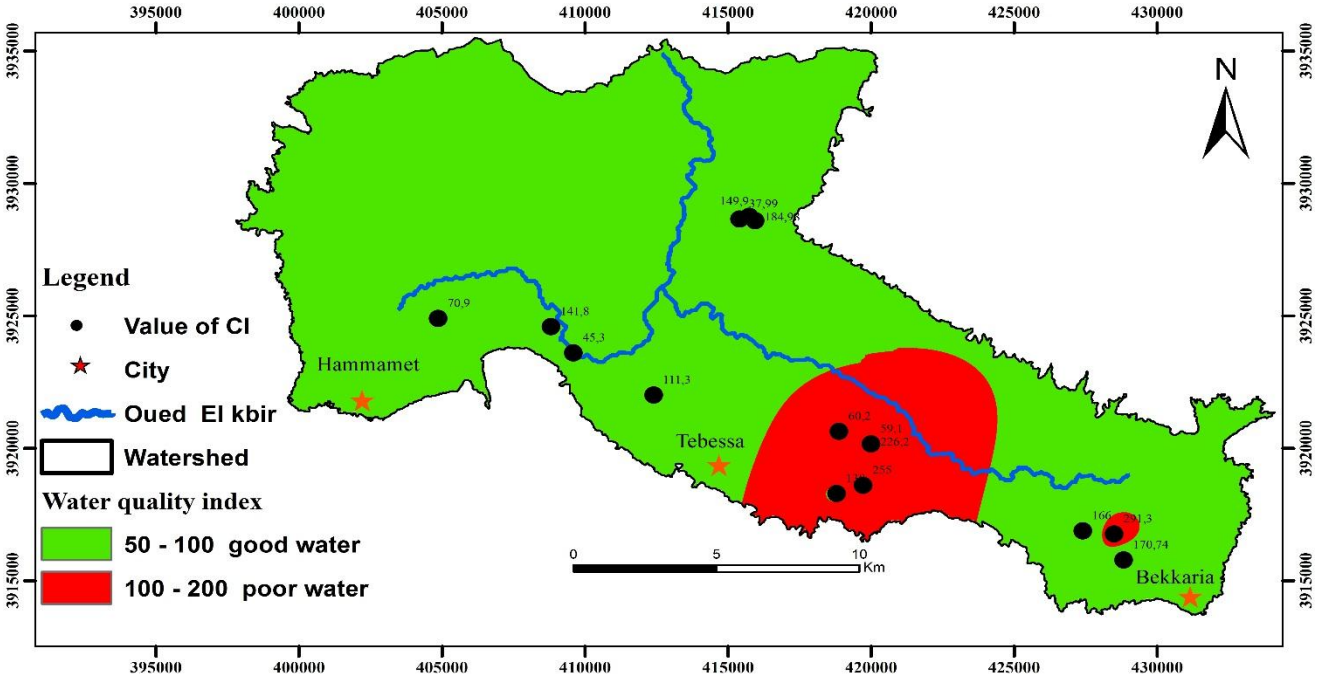
https://google scholar .com

https://www.academic.microsoft.com

https://www.springer.com

https://www.wordcat.org

htttps://www.science.gov


395000
400000
405000
410000
415000
420000
425000
430000
3935000
3930000
3925000
3920000
3915000
N
Legend
Value of Cl
City
Oued El kbir
Watershed
Water quality index
50 - 100 good water
100 - 200 poor water
Hammamet
Tebessa
Bekkaria
70,9
141,8
45,3
111,3
149,9
37,99
184,98
60,2
59,1
226,2
255
170,74
0
5
10
Km