



Faculté des sciences de la Nature et la vie

Département de Sciences biologiques

Laboratoire de Bioconversion, Génie Microbiologique et Sécurité Sanitaire

THESE de DOCTORAT

Spécialité : Science de la terre et l'univers

Intitulée

**Étude hydrogéologique, hydrochimique et modélisation des eaux
dans les plaines alluviales des Oueds el Abd et el Taht
Algérie Nord Occidentale**

Présentée par ARDJANE Tedjeddine Adda

Le 16/11/2025

Devant le jury :

Président	BENSLIMANE Mohamed	Pr	Université de Mascara
Examinateuse	ABDELBAKI Chérifa	Pr	Université de Tlemcen
Examinateuse	ZERKAOUI Laidia	MCA	Université de Tiaret
Examinateur	ZEROUALI Bilel	MCA	Université de Chlef
Encadreur	MEDDAH Boumediene	Pr	Université de Mascara
Co-Encadreur	BEKKOUSSA Belkacem	Pr	Université de Mascara

Année Universitaire : 2024-2025

REMERCIEMENTS

Avant toute chose, je rends grâce au Tout-Puissant, Allah, le Clément et le Miséricordieux, pour m'avoir accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires à l'aboutissement de ce travail.

Je tiens à exprimer mes plus sincères remerciements à mes directeurs de thèse, **Monsieur MEDDAH Boumadiene** et **Monsieur BEKKOUSSA Belkacem Samir**, pour leur confiance, leur rigueur scientifique, leur bienveillance et leur accompagnement constant tout au long de ces années. Leur soutien précieux, tant dans la rédaction des articles que du manuscrit, a été d'une grande importance pour la réussite de ce travail.

J'adresse ma profonde gratitude aux membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'évaluer ce travail :

- **Monsieur BENSLIMANE Mohamed**, pour avoir accepté de présider le jury de cette thèse ;
- **Madame ABDELBAKI Chérifa, Madame ZERKAOUI Laidia** et **Monsieur ZEROUALI Bilel** pour le temps qu'ils ont consacré à l'évaluation de ce travail et pour leurs remarques constructives;

Mes remerciements vont également à l'ensemble mes amis Mr ZEMOUR Kamel, Mr MAIRIF Mohamed, Mr CHERIER Hamid, Mr ZEMOUR Hafidh pour leur accueil, leur collaboration et leur disponibilité.

Enfin, je n'oublie pas tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à l'accomplissement de cette thèse. À vous tous, merci du fond du cœur.

DÉDICACE

Je dédie ce travail,

À la mémoire de mon père, dont l'absence ne fait qu'amplifier la force de ses enseignements et la profondeur de son amour.

À ma mère, dont la force silencieuse, la bienveillance et les sacrifices ont été le socle de mon parcours.

À ma femme et mes enfants, pour leur présence constante, leur patience et leur soutien indéfectible tout au long de ce chemin exigeant.

À mes amis, pour leurs encouragements sincères, leur écoute, et pour avoir su me rappeler de respirer, même dans les tempêtes.

À toutes celles et ceux qui ont, de près ou de loin, marqué ce parcours par un mot, un geste, une idée.

À ceux qui ont été les piliers silencieux de ce long voyage.

MERCI À TOUS

Résumé

Face aux effets croissants et néfastes du changement climatique qui se traduit principalement par l'augmentation de l'évaporation et la rareté de la précipitation, et enfin à l'intensification des activités humaines, la qualité des eaux souterraines destinées à la consommation et à l'irrigation est de plus en plus menacée. Cette étude se penche sur l'évaluation de la situation hydrochimique dans la plaine de Tiaret, au nord-ouest de l'Algérie, une région semi-aride à forte vocation agricole notamment la céréaliculture. L'étude repose essentiellement sur l'analyse physico-chimique de 36 échantillons d'eau souterraine répartis sur trois zones distinctes (Frenda, Ain El Hadid, et Takhmert). Les résultats obtenus extériorisent que l'indice de qualité de l'eau (IQE) révèle une situation préoccupante : seule une minorité des échantillons présente une bonne qualité (2.7%), tandis que la majorité est jugée médiocre à très mauvaise (97.3%). En outre, l'analyse hydrochimique met en évidence trois faciès dominants et une présence marquée de certains ions, en lien avec des sources naturelles et anthropiques, notamment agricoles. Les concentrations élevées en nitrates dans certaines zones trahissent une contamination liée à l'usage intensif d'engrais et de pesticides. Des analyses statistiques et des diagrammes géochimiques permettent d'identifier les principaux facteurs de dégradation, parmi lesquels la salinisation, les conditions climatiques, et les activités agricoles. Sur le plan agricole, bien que les eaux soient globalement utilisables, certains puits présentent un risque agronomique notable, en particulier en lien avec la salinité et la teneur en magnésium. L'étude souligne ainsi la nécessité d'adopter une gestion durable et intégrée de cette ressource fragile, en promouvant des pratiques agricoles responsables, le suivi régulier de la qualité de l'eau, et des solutions innovantes comme la recharge artificielle des nappes ou le recyclage des eaux usées.

Mots clés : Plaine, qualité physicochimique, ressources en eaux, IQE, analyses statistique

Abstract

In the face of the growing and harmful effects of climate change, mainly reflected in increased evaporation, reduced precipitation, and intensified human activity, the quality of groundwater used for drinking and irrigation is increasingly under threat. This study focuses on evaluating the hydrochemical situation in the Tiaret plain, located in northwestern Algeria, a semi-arid region with a strong agricultural focus, particularly cereal cultivation. The research is primarily based on the physico-chemical analysis of 36 groundwater samples collected from three distinct zones (Frenda, Ain El Hadid, and Takhmert). The results show that the Water Quality Index (WQI) reveals a concerning situation: only a small fraction of the samples exhibit good quality (2.7%), while the majority are considered poor to very poor (97.3%). Furthermore, the hydrochemical analysis identifies three dominant water types and a significant presence of certain ions, linked to both natural and anthropogenic sources, especially agricultural. High nitrate concentrations in some areas indicate contamination resulting from the intensive use of fertilizers and pesticides. Statistical analyses and geochemical diagrams help identify the main degradation factors, including salinization, climatic conditions, and agricultural activities. From an agricultural standpoint, although the water is generally usable, some wells present a notable agronomic risk, particularly due to salinity and magnesium content. The study thus emphasizes the need for sustainable and integrated management of this fragile resource by promoting responsible agricultural practices, regular monitoring of water quality, and innovative solutions such as artificial aquifer recharge and wastewater recycling.

Keywords: Plain, physico-chemical quality, water resources, WQI, statistical analysis

ملخص:

في ظل تزايد وتغيرات المناخ الضارة، والتي تتجلى بشكل رئيسي في زيادة التبخر وقلة هطول الأمطار، وأخيراً تصاعد الأنشطة البشرية، أصبحت جودة المياه الجوفية المخصصة للاستهلاك والري مهددة بشكل متزايد. ترکز هذه الدراسة على تقييم الوضع الهيدروكيميائي في سهل تيارت، شمال غرب الجزائر، وهي منطقة شبه جافة ذات توجه زراعي قوي، لا سيما زراعة الحبوب. تعتمد الدراسة أساساً على التحليل الفيزيائي والكيميائي لـ 36 عينة من المياه الجوفية موزعة على ثلاث مناطق متميزة (فرندة، عين الحديد، وتحمرت). تُظهر النتائج أن مؤشر جودة المياه (IQE) يكشف عن وضع مقلق، حيث أن نسبة ضئيلة فقط من العينات تتمتع بجودة جيدة (2.7%)، في حين أن الغالبية تصنف بين متوسطة إلى سيئة جداً (97.3%). علاوة على ذلك، يبرز التحليل الهيدروكيميائي وجود ثلاثة أنواع مهيمنة من المياه، بالإضافة إلى توافد واضح لبعض الأيونات المرتبطة بالمصادر الطبيعية والبشرية، وخاصة الزراعية. تشير التركيزات العالية للنترات في بعض المناطق إلى تلوث ناجم عن الاستخدام المكثف للأسمدة والمبيدات. تساعد التحليلات الإحصائية والرسوم الجيوكيميائية في تحديد العوامل الرئيسية للتدeterioration، من بينها التملح والظروف المناخية والأنشطة الزراعية. من الناحية الزراعية، رغم أن المياه قابلة للاستخدام بشكل عام، إلا أن بعض الآبار تعرّض مخاطر زراعية ملحوظة، خاصة المتعلقة بالتملح ومحتوى المغنيسيوم. تؤكد الدراسة على ضرورة تبني إدارة مستدامة ومتكاملة لهذه الموارد الهشة من خلال تشجيع ممارسات زراعية مسؤولة، والمتابعة الدورية لجودة المياه، والحلول المبتكرة مثل إعادة شحن المياه الجوفية صناعياً أو إعادة تدوير مياه الصرف.

الكلمات المفتاحية: السهول، الجودة الفيزيائية والكيميائية، الموارد المائية، مؤشر جودة المياه (IQE)، التحليل الإحصائي

Liste des figures

Chapitre 01

Figure 1. Situation géographique de la zone d'étude.....	3
Figure 2. Réseau hydrographique de la zone d'étude.....	4
Figure 3. Modèle numérique du terrain de la région d'étude.....	6
Figure 4. Carte des altitudes du bassin versants des oueds El-Abd et El-Taht des plaines alluviales	8
Figure 5. Carte des pentes de la zone d'étude.....	9
Figure 6. Profil Topographique.....	15
Figure 7. Carte du réseau hydrographique	18
Figure 8. Profils en long de l'Oued El Abd et El Taht	19
Figure 9. Variation mensuelle des températures minimales et maximales de la région de Frenda, (période 2015-2024).....	20
Figure10. Température horaire moyenne de la région de Frenda, (période 2015-2024)	20
Figure11. Pluviométrie mensuelle moyenne de la région de Frenda, (période 2015-2024)	21
Figure12. l'enneigement dans la région de Frenda, (période 2015-2024).....	22
Figure13. L'humidité de la région de Frenda, (période 2015-2024).....	22
Figure 14: Le vent dans la région de Frenda, (période 2015-2024).....	23
Figure 15: Diagramme Ombrothermique de la région de Frenda (période 2015-2024).....	24
Figure 16: Position de notre région d'étude dans le climagramme d'Emberger (2015-2024).....	25

Chapitre 02

Figure 01. Localisation de la région d'étude.....	28
Figure 02. Situation géographique des deux sous-bassin versants El-Abd et El-Taht.....	29
Figure 03. Schéma structural de la chaîne alpine De la méditerranée occidentale	30
Figure 04. Carte géologique simplifiée de l'Oranie (T. OUARDAS, 1983) (modifier).....	31
Figure 05. La carte géologique des plaines alluviales des oueds El Abd et El Taht.....	32
Figure 06. Logs lithostratigraphique de la région d'étude	34
Figure 07. Forage de Ain el Hadid.....	37
Figure 08. Forage de Frenda	38
Figure 09. Forage de Takhmert	39
Figure 10. Coupe géologique au niveau du Djebel Ahloudj et el Gaada.....	41
Figure 11. Coupe géologique de l'oxfordien supérieur à el Gaada	41
Figure 12. Les grands traits de la structure de l'Afrique du Nord-Ouest.....	46
Figure 13. Diagramme polaire des failles et des fissures	48
Figure 14. Corrélation des forages de Takhmert, Ain el Hadid et Frenda.....	49
Figure 15. Carte structurale d'après W. WILDI, 1983.....	51
Figure 16. Coupes géologiques à partir de la carte structurale de la chaîne Tello-rifaine d'après W. WILDI, 1983.....	52
Figure 17. Périmètre de A. el Hamara	56
Figure 18. Périmètre de Maarad	56
Figure 19. Périmètre de Sidi Yahia.....	57
Figure 20. Périmètre de Mennzah ech Cheik	58

Chapitre 03

Figure 01. Caractéristiques hydrogéologiques des formations.....	60
Figure 02. Coupes schématiques d'A. Kef Mellah, A. Houari, A. Soltane, A. Sidi Khaled et A. Kebira	63
Figure 03. Coupe schématique d'Ain el Hadid, Ain Nachfa	65
Figure 04 . Coupe schématique de A. Kerma et A. Kaid (Safa, 2010)	66
Figure 05. Coupe schématique de A. Saada, la cave et A. el Kheir.....	67
Figure 06. Carte hydrogéologique à travers le bassin.....	69
Figure 07 : Localisations des prélèvements dans la zone d'étude.....	73
Figure 08 :La carte piézométrique de la region d'étude	74
Chapitre 04	

Figure 01. La carte de localisation des prélèvements des points d'eaux.....	79
Figure 02. Multi paramètre type	80
Figure 03. Mode opération de nitrate.....	81
Figure 04. Dosage de nitrate	82
Figure 05. Dosage de chlorure.....	83
Figure 06. Dosage de sulfate.....	83
Figure 07. Dosage de Bicarbonate.....	84
Figure 08. Dosage de magnésium.....	85
Figure 09. Dosage de calcium.....	86
Figure 10. Dosage du sodium spectrophotomètre en flamme	87
Figure 11. Corrélation entre la somme des anions et des cations	92
Figure 12 : Distributions spatiales des cations et anions dans la région d'étude.....	92
Figure 13. Correlation entre les paramètres mesurés.....	95
Figure 14. Évolution des cations et des anions en fonction du TDS	86
Figure 15. Évolution des cations et des anions en fonction dde la CE	86
Figure 16. Distribution spatiale de la conductivité électrique des sources étudiées	98
Figure 17. Distribution spatiale de la TDS des sources étudiées.....	99
Figure 18. Distribution spatiale du pH des sources étudiées	100
Figure 19. Distribution spatiale du calcium (Ca^{+2}) des sources étudiées.....	101
Figure 20. Distribution spatiale du Magnésium (Mg^{+2}) des sources étudiées.....	102
Figure 21. Distribution spatiale du Sodium (Na^{+}) des sources étudiées.....	103
Figure 22. Distribution spatiale du Potassium (K^{+}) des sources étudiées.....	104
Figure 23. Distribution spatiale du Chlorure (Cl^{-}) des sources étudiées.....	105
Figure 24. Distribution spatiale du Sulfate (SO_4^{2-}) des sources étudiées.....	106
Figure 25. Distribution spatiale du Bicarbonates (HCO_3^{-}) des sources étudiées.....	107
Figure 26. Distribution spatiale du Nitrate (NO_3^{-}) des sources étudiées.....	108
Figure 27. Boîtes de box des éléments chimiques des des plaines alluviales des oueds El-Abd et El Taht.	109
Figure 28. Variabilité cumulée des valeurs propres.....	111
Figure 29. Corrélations des variables (diagramme des composantes dans l'espace).....	114
Figure 30. La carte des sources sur le plan factoriel.....	115

Figure 31. La dispersion des sources avec les variables sur le plan AFC.....	116
Figure 32. L'analyse hiérarchique des données chimiques.....	117
Figure 33. La carte des sources sur CHA	118
Figure 34. Diagramme de PIPER	119
Figure 35. Diagramme de Gibbs.	121
Figure 36. Classification des eaux selon le diagramme de Schoeler- Berkaloff.	123
Figure 37. Diagramme de Gibbs.....	124
Figure 38. Diagrammes binaires entre les cations et les anions	127
Figure 39. Relations entre les principaux éléments majeurs. (Frenda : pts rouges, Ain Hedid : pts vertes, Takhemert : pts bleus)	128
Figure 40. Corrélation entre Cl^- et $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$	129
Figure 41. Boite à moustaches de l'indice de la qualité des eaux	130
Figure 42. L'indice de qualité de l'eau pour les trois régions étudiées.....	131
Figure 43. Distribution spatiale de l'indice de qualité de l'eau.....	132
Figure 44.. Corrélation entre l'indice de qualité de l'eau et les éléments majeurs.....	133
Figure 45.. Classification des eaux selon le diagramme USSL. Les valeurs du SAR (Sodium) sont exprimées en meq/l.....	137
Figure 46.. EC ($\mu\text{s}/\text{cm}$) versus %Na.....	138
Figure 47.. Répartition des indices irrigations de la région d'étude.....	138
Figure 48.. Variation de l'indice de saturation des minéraux des plaines alluviales des Oueds El-Abd et El Taht	141
Figure 49.. Variation de l'indice de saturation des minéraux des plaines alluviales des Oueds El-Abd et El Taht	143
Figure 50. La carte de l'IEB	144
Figure 51.. Rapport entre $(\text{Cl}^-/\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})$	145

Liste des tableaux

Tableau 1. Paramètres géométriques des sous bassins et des plaines de la région.....	6
Tabelau 2. Classes des pentes	9
Tabelau 3. Caractéristiques morpho-métriques des sous bassins versants de la région d'étude	16
Tabelau 4. Températures moyenne à Frenda.....	19
Tableau 5. Précipitation moyenne mensuelles de la zone d'étude	21
Tableau 6. Récapitulatif de la superficie du bassin versant par commune	17
Tableau 7. Coordonnées géographiques, niveau statique et niveau piézométrique des points d'échantillonnage dans la zone d'étude.....	81
Tableau 8. Paramètres statistiques des variables physico-chimiques des eaux souterraines.....	96
Tableau 9. Les paramètres physico-chimiques.....	103
Tableau 10. Valeurs propres et pourcentages des axes principaux.....	116
Tableau 11 . Corrélations entre variables et facteurs principaux.....	117
Tableau 12. Comparaison entre (CAH) et l'ACP.....	123
Tableau 13. Poids des paramètres physico-chimiques	135
Tableau 14: Classification de l'eau selon l'IQE.....	136
Tableau 15. Classification de la qualité de l'eau souterraine selon indice 'irrigation.....	141

Tableau des abréviations

MNT	Modèle Numérique de Terrain
SIG	Système d'Information Géographique
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
Kc	Indice de compacité de Gravelius
Rc	Indice de circularité
Ri	Rapport d'élongation
Ig	Indice de pente globale
Ds	Dénivelée spécifique
Dd	Densité de drainage (totale)
Ddp	Densité de drainage permanente
Ddt	Densité de drainage temporaire
BV	Bassin Versant
ABH-CZ	Agence de Bassin Hydrographique Chélif-Zahrez (inférée à partir du contexte)

Table de matières

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre 1: Présentation générale de la zone d'étude Partie 1

1. Introduction	3
1.2. Caractéristiques morphométriques de la région d'étude.....	3
1.2.1. Situation géographique de la zone d'étude.....	3
1.2.2. Caractéristiques de formes.....	4
1-2-3. Paramètres de relief du bassin versant des oueds El-Abd et El-Taht	7
1.2.4. Paramètres géométriques des sous bassins.....	10
1.2.5. L'indice de compacité de Gravelius (Kc).....	11
1.2.6. La circularité du bassin versant (Rc).....	11
1.2.7. Rectangle équivalent.....	12
1.2.8. Le rapport d'élargissement (Ri).....	13
1.3. Etude de relief.....	14
2. La dénivellation spécifique ou coefficient de rugosité (Ds).....	15
3. Calcul de la dénivellation spécifique (Ds) d'un bassin versant.....	15
4. Etude du réseau hydrographique.....	16
4.1. Densité de drainage.....	16
4-1-1. Nature et organisation du réseau.....	16
4.1.2. Influence lithologique et structurale	16
4.1.3. Dynamique hydrologique potentielle.....	17
4.1.4. Implications hydrogéologiques.....	17
4.2. Le profil en long.....	18
5. HYDROCLIMATOLOGIE.....	19
5-1- PARAMETRES CLIMATIQUES.....	19
5-1-1. Température	19
5-1-2. Précipitation	21
5-1-3. Neige	22
5-1-4. Humidité	22
5-1-4. Vent.....	23
5.2. Synthèse climatique.....	24
5.2.1 Diagramme ombrothérmiq... 5.2.2 Quotient pluviométrique d'EMBERGER	24 25

Chapitre 2 : Géologie et Géophysique

1. Introduction	27
2. Localisation et situation géographique.....	29
3. Cadre géologique.....	29
3.1. Généralités sur la géologie de l'Afrique du Nord.....	30
3.1.1. Le domaine Tello-rifain	30
3.1.2. Le domaine Atlasique	30
3.1.3. Le domaine Saharien	31
3.2. Géologie de l'Algérie du Nord	31

3.2.1. Le domaine Tellien	31
3.2.1.1. Le Tell septentrional	31
3.2.1.2. Le Tell méridional	31
3.2.2. Le domaine Présaharien	32
3.2.2.1. Les hautes plaines et hauts plateaux.....	32
3.2.2.2. l'Atlas saharien.....	32
3.2.3. Le domaine de la plateforme-saharienne	32
4- Géologie du secteur d'étude	32
4. 1 - Lithostratigraphie	32
4.1. 1- Lithologie.....	32
4. 1. 2- Stratigraphie.....	33
4. 1. 2. 1 - Trias – Infralias.....	33
4.1. 2. 2 - Jurassique inférieur et moyen.....	33
4. 1. 2. 3 - Jurassique supérieure.....	35
4. 1. 2. 4 - Aaléno-Bajo-Bathonien.....	36
4. 1. 2. 5 - Le Callovo-Oxfordien.....	40
4. 1. 2. 5. 1 - Oxfordien moyen.....	40
4. 1. 2. 5. 2 - Oxfordien supérieur.....	40
4. 1. 2. 6 - Le Lusitanien.....	42
4. 1. 2. 7- Le Kimméridgien.....	43
4. 1. 2. 8 - Le Portlandien.....	43
4. 1. 2. 9 - Tithonique.....	43
4. 1. 2. 10 - Le Crétacé inférieur.....	44
4. 1. 2. 11 - Le Sénonien.....	44
4. 1. 3 - Les formations alluviales.....	45
4. 1. 3. 1- Plio-Quaternaire.....	45
4. 1. 3. 2. Quaternaire.....	45
5- Etude structurale.....	45
6- Contexte régional	50
7. Etude géophysique	52
7.1- Objectifs	52
7.2- Analyse des résultats.....	53
7.3- Synthèse structurale.....	54

Chapitre 3 : Etude Hydrogéologique

1. Aperçu hydrogéologique	59
2. Caractéristiques hydrogéologiques des formations.	59
2.1. Alluvions Quaternaires.....	61
2.2. Calcaires sénonien.....	61
2.3. Formation du Portlandien et du Kimméridgien	61
2.4. Formation du Callovo-Oxfordien	61
2.5. Formation de l'Aaléno-Bajo-Bathonien	62
3. Caractéristiques et cadre hydrogéologique des émergences	62
3.1. Introduction	62
3.2. Emergences issues des dolomies	62

3.2.1. Dolomies de Tlemcen et de Frenda	62
3.2.2. Les sources émergeant à la faveur de faille	62
3.2.3. Sources émergeant par contact des dolomies kimméridgiennes avec les argiles de l’Oxfordien	64
4. Dolomies D’El GAADA	64
4.1. Sources émergeant à la faveur de failles	64
4.2. Sources émergeant par contact des dolomies d’El Gaada avec les argiles de l’Oxfordien	65
5. Sources émergeante par contact des terrasses sablo-argileuses et conglomerat de l’oued	66
6. Les aquifères	69
7. Les écoulements de base	72
8. Importance particulière de l’aquifère dolomitique du jurassique inférieur et moyen	72
9. Etude de l’aquifère dolomitique inférieur et moyen pour l’ensemble des deux bassins	73
9.1. Piézométrie et limites	73
9.1.1- La Piézométrie	73
9.1.2- Les limites	76
9.1.2.1- Verticale	76
9.1.2.2- Horizontale	76

Chapitre 5. Etude et modélisation Hydrochimique

1. Introduction	77
2. Matériels et méthodes	77
3. Procédures d’échantillonnage et techniques d’analyse	78
3.1. Les paramètres physiques et chimiques	79
3.1.1. Paramètres physiques	79
3.1.2. Paramètres chimiques	80
3.1.2.1. Les anions	80
3.1.2.2. Les cations	84
4. Analyse statistique	87
5. Indice de qualité des eaux (IQE)	87
6. Résultats et discussions	89
6.1. Traitement des résultats de l’analyse	89
6.2. Analyse statistique des données chimiques	92
6.3. Cartographie hydrochimique	97
6.4. Distribution spatiale des paramètres mesurés	98
7. Détermination des principaux facies hydrochimiques	118
7.1. Diagrammes binaires et processus de minéralisation	123
8. Évaluation de la qualité des eaux souterraines en utilisant l’indice de la qualité des eaux dans les plaines alluviales	128

9.Modélisation Hydrochimique	137
10. Les échanges d'ions.....	141
Conclusion	144
Références bibliographiques	

-Introduction générale

L'eau est une ressource naturelle essentielle à la vie et au développement des sociétés humaines (Elmadani et al., 2024). Pourtant, dans le monde, environ 4 milliards de personnes soit plus de la moitié de la population mondiale n'ont pas accès à une eau potable propre pendant au moins un mois par an (Dao et al., 2024). En effet, les ressources en eau occupent une place centrale dans le fonctionnement de notre planète ainsi que dans le développement humain. Cette ressource stratégique constitue un facteur clé de contrôle environnemental et joue un rôle crucial dans le maintien et la promotion d'un développement socio-économique durable (Santos et al., 2023).

Renouvelables par nature grâce à leur cycle hydrologique, les ressources en eau présentent toutefois une grande variabilité spatiale et temporelle en raison du climat et des caractéristiques des surfaces terrestres (Yang et al., 2021). Les eaux souterraines, représentant 97 % des ressources en eau douce disponibles sur terre, font partie intégrante de ce cycle, bien qu'elles soient parfois considérées comme non renouvelables lorsqu'elles sont exploitées au-delà de leur capacité de recharge (Czauner et al., 2024). Face au changement climatique, à la croissance démographique, aux activités humaines et à la raréfaction croissante de l'eau, les sociétés se tournent de plus en plus vers des ressources en eaux souterraines non renouvelables ou fossiles, ce qui représente un défi majeur pour une gestion durable de l'eau.

Au cours des dernières années, de nombreuses études ont été consacrées à l'évaluation de la qualité des eaux souterraines (Bekkoussa et al., 2018), ainsi qu'à l'analyse de l'impact du changement climatique sur cette qualité (Guzy et al., 2025 ; Granata et Di Nunno, 2025). L'accélération du réchauffement climatique est aujourd'hui une préoccupation environnementale majeure (Amanambu et al., 2020). Les modifications attendues des régimes de précipitations, de températures et des taux d'évaporation pourraient accentuer les sécheresses (Cook et al., 2018), accroître les pertes par évaporation (Zhao et al., 2022) et intensifier les précipitations extrêmes (Gründemann et al., 2022). L'augmentation des températures joue un rôle déterminant dans la réduction de la disponibilité en eau. Elle intensifie l'évapotranspiration, réduisant l'humidité des sols et la quantité d'eau infiltrée atteignant les nappes phréatiques (Grosser et Schmalz, 2025).

Les eaux souterraines sont particulièrement importantes pour l'agriculture, car elles constituent une source essentielle d'irrigation, notamment dans les zones où les précipitations sont irrégulières ou insuffisantes (Masmoudi et al., 2024). Leur disponibilité permet de garantir la productivité agricole, de soutenir les cultures en période de sécheresse et d'assurer la sécurité alimentaire. Toutefois, leur

Introduction générale

surexploitation, associée à l'infiltration de produits chimiques tels que les engrais, les pesticides ou les déchets organiques, entraîne une dégradation de la qualité de l'eau, notamment par pollution aux nitrates et autres substances nocives. Cette pollution peut affecter la santé humaine, l'environnement, et compromettre l'usage futur de cette ressource vitale. Elle est également responsable d'une augmentation de la salinité, d'une toxicité accrue des cultures, d'une dégradation des sols et d'une contamination par les métaux lourds, rendant la production agricole encore plus complexe (Moussa et al., 2025). Il est donc primordial d'adopter des pratiques agricoles durables afin de préserver cette ressource.

En Algérie, les eaux souterraines jouent un rôle central, tant pour l'approvisionnement en eau potable que pour l'irrigation agricole. Dans ce contexte, le concept de développement durable s'impose comme une approche essentielle pour assurer un équilibre entre les besoins actuels et ceux des générations futures, en intégrant des stratégies de gestion rationnelle, de préservation et de suivi de la qualité des ressources en eau. La qualité de l'eau constitue, à ce titre, un indicateur fondamental du développement durable et du bien-être des populations.

C'est dans cette optique qu'il devient indispensable d'évaluer régulièrement l'état des ressources hydriques, en particulier dans les régions vulnérables. La wilaya de Tiaret, située au nord-ouest de l'Algérie, en est un exemple pertinent. Cette région à climat semi-aride fait face à une pression croissante sur ses ressources en eau en raison de la variabilité climatique et d'une agriculture intensive. En effet, l'utilisation d'engrais chimiques plus principalement les pesticides en agriculture peut constituer une source de contamination des eaux souterraines, notamment par infiltration en profondeur et accumulation d'éléments toxiques tels que les nitrates (Abanyie et al., 2023; Rad, et al. 2022).

Notre thèse de doctorat s'inscrit dans cette problématique. Elle porte sur l'évaluation des paramètres physico-chimiques et la qualité des eaux souterraines dans plaines alluviales de Oued El Abd et Oued El Taht pour mieux comprendre les processus de minéralisation. Une seconde partie focalisée sur le contexte géologie, hydrogéologique ainsi que l'hydro climatologie de ces plaines. Une troisième partie de l'étude est consacrée à une analyse socioéconomique de cette ressource. Les résultats obtenus permettent de mettre en évidence l'importance vitale des eaux souterraines pour la durabilité environnementale et le développement socio-économique régional.

Partie 01 : Présentation générale de la zone d'étude

I-1 : Introduction

I.2. Caractéristiques morphométriques de la région d'étude

I.2.1. Situation géographique de la zone d'étude :

Les plaines alluviales des Oueds El-Abd et El-Taht sont situées dans la wilaya de Tiaret (Fig 01), et sont partagées entre trois communes : Frenda, Ain Hérid et Takhemert. Elles font partie du bassin versant des Oueds El-Abd et El-Taht, qui lui-même appartient au bassin versant de l'Oued Mina, un sous-bassin du grand bassin de l'Oued Chélif (Fig 02). Ce dernier est le plus grand bassin du nord de l'Algérie, avec une superficie de 44 630 km².

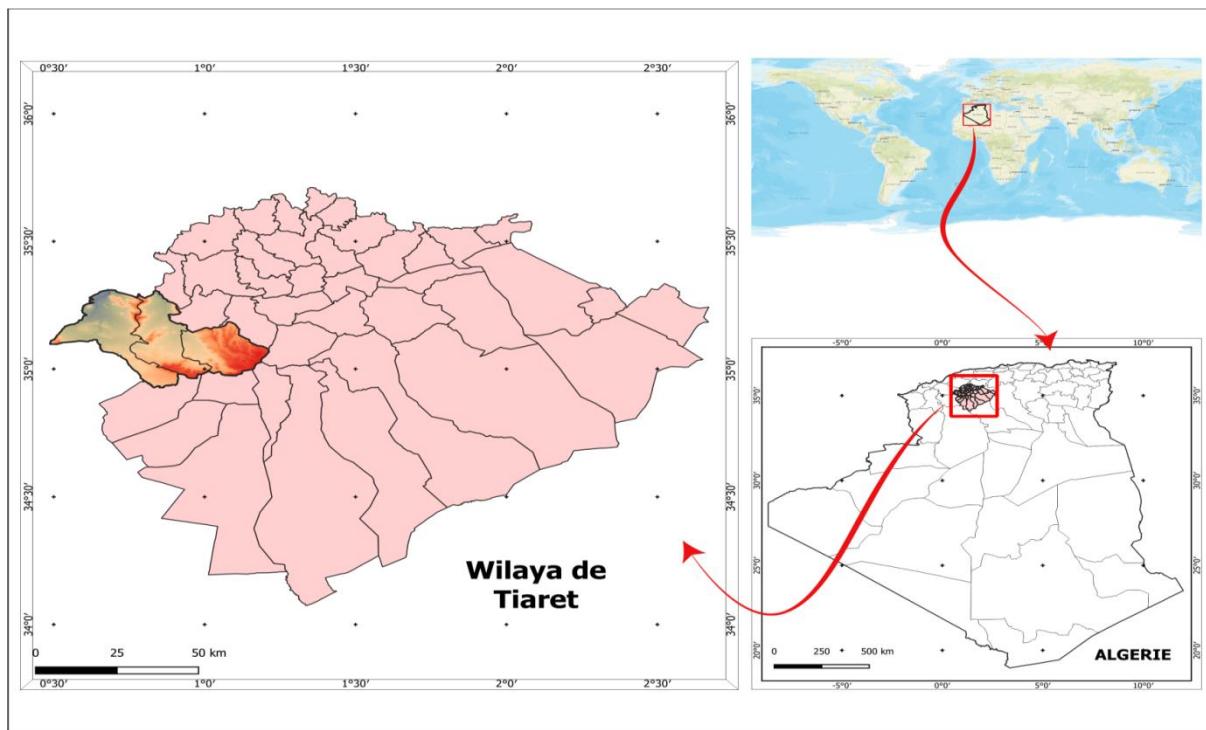


Figure 01 : Situation géographique de la zone d'étude

Présentation générale de la zone d'étude

Les plaines alluviales étudiées se trouvent au centre et vers le sud du bassin versant de l'Oued Mina, situé entre les latitudes $35^{\circ}40'$ et $34^{\circ}40'$ N, et les longitudes $0^{\circ}20'$ et $1^{\circ}10'$ E (Fig. 1). La région est délimitée à l'est par le Moyen Chéliff, à l'ouest par le bassin de la Macta, au nord par le massif de Dahra, et au sud par le Chott Ech Chergui. La zone d'étude est alimentée principalement par deux affluents majeurs : l'Oued El-Abd et l'Oued El-Taht.

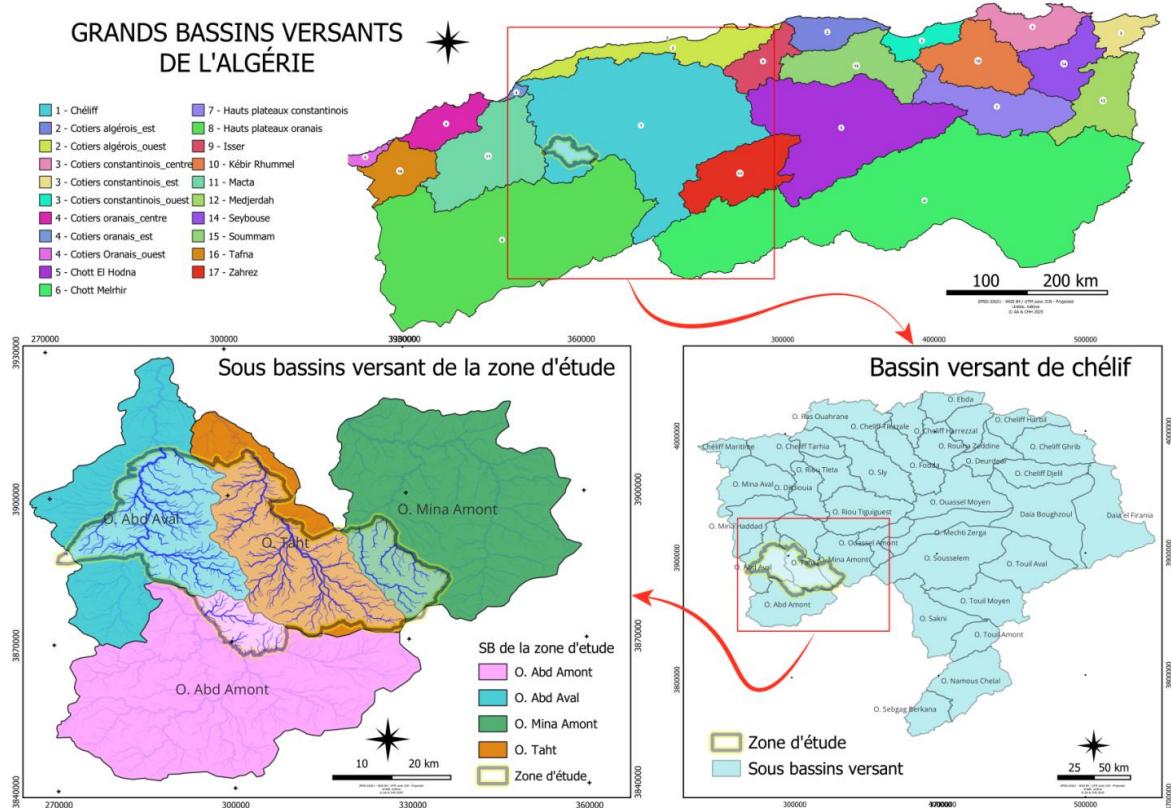


Figure 02 : Réseau hydrographique de la zone d'étude

1.2. 2. Caractéristiques de formes :

- Caractéristiques morpho-métriques et géomorphologiques du bassin versant et sous bassin versant**

La détermination des différentes variables physiographiques caractéristiques de chaque bassin versant étudié est réalisée à l'aide de techniques numériques et de modèles numériques de terrain (MNT), qui permettent la numérisation des diverses variables physiques. Un MNT est une

Présentation générale de la zone d'étude

représentation numérique simplifiée de la surface d'un territoire, exprimée en coordonnées altimétriques et planimétriques, et référencée dans un repère géographique.

Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé un modèle numérique de terrain ASTER d'une résolution spatiale de 30 m (fig 03), ce qui nous a permis de générer des cartes thématiques à l'aide des SIG (systèmes d'information géographique). L'analyse du comportement hydrologique et hydrogéologique, notamment le régime d'écoulement, l'infiltration, etc., d'un bassin versant nécessite la connaissance de ses caractéristiques topographiques et morphologiques, telles que la forme, la morphologie du relief, la disposition du réseau hydrographique, ainsi que la nature du sol et le couvert végétal.

Ces caractéristiques morphométriques sont présentées dans le tableau 01. Elles ont été estimées à partir des données de l'image Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), traitées à l'aide du logiciel Global Mapper, avec une résolution de 30 m. Le traitement a ensuite été effectué sur ArcMap™ (logiciels ArcGIS™).

L'étude des bassins versants s'appuie sur des modèles numériques de terrain (MNT) pour obtenir les variables physiographiques. Un MNT représente numériquement la surface du territoire en coordonnées altimétriques et planimétriques. Un modèle ASTER à 30 m de résolution a été utilisé pour créer des cartes thématiques à travers des SIG. Pour analyser le comportement hydrologique, il est essentiel de connaître les caractéristiques morphologiques, comme la forme du relief, le réseau hydrographique, la nature du sol et le couvert végétal, évaluées grâce aux données SRTM traitées avec Global Mapper et ArcMap™.

La superficie et le périmètre représentent deux des paramètres géométriques les plus significatifs d'un bassin versant. Ils sont déterminés à l'aide de la technique de digitalisation.

Les principales caractéristiques géométriques des sous-bassins sont présentées dans le tableau 01.

Le bassin versant étant l'aire de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau, les débits vont être en partie reliés à sa surface. La superficie du bassin versant ($A = 1394,5823 \text{ Km}^2$) ainsi que le périmètre ($P=232.38 \text{ km}$) sont mesurés à l'aide du logiciel Arcgis 10.2.2.

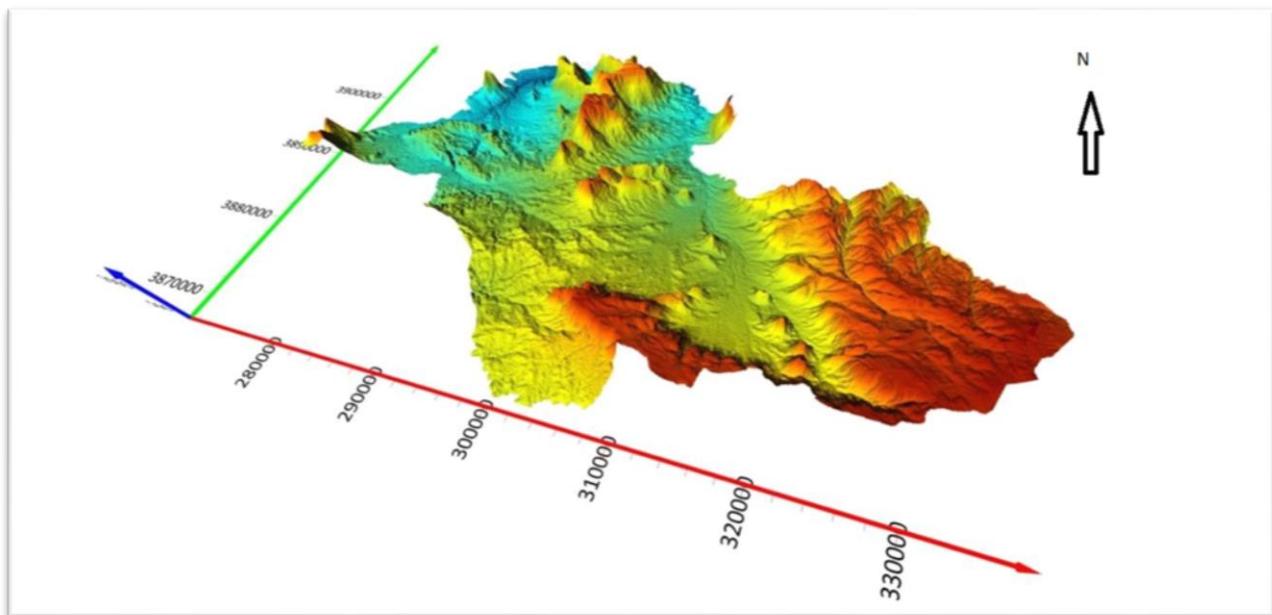


Figure 03. Modèle numérique du terrain de la région d'étude

Tableau 1 : Paramètres géométriques des sous bassins et des plaines de la région.

Superficie (km ²)	1394,5823	
Périmètre (km)	232.38	
Indice de compacité Kc	1.7	Le bassin est de forme allongée favorisant un écoulement lent des eaux de ruissellement.
La circularité du bassin versant (Rc)	0.325	Le bassin de forme allongée
Altitude maximale (m)	1280(m)	Point plus haut du bassin
Altitude moyenne (m)	847.33(m)	Déterminée après génération des courbes de niveau sur Global Mapper et extraction des différentes surfaces correspondantes.

Présentation générale de la zone d'étude

Altitude minimale (m)	387(m)	Exutoire du bassin versant
Longueur du rectangle équivalent(km)	102,60	La longueur du rectangle équivalent du bassin étudié est plus grande que la largeur. Donc, le temps de concentration des eaux de ruissellement à l'exutoire est long et par conséquent l'infiltration est plus importante que le ruissellement dans le cas où la lithologie est perméable et la pente est faible.
Largeur du rectangle équivalent (km)	13,60	
Le rapport d'élongation (Ri)	0.41	bassin a une forme allongée
Pente moyenne en %	1,02	L'estimation des vitesses d'écoulements superficiels.
Dénivelée spécifique (m)	Ds < 10 m	Les deux sous-bassin du plaines rangent dans les classes du relief au les zones de basse altitude se concentrent au Nord-Ouest et les zones de haute altitude se situent principalement à l'Est et au Sud-Est du basin

1-2-3. Paramètres de relief du bassin versant des oueds El-Abd et El-Taht

Le relief constitue un facteur déterminant dans l'évaluation de l'aptitude des terrains au ruissellement, à l'infiltration ainsi qu'à l'évaporation.

a) Altitude

L'altitude du bassin versant des oueds El-Abd et El-Taht varie entre 1280 m dans la région Nord – Ouest du Frenda et 387 m pour la partie nord de la région de Takhemert (Figure 4).

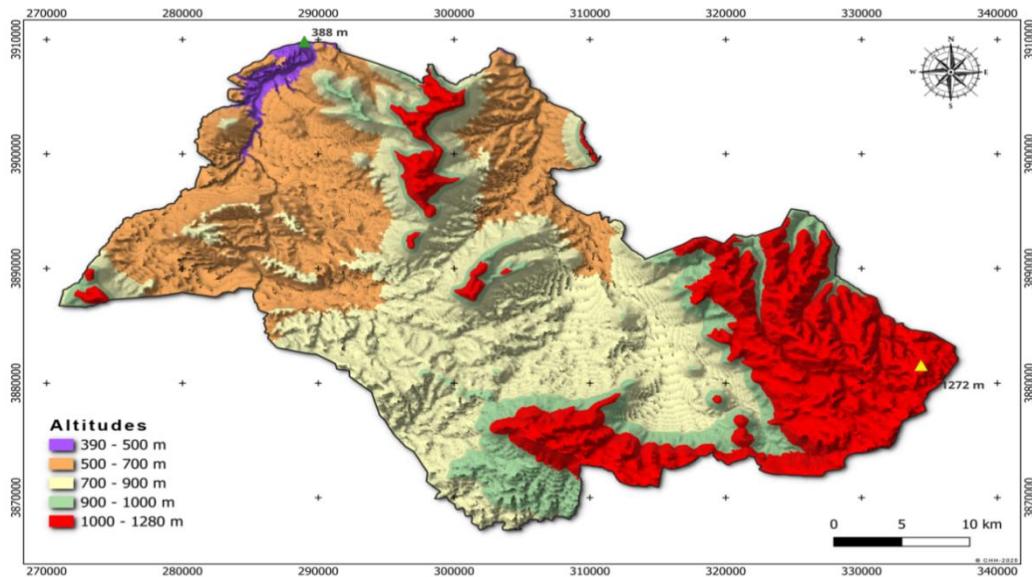


Figure 04 : Carte des altitudes du bassin versants des oueds El-Abd et El-Taht des plaines alluviales

Le bassin versant de la zone d'étude présente une topographie variée avec 5 classes d'altitude distinctes (Figure 3), les zones de basse altitude (390-500 m) se concentrent au Nord-Ouest,. Les zones d'altitude moyenne-basse (500-700 m), dominantes dans les parties Ouest et Nord-Ouest, couvrant une superficie importante de notre région d'étude. La partie centrale et Sud-Ouest est occupée par des zones d'altitude moyenne (700-900 m), qui assurent la transition entre les zones basses et élevées. Les zones d'altitude moyenne-haute (900-1000 m), constituent des zones de transition limitées. Enfin, les zones de haute altitude (1000-1280 m) se situent principalement à l'Est et au Sud-Est du bassin, avec quelques zones au Nord et un point culminant à 1272 m à l'Est.

b) La pente

Les indices de pente ont pour objectif de caractériser les pentes d'un bassin versant, en vue de faciliter leur classification et comparaison.

Présentation générale de la zone d'étude

Ils jouent également un rôle important dans l'estimation des vitesses d'écoulement de surface. L'analyse effectuée a permis de distinguer quatre classes de pentes, présentées dans le tableau 2

Tableau 2: Classes des pentes

Classe des pentes (%)	Classe de relief
< 4,2 %	Faible
4,2 % à 7,3 %	Moyenne
7,3 % à 14,2 %	Forte
> 14,2 %	Très forte

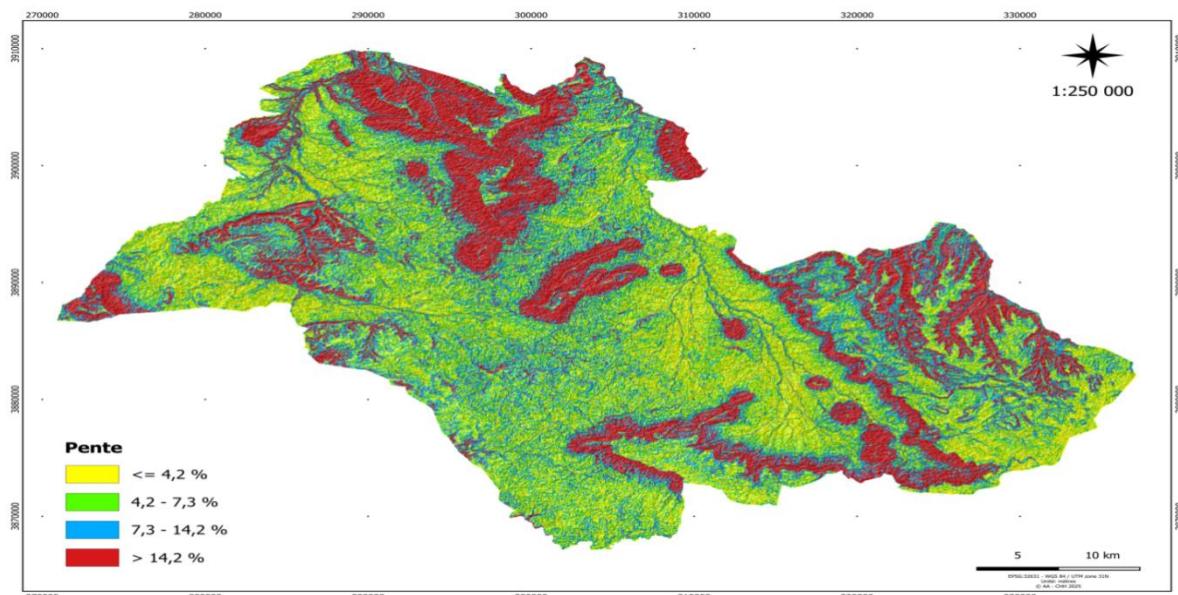


Figure 05. Carte des pentes de la zone d'étude

Les deux sous-bassins versants qui caractérisent la région d'étude sont représentés dans la carte des pentes, révélant des classes de relief variables allant du faible au très fort, avec une prédominance des formes allongées. Ces caractères morpho-métriques particuliers favorisent, a priori, différents comportements hydrologiques pour nos zones d'étude. Cette carte (Figure 5) met en évidence quatre classes distinctes :

- Les zones à faibles pentes ($\le 4,2\%$), colorées en jaune, dominent la partie centrale et Sud-Ouest de la zone d'étude, formant des plaines qui ralentissent la concentration des eaux vers

l'exutoire des deux bassins versants. Ces plaines occupent une superficie importante de la région étudiée.

- Les reliefs plus marqués, représentés par les pentes fortes (**7,3% - 14,2%**) en bleu et très fortes (**> 14,2%**) en rouge, se concentrent principalement dans les parties Est et Nord. Ces zones de relief accidenté favorisent un ruissellement de surface important et une concentration rapide des eaux.
- La configuration morpho-métrique des sous-bassins, particulièrement dans les zones à fortes pentes, présente des formes majoritairement allongées qui facilitent le drainage des eaux. Cette structure crée un contraste hydrologique entre les zones planes à écoulement lent et les zones escarpées à ruissellement rapide.

1.2.4. Paramètres géométriques des sous bassins

a- Paramètre de forme

Les caractéristiques de forme du bassin versant telle que la circularité, le facteur de forme, le rapport d'elongation et coefficient de compacité, La forme des bassins versants a une influence directe sur son comportement hydrologique (Strahler 1964). Un bassin versant allongé ne réagira pas de la même façon qu'un bassin versant de forme ramassée (Roche, 1963).

b- Paramètres hydrologiques

Les caractéristiques hydrologiques du bassin versant telle que le temps de concentration, le coefficient de ruissellement, la densité de drainage et la capacité d'infiltration, Les propriétés hydrologiques des bassins versants ont un impact significatif sur le régime des écoulements (Park et al., 2018). Un bassin versant à forte densité de drainage ne présentera pas les mêmes réponses hydrologiques qu'un bassin versant à faible densité de drainage (Padala et al., 2024). Ces paramètres déterminent la manière dont les précipitations sont transformées en écoulement superficiel, influençant ainsi la vulnérabilité du bassin aux inondations ou aux sécheresses (Mallya et al., 2018).

Les caractéristiques morphométriques du bassin versant telles que la circularité, le facteur de forme, le rapport d'elongation et le coefficient de compacité influencent directement son comportement hydrologique (Suharyanto, et al., 2020). Un bassin versant allongé présente une réponse hydrologique significativement différente de celle d'un bassin versant de forme compacte ou ramassée, notamment en termes de temps de concentration des eaux et d'intensité des débits de pointe (Bolduc et al., 2024). Les études récentes montrent que la géométrie du bassin affecte particulièrement les processus de ruissellement, la formation des crues et les capacités de rétention hydrique (Nageswara et al., 2020). Ces paramètres deviennent d'autant plus critiques dans un

Présentation générale de la zone d'étude

contexte de changement climatique où l'intensification des précipitations extrêmes modifie les régimes hydrologiques (Hassan et al., 2024).

1.2.5. L'indice de compacité de Gravelius (Kc)

C'est le rapport entre le périmètre du bassin et la circonference du cercle ayant la même superficie que ce bassin. La forme d'un bassin a une influence directe sur le comportement de l'écoulement superficiel (Gravelius, 1914; Maurya, et al., 2016 ; Khan et al., 2023).

$$Kc = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$$

où :

Kc = indice de compacité de Gravelius (adimensionnel)

P = périmètre du bassin versant (en mètres ou km)

A= superficie du bassin versant (en m² ou km²)

$\pi \approx 3.1416$

ou :

Kc = 1 bassin (circulaire), le modèle choisi étant un cercle.

1 < Kc < 1,3 bassin compact.

Kc > 1,3 bassin allongé.

Plus le Kc se rapproche de l'unité et plus le bassin versant est ramassé donc plus compact ce qui par conséquent favorise une concentration rapide des eaux superficielles à l'exutoire.

Il apparaît d'après le tableau 1 que nous avons affaire à des sous bassins de forme allongée, puisque la valeur de l'indice de compacité de Gravelius (Kc) est supérieure à 1,70 dans la région d'étude, le bassin de la région d'étude est le plus allongé dans tous les deux sous- bassins versants des plaines alluviales.

1.2.6. La circularité du bassin versant (Rc)

Selon Miller (1953) c'est le rapport entre l'aire du BV et l'aire d'un cercle ayant le même périmètre que ce dernier :

$$Rc = \frac{4\pi A}{P^2}$$

où :

Rc = indice de circularité (adimensionnel)

A= superficie du bassin versant (en km² ou m²)

P = périmètre du bassin versant (en km ou m)

$$\pi \approx 3.1416$$

Des valeurs de circularité du bassin s'approchent de 1 indiquent une forme quasi circulaire (Singh, 1992) et une pente relativement faible.

Il apparaît d'après le tableau 2 que nous avons affaire à des sous bassins de forme allongée, puisque la valeur de La circularité (R_c) est supérieure à 0,325, ce qui indique des bassins de forme allongées, l'infiltration de l'eau prend du temps pour atteindre l'exutoire du deux sous bassins versants de notre région d'étude.

1.2.7. Rectangle équivalent :

Ce rectangle est défini pour comparer facilement les bassins entre eux, du point de vue de l'influence de leurs caractéristiques sur l'écoulement, d'autant plus que les valeurs de K_c sur tous les sous bassins de la région d'étude sont supérieures à 1,12. Les dimensions du rectangle équivalent sont calculées par les formules 2 et 3 :

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

$$lr = \frac{Kc \cdot \sqrt{A}}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{Kc} \right)^2} \right] \quad \dots \dots \dots (2)$$

Avec : Lr : Longueur du rectangle équivalent (Km) ; lr : Largeur du rectangle équivalent (Km).

D'après le tableau 2, la longueur du rectangle équivalent des bassins étudiés est plus grande que la largeur.

Le rectangle équivalent du bassin versant a donc une longueur (Lr) de 102,60 km et une largeur (lr) de 13,60 km.

Du fait de l'allongement des sous bassins, le temps de concentration des eaux de ruissellement à l'exutoire est long et par conséquent l'infiltration est plus importante que le ruissellement dans le

cas où la lithologie est perméable et la pente est faible.

Pour calculer la pente moyenne, j'utiliserais la formule simplifiée qui prend en compte la dénivellation totale et une estimation de la longueur du bassin.

-Dénivellation totale = Altitude max - Altitude min = 1282 - 239 = 1043 m

-Pour estimer la longueur caractéristique du bassin, la longueur du rectangle équivalent que nous avons calculé précédemment : $L_r = 102,60 \text{ km} = 102600 \text{ m}$

- La pente moyenne en pourcentage est donc : Pente moyenne = (Dénivellation / Longueur) $\times 100\%$
 $\text{Pente moyenne} = (1043 / 102600) \times 100\% = 1,02\%$

La pente moyenne du bassin versant est donc d'environ 1,02%.

1.2.8. Le rapport d'élargissement (Ri) :

Selon Schumm (1956), le rapport d'élargissement correspond au rapport entre le diamètre d'un cercle possédant la même aire que le BV et longueur de ce dernier :

$$Rc = \frac{2\sqrt{\frac{A}{\pi}}}{L}$$

où :

Re = rapport d'élargissement (adimensionnel)

A = superficie du bassin (en km^2 ou m^2)

L = longueur du bassin (en km ou m)

$\pi \approx 3.1416$

Un faible rapport d'élargissement ($< 0,55$) indique une (BV) allongée alors qu'un rapport d'élargissement ($> 0,70$) indique un (BV) large possédant une forte capacité d'infiltration et un faible ruissèlement.

Re = 0,41

Il apparaît d'après le tableau (2) que nous avons affaire à des sous bassins de forme allongée, puisque la valeur de rapport d'élargissement est 0,41. Cela signifie que le bassin a une forme allongée.

L'altitude du bassin versant des oueds El-Abd et El-Taht varie entre 1280 m et 389m (Fig 04).

1.3. Etude de relief

La zone d'étude est caractérisée par l'hétérogénéité des grandes unités naturelles. Le relief est un facteur essentiel dans la détermination de l'aptitude des terrains au ruissellement, l'infiltration et l'évaporation.

a) Altitude

Les paramètres Hydrométéorologiques tels que (précipitations, températures, ...), dépendent en partie de l'altitude. La morphologie du bassin versant influe sur la vitesse d'écoulement. L'altitude maximale varie dans les deux sous-bassin des plaines alluviales entre 1280 m dans la région Nord –Ouest du Frenda ,l'altitude est élevée dans cette partie et plus faible dans la partie Nord de la région de Takhemert avec une altitude 387 m.

b) Les indices de pente

L'objet de ces indices est de caractériser les pentes d'un bassin et de permettre des comparaisons et des classifications, ils sont également utilisés dans l'estimation des vitesses d'écoulements superficiels.

c) Indice de pente globale (Ig)

Cet indice représente la pente moyenne de 90% de la superficie du bassin, il est obtenu à partir de la courbe hypsométrique, on prend la dénivellée (D) entre les altitudes H5% –H95%.

$$Ig = D/Lr = (H5\% - H95\%)/Lr$$

Où :

H5% représente l'altitude dépassée par 5% de la surface du bassin

H95% représente l'altitude dépassée par 95% de la surface du bassin

Lr est la longueur du rectangle équivalent

Cependant, $Ig \approx 1043 / 102600 = 0,0102 = 1,02\%$ Une pente de 1,02 % est relativement faible.

Un bassin avec une pente faible est généralement étalé, allongé,

2. La dénivélée spécifique ou coefficient de rugosité (Ds)

Pour permettre une comparaison des bassins entre eux du point de vue relief, elle est déterminée par la relation :

$$\mathbf{D}\mathbf{s} = \mathbf{I}\mathbf{g} \cdot \sqrt{A} \quad \quad \quad \mathbf{D}\mathbf{s} = \mathbf{D}^* \sqrt{\frac{I}{\mu}} \dots \dots \dots (1)$$

On détermine la dénivellation spécifique qui sert de base à une classification proposée par l'ORSTOM.

- $D_s < 10m$	Classe R1	- Relief très faible.
- $10 < D_s < 25$	Classe R2	- Relief faible.
- $25 < D_s < 50$	Classe R3	- Relief assez faible.
- $50 < D_s < 100$	Classe R4	- Relief modéré.
- $100 < D_s < 250$	Classe R5	- Relief assez fort.
- $250 < D_s < 500$	Classe R6	- Relief fort.
- $D_s > 500$	Classe R7	- Relief très fort

3. Calcul de la dénivellation spécifique (Ds) d'un bassin versant : $Ds = D / Lr$

$$Ds = 1043 / 232380 \approx 0,00449 \text{ soit } 0,449 \%$$

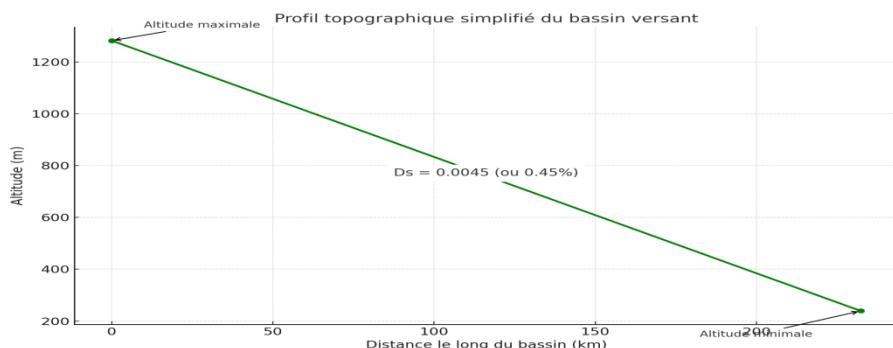


Figure (06). Profil Topographique

Les résultats des calculs apparaissent dans le tableau (03) ci-dessous. Ces résultats permettent de montrer que les plus fortes valeurs de l'indice de pente globale (Ig) et de la dénivélée spécifique (Ds) concernent les sous bassins des Oued El Abd et El Taht. Ces valeurs traduisent bien d'ailleurs l'importance du volume montagneux et la nature très accidentée du relief dans ces secteurs. On constate, par ailleurs, que les sous bassins qui caractérisent les deux sous-bassins versants de la région d'étude se rangent dans les classes du relief très faible (fig 06) au les zones de basse altitude se concentrent au Nord-Ouest et les zones de haute altitude se situent principalement à l'Est et au

Sud-Est du bassin.

Les principaux paramètres de forme et de relief ont été déterminés pour les différents sous bassins sont mentionnés dans le tableau (03)

Il apparaît d'après le tableau (03) ci-dessous que nous avons affaire à des deux sous bassins de forme allongée, puisque la valeur de l'indice de compacité de Gravelius Kc est supérieure à 1,30 et la longueur du rectangle équivalent est plus grande que sa largeur. Du fait de l'allongement des sous bassins le temps de concentration des eaux de ruissellement à l'exutoire est long, et par conséquent l'infiltration est plus importante que le ruissellement c-à-dire ralentir la vitesse des eaux de ruissellement en favorisant ainsi l'infiltration

Tableau 03 : Caractéristiques morpho-métriques des sous bassins versants de la région d'étude.

Bassin	Sous-bassin	Surface A (km ²)	Périmètre P (km)	Altitude min (m)	Altitude max (m)	Kc	Rc	Longueur L (km)	Largeur l (km)	Ri	Dénivelée spécifique Ds	Classe de relief	Forme du sous-bassin
Oued Mina	Oued El Abd et El Taht	1394,5823	232.38	387	1280	1.7	0,325	102.60	13.60	0,41	0.445	Relief très faible	Forme allongée

4. Etude du réseau hydrographique

4-1-1. Nature et organisation du réseau

La carte montre un réseau hydrographique bien ramifié, caractérisé par :

- Des cours d'eau de différents ordres (1 à 5) selon la classification de Strahler.
 - Une hiérarchisation claire : les cours d'eau de 1er ordre confluent pour former ceux de 2e, et ainsi de suite, jusqu'au principal collecteur.
- Ce type d'organisation est typique d'un réseau dendritique, indiquant :
- Une lithologie relativement homogène ou faiblement différenciée,
 - Un relief structuré par des altitudes variées (de 387 m à 1266 m), favorisant le ruissellement.

4-1-2. Influence lithologique et structurale

La carte indique que la structure géologique influe fortement sur le réseau.

Présentation générale de la zone d'étude

Les zones à fortes densités de drainage (particulièrement à l'Ouest et Nord-Est de la carte) pourraient correspondre à des terrains fracturés, perméables ou facilement érodables (roches sédimentaires tendres, zones faillées).

À l'inverse, les zones avec un réseau plus espacé (Centre-Sud) sont peut-être sur des roches plus dures ou imperméables.

Les directions principales des cours d'eau semblent suivre certaines orientations structurales (lignes de fracture, failles, ou zones de faiblesse géologique).

4-1-3. Dynamique hydrologique potentielle

La topographie (gradient altitudinal fort entre l'Est et l'Ouest) indique un écoulement général d'est en ouest, avec une capacité de ruissellement élevée dans les zones rouges et oranges (altitudes élevées).

Les zones en bleu (altitudes faibles, exutoires potentiels) reçoivent l'ensemble du ruissellement.

4-1-4. Implications hydrogéologiques

Les zones rouges (altitudes > 1000 m) avec des réseaux de 1^{er} et 2^{eme} ordre indiquent des zones de captation et d'infiltration possibles.

Les confluences des cours d'eau de 3^e à 5^e ordres sont des zones à risque d'accumulation, d'érosion ou d'inondation saisonnière.

Si des fissures ou failles sont présentes, elles peuvent canaliser l'eau souterraine vers les zones basses (bleues). (Figure 07)

Présentation générale de la zone d'étude

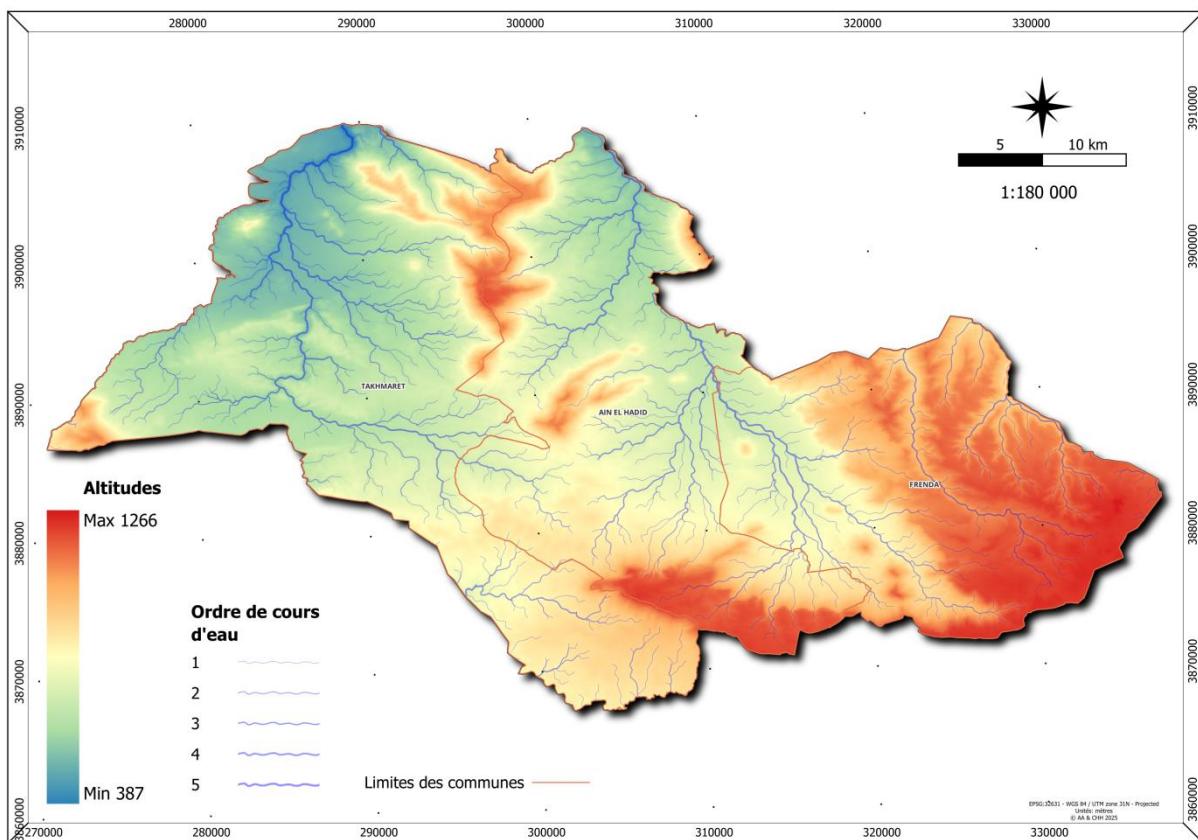


Figure 07 : Carte du réseau hydrographique

4.2. Le profil en long

Le profil en long d'un cours d'eau permet d'estimer sa pente moyenne nécessaire dans l'estimation du temps de concentration des eaux dans le bassin et surtout sur les vitesses d'écoulement lors des crues. Une opposition entre la faible inclinaison des cours d'eau des plaines alluviales situé dans la région de Takhemert et Ain Hedid (Oued El Abd) et les fortes pentes des affluents prenant naissance dans les massifs montagneux du Frenda (Oued El Taht) (Figure 08).

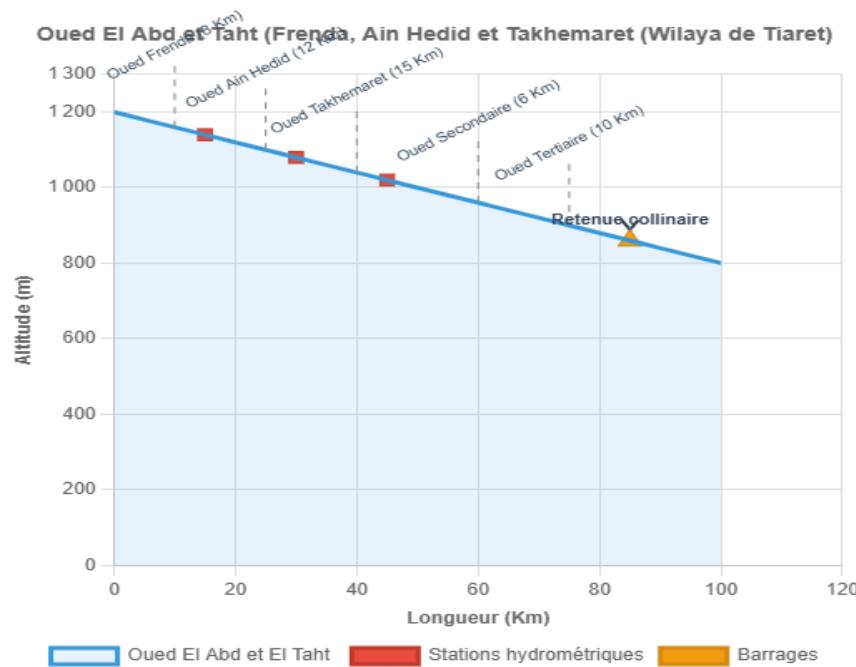


Figure 08. Profils en long de l'Oued El Abd et El Taht

5- HYDROCLIMATOLOGIE

5-1- PARAMETRES CLIMATIQUES

L'étude est basée sur les paramètres climatiques essentiels qui sont la température et les précipitations, l'humidité et le vent.

5-1-1 -Température :

La saison très chaude dure 2,8 mois, du 16 juin au 10 septembre, avec une température quotidienne moyenne maximale supérieure à 29 °C. Le mois le plus chaud de l'année à Frenda est juillet, avec une température moyenne maximale de 34 °C et minimale de 18 °C.

Tableau 04 : Températures moyenne à Frenda (2015-2024)

Mois	janv.	févr.	Mars	avr.	mai	juin	juil.	août	sept.	oct.	nov.	déc.
T° Max	11 °C	12 °C	15 °C	18 °C	23 °C	30 °C	34 °C	33 °C	28 °C	22 °C	15 °C	12 °C
T° Moyenne	5 °C	6 °C	9 °C	12 °C	16 °C	22 °C	26 °C	26 °C	21 °C	16 °C	10 °C	6 °C
T° Min	1 °C	2 °C	3 °C	6 °C	9 °C	14 °C	18 °C	18 °C	14 °C	10 °C	5 °C	2 °C

La saison fraîche dure 4,1 mois, du 16 novembre au 20 mars, avec une température quotidienne moyenne maximale inférieure à 15 °C. Le mois le plus froid de l'année à Frenda est janvier, avec une

Présentation générale de la zone d'étude

température moyenne minimale de 1 °C et maximale de 11 °C (fig. 09)

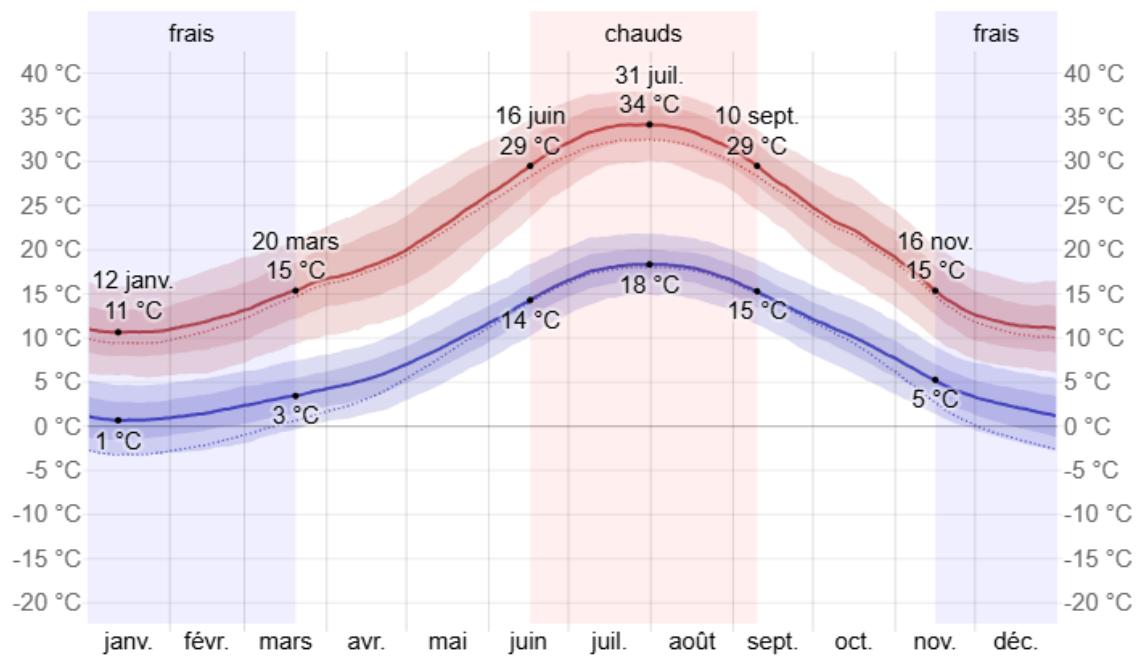


Figure 09: Variation mensuelle des températures minimales et maximales de la région de Frenda, (période 2015-2024)

La figure ci-dessous (fig. 10) montre une caractérisation compacte des températures horaires moyennes pour toute l'année. L'axe horizontal représente le jour de l'année, l'axe vertical l'heure du jour, et la couleur représente la température moyenne pour cette heure et ce jour

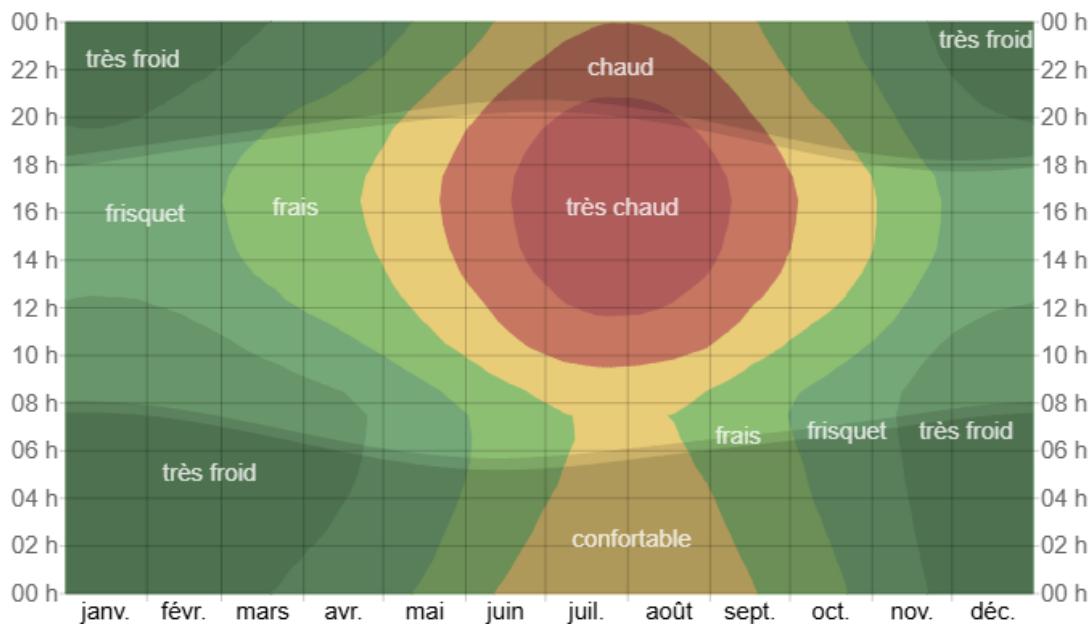


Figure 10: Température horaire moyenne de la région de Frenda, (période 2015-2024)

5-1-2-Précipitation :

Pour montrer la variation au cours des mois et pas seulement les totaux mensuels, nous montrons l'accumulation de pluie au cours d'une période glissante de 31 jours centrée sur chaque jour de l'année. Frenda connaît des variations saisonnières modérées en ce qui concerne les précipitations de pluie mensuelles. La période pluvieuse de l'année dure 10 mois, du 18 août au 20 juin, avec une chute de pluie d'au moins 13 millimètres sur une période glissante de 31 jours. Le mois le plus pluvieux à Frenda est février, avec une chute de pluie moyenne de 50 millimètres. Le mois le moins pluvieux à Frenda est juillet, avec une chute de pluie moyenne de 6 millimètres.(Tab.05)

Tableau 05 : précipitation moyenne mensuelles de la zone d'étude

	janv.	févr.	mars	avr.	mai	juin	juil.	août	sept.	oct.	nov.	déc.
Pluie (mm)	42,8	49,5	46,4	47,9	37,3	15,5	5,7	11,8	25,1	36,0	45,2	41,8

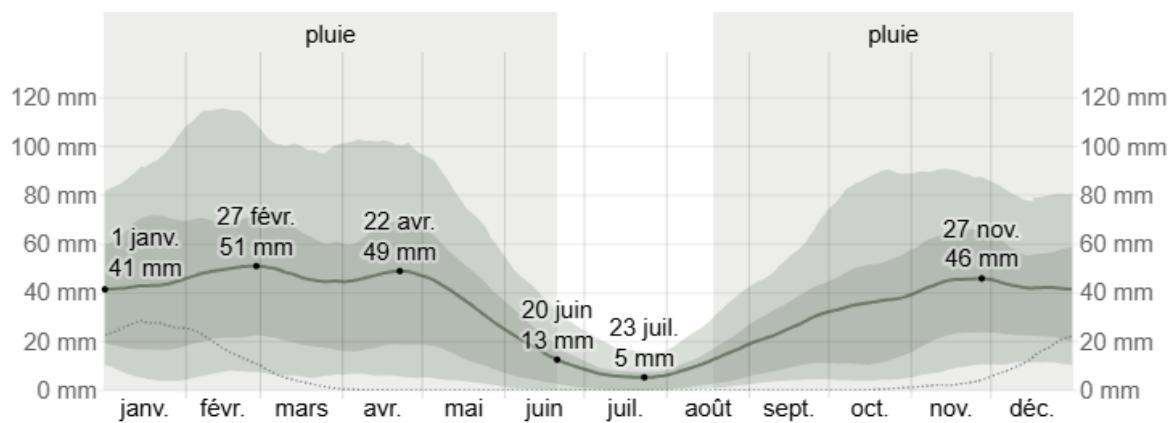


Figure 11: Pluviométrie mensuelle moyenne de la région de Frenda, (période 2015-2024)

5-1-3-Neige :

Comme pour la pluie, nous considérons que la neige a un impact direct sur le renouvellement des eaux souterraines. Et l'alimentation des nappes, notre zone d'étude a connaît une variation saisonnière modérée en termes de chute de neige mensuelle.

La période neigeuse de l'année dure 3,6 semaines, du 7 janvier au 1 février, avec une chute de neige sur une période glissante de 31 jours d'au moins 25 millimètres. Le mois le plus enneigé à Frenda est janvier, avec une chute de neige moyenne de 28 millimètres. La période sans neige de l'année dure 11 mois, du 1 février au 7 janvier. La plus petite chute de neige a lieu aux alentours du 20 juillet, avec une accumulation totale moyenne de 0 millimètre. (fig.12)

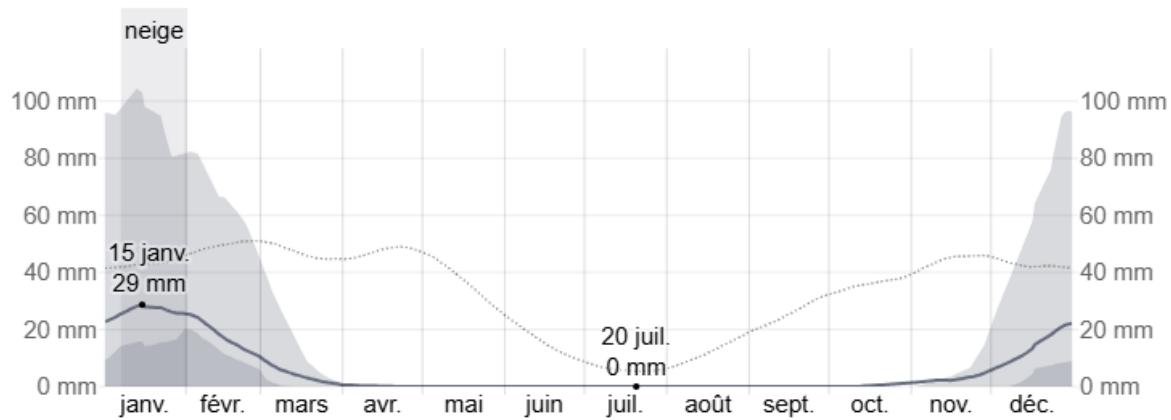


Figure 12: l'enneigement dans la région de Frenda, (période 2015-2024)

5-1-4-Humidité :

Nous estimons le niveau de confort selon l'humidité sur le point de rosée, car il détermine si la transpiration s'évaporera de la peau, causant ainsi un rafraîchissement de l'organisme. Les points de rosée plus bas sont ressentis comme un environnement plus sec et les points de rosée plus haut comme un environnement plus humide. Contrairement à la température, qui varie généralement considérablement entre le jour et la nuit, les

Présentation générale de la zone d'étude

points de rosée varient plus lentement. Ainsi, bien que la température puisse chuter la nuit, une journée lourde est généralement suivie d'une nuit lourde.

Le niveau d'humidité perçue à Frenda, tel que mesuré par le pourcentage de temps durant lequel le niveau d'humidité est lourd, oppressant ou étouffant, ne varie pas beaucoup au cours de l'année, restant pratiquement constant à 0 %. (fig.13)

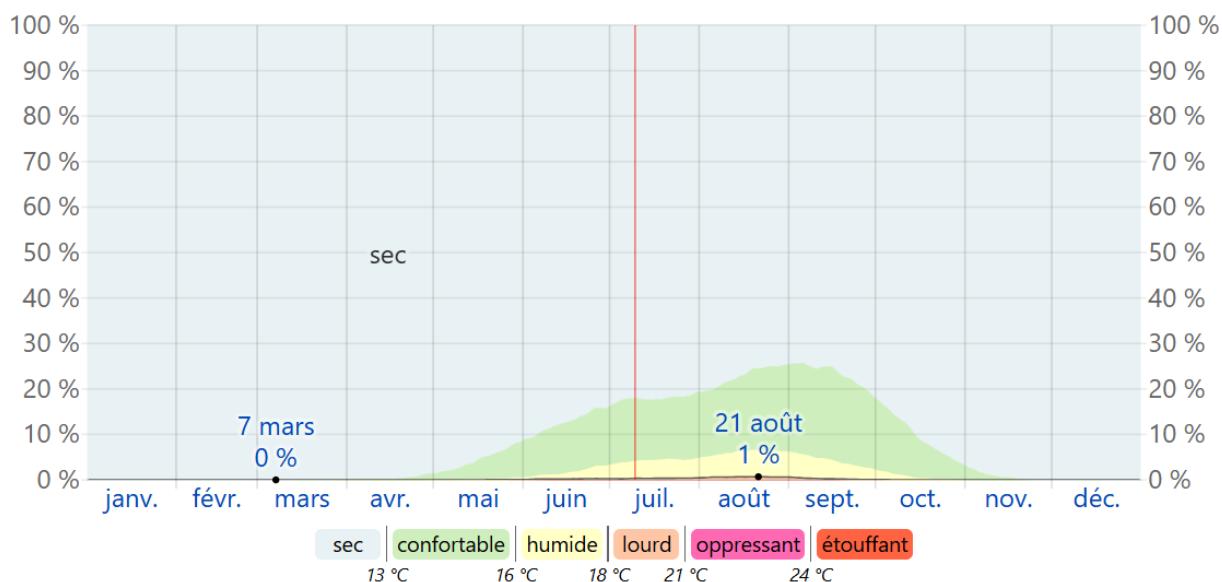


Figure 13: L'humidité de la région de Frenda, (période 2015-2024)

5-1-5-Vent :

La direction et la vitesse dans notre zone d'étude varie au cours de l'année. La vitesse et direction mesurées à 10 mètres au-dessus du sol. Le vent observé à un emplacement donné dépend fortement de la topographie locale et d'autres facteurs, et la vitesse et la direction du vent instantané varient plus que les moyennes horaires. La vitesse horaire moyenne du vent à Frenda connaît une variation saisonnière modérée au cours de l'année. La période la plus venteuse de l'année dure 6,4 mois, du 30 octobre au 12 mai, avec des vitesses de vent moyennes supérieures à 14,5 kilomètres par heure. Le mois le plus venteux de l'année à Frenda est décembre, avec une vitesse horaire moyenne du vent de 16,3 kilomètres par heure. La période la plus calme de l'année dure 5,6 mois, du 12 mai au 30 octobre. Le mois le plus calme de l'année à Frenda est août, avec une vitesse horaire moyenne du vent de 12,7 kilomètres par heure.

Dans notre région d'étude, le vent vient du nord pendant 4,4 mois, et vient le plus souvent de l'ouest pendant plus de 06 mois. (fig.14)

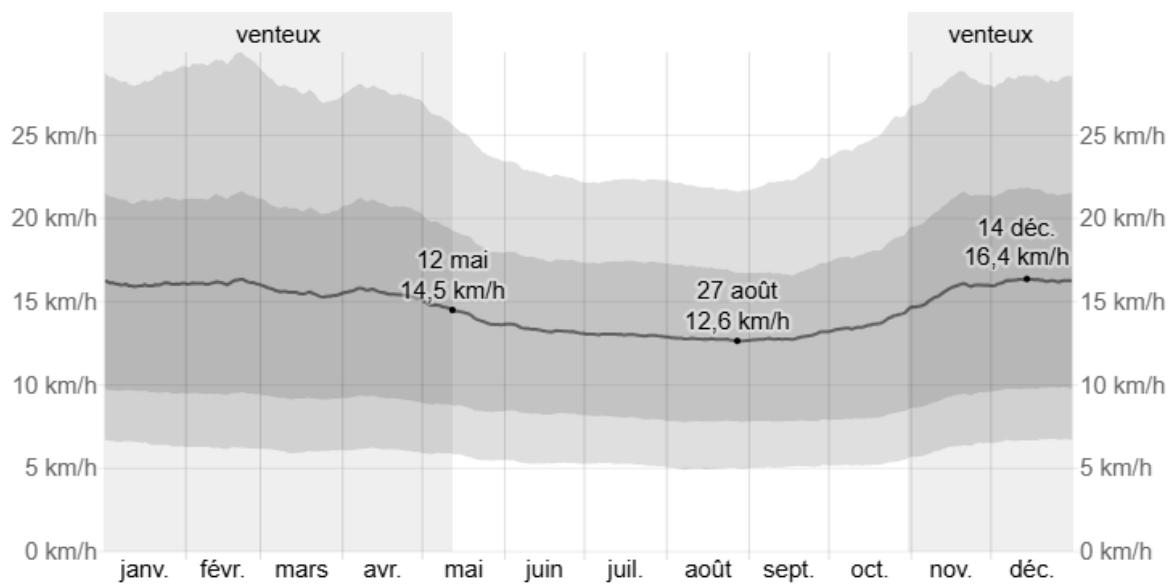


Figure 14: le vent dans la région de Frenda, (période 2015-2024)

5-2-Synthèse climatique :

Pour réaliser la synthèse climatique de notre région d'étude nous avons adopté le diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausson (1953) et le climagramme pluviométrique d'Emberger (1935).

5-2-1-Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausson :

La formule : $P \leq 2T$ permet de déterminer les mois secs et les mois humides, où

P : précipitations mensuelles (mm) ; **T** ° : températures moyennes mensuelles (°C). Un mois sec a des précipitations inférieures ou égales au double de la température, tandis qu'un mois humide a des précipitations supérieures au double de la température. Le graphique ci-dessous illustre les précipitations mensuelles et les températures moyennes mensuelles de la région de Frenda.

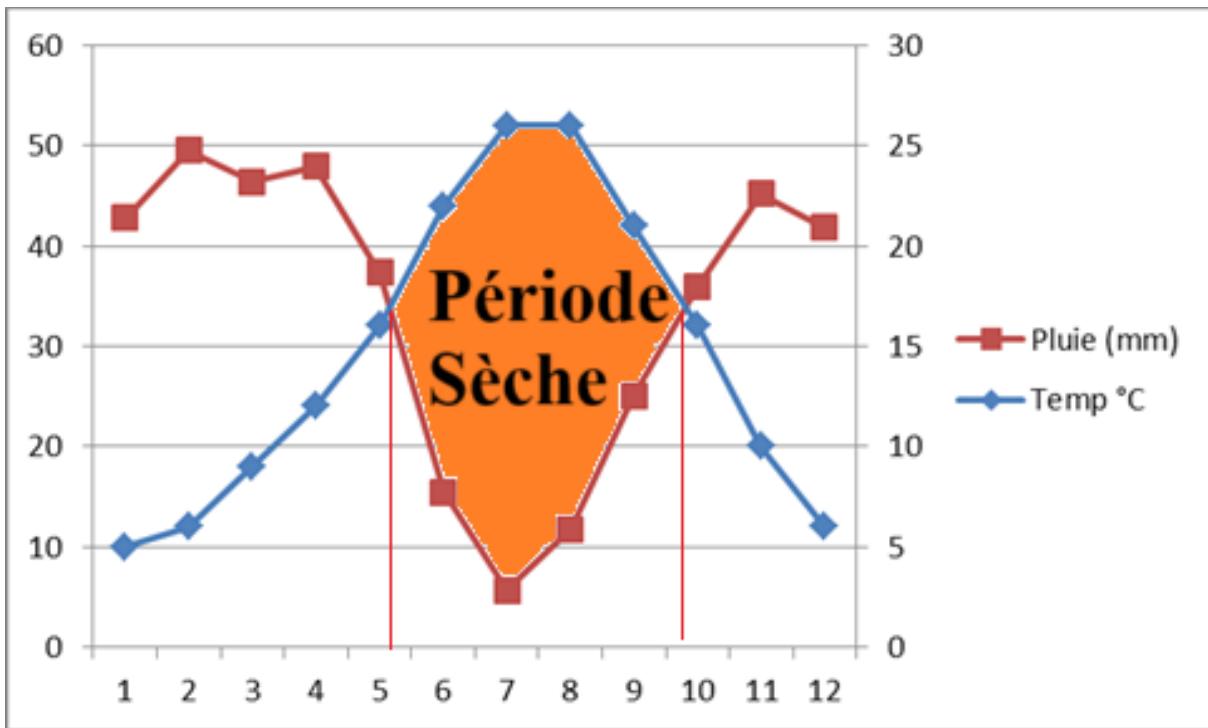


Figure 15: Diagramme Ombrothermique de la région de Frenda (période 2015-2024)

Selon les graphiques précédent(fig. 15), la saison sèche dans notre zone d'étude s'étale de la fin du mois de mai jusqu'au début octobre et dure plus de quatre mois, la saison humide quant à elle s'étale sur plus de sept mois de l'année qui restent.

5-2-2 -Quotient pluviométrique d'EMBERGER

Le climagramme pluviométrique d'EMBERGER (1935) permet de définir l'étagement d'une station donnée par la formule suivante :

$$Q_2 = 2000 \times P/M^2 \cdot m^2$$

Avec :

P = Précipitation moyenne annuelle en mm.

M = Température moyenne maximale du mois le plus chaud en °K.

m = Température moyenne minimale du mois le plus froid en °K.

Emberger (1955) a établi pour la région méditerranéenne un climagramme portant le Q_3 en ordonnée, "m" en abscisse, l'interaction de ces deux données permet de situer les stations météorologiques.

En 1969, Stewart établit à partir d'une simplification de la formule précédente pour l'Algérie et le Maroc une nouvelle formule du quotient pluviométrique qui se présente comme suit:

$$Q_3 = 3.43 P/M \cdot m$$

Par l'utilisation de cette formule, nous avons trouvé :

- selon tableau des températures: $M = 26 \text{ } ^\circ\text{C}$, $m = 5 \text{ } ^\circ\text{C}$

Présentation générale de la zone d'étude

- selon tableau des précipitations: $P = 405 \text{ mm}$

Donc $Q_3 = 66,15$

Ces valeurs reportées sur le climagramme rattachent la région de Frenda à l'étage Semi-Aride à hiver tempéré. (Figure 16).

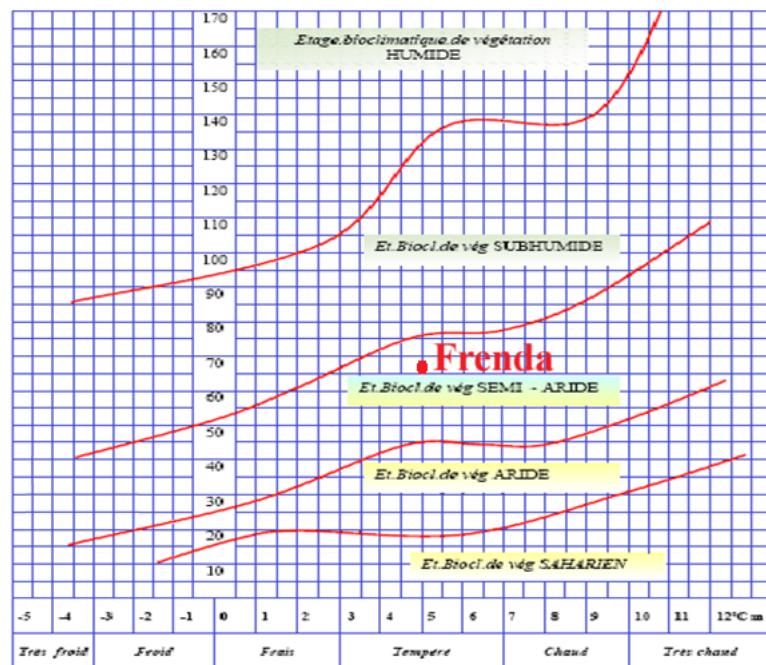


Figure 16: Position de notre région d'étude dans le climagramme d'Emberger (2015-2024).

Chapitre 2 : Géologie et Géophysique

1. Introduction

Cette étude a pour objectif de contribuer à la mise en valeur des plaines alluviales des oueds el Abd et Taht. La compréhension du système hydrogéologique nécessitait que l'observation soit étendue à l'ensemble de la surface des deux sous - bassins versants des oueds el Abd et Taht pour une période d'observation suffisante (Fig. 01).

Les travaux ont été concentrés dans les plaines alluviales des oueds el Abd et Taht, outre les observations nécessaires en géologie et géophysiques , hydrochimie, hydrogéologie, hydro-climatologie avec une partie socioéconomiques qu'elle va remplacer la partie modélisation des eaux ,ces parties qui sont échelonnées tout au long de l'étude, certains travaux ont fait l'objet de rapport partiels cités en bibliographie : ils concernent géologie et une partie de l'hydrogéologie et la prospection géophysique au niveau de ces plaines (Safa, 2010 ; Strojexport, 1976).

A l'exception des travaux de géophysiques par sondages électriques, toute les mesures de terrain ont été réalisées par les services de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (Services hydrologie et hydrogéologie) (Safa, 2010 ; Strojexport, 1976).

Cette étude s'intéresse spécifiquement aux deux sous-bassins versants El Abd et El Taht, qui constituent des unités hydrologiques appartenant au bassin versant de l'oued Mina(fig 01). Ces deux sous-bassins jouent un rôle important dans la dynamique hydrologique et l'exploitation des ressources naturelles locales. Ils concernent particulièrement trois régions principales : Frenda, Takhemert et Aïn El Hadid, qui représentent des zones contrastées du point de vue topographique et hydrologique. L'analyse de leurs superficies respectives permet de mieux cerner l'étendue et la contribution de chaque région dans l'ensemble du bassin (Tableau 6).

Tableau 6. Superficies des communes situées dans les sous-bassins El Abd et El Taht

Région (Commune)	Superficie du bassin-versant (km ²)
Frenda	201,83
Takhemert	569,53
Aïn El Hadid	443,70
Total (sous-bassins El Abd et El Taht)	1 214,06

2. Localisation et situation géographique

Cette étude est menée dans les plaines alluviales de la vallée des oueds El-Abd et El-That (fig.02), situées dans trois régions de la wilaya de Tiaret, au nord-ouest de l'Algérie (Frenda, Ain Hédi et Takhemert). Elle couvre une superficie de 44 630 km², entre les latitudes 35°40' et 34°40' N et les longitudes 0°20' et 1°10' E. Ces plaines font partie du sous-bassin versant de la vallée de des oueds El-Abd et El-That, qui appartient au bassin versant de la vallée de la Mina. Ce dernier fait lui-même partie du grand bassin de la vallée du Chélif.

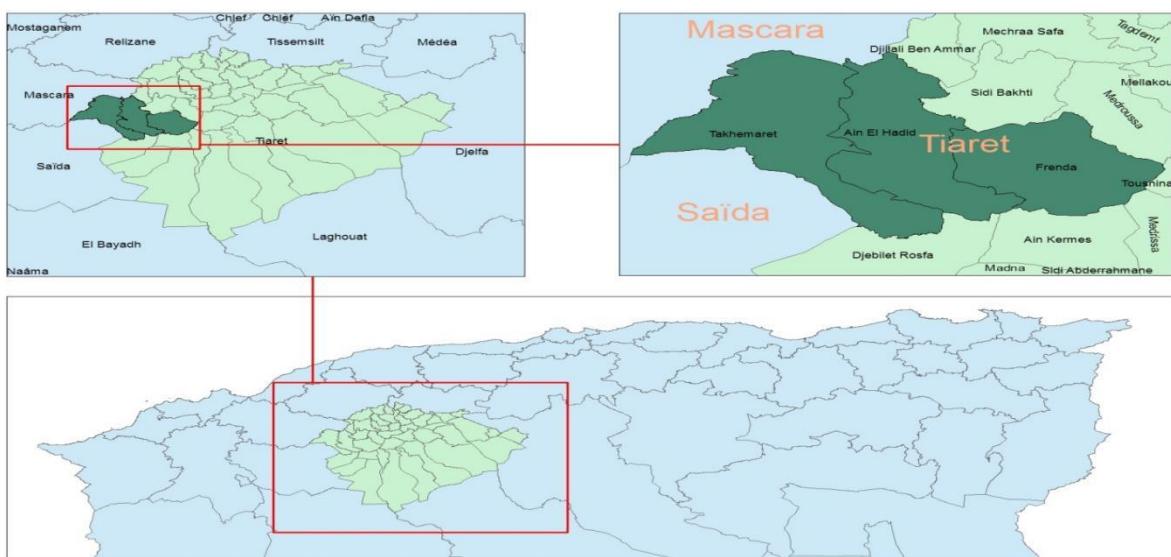


Figure 01. Localisation de la région d'étude

Le bassin du Chélif dont dépend le bassin versant de l'oued Mina occupe une superficie totale de 44.630 km², situé entre 34° et 36° 30' de latitude nord et 0° et 3° 30' de longitude Est, qui a la forme d'un fer de hache d'axe nord-sud « J. Boulaine ». Le bassin versant de la Mina à des caractéristiques morphologiques très différentes de ceux des bassins versants des autres affluents du Chélif ; c'est d'une part qu'il s'est établi à l'extrémité occidentale du massif de l'Ouarsenis et en partie dans une zone de plaines d'effondrement (Mina-Ghriss) et d'autre part sa partie haute est constituée par le haut pays oranais ou la « meseta oranaise » formée par les formations tabulaires jurassiques.

A l'aval du bassin versant de l'oued Mina se situe la plaine alluviale de la région d'étude (fig.01) qui a fait l'objet de plusieurs études; sur le plan géographique, cette zone est bordée par les monts du Dahra au Nord, par le massif de Bel Hacel au Nord-ouest, plus à l'Ouest par le plateau de Mostaganem, par les monts du Béni Chougrane et le massif de l'Ouarsenis au

Sud formant l'ossature de la bordure Sud du bassin du bas Chélif.

Généralités :

La région d'étude, représentée par les plaines alluviales observées, s'étend légèrement au-delà de la surface du bassin versant de la Mina.

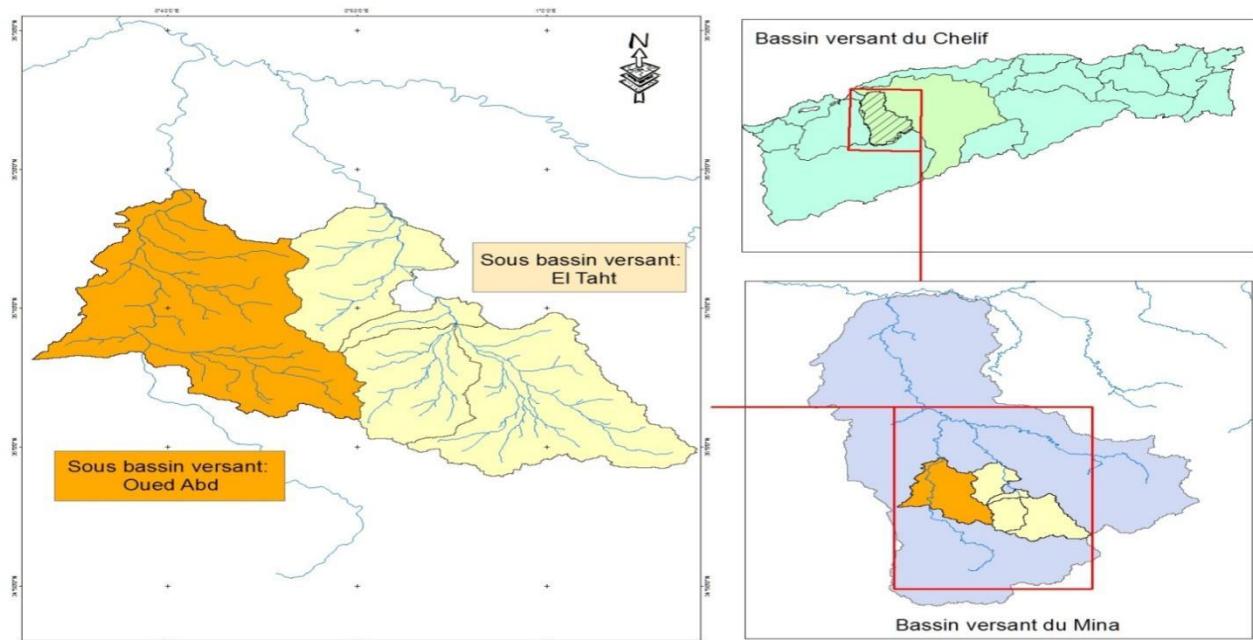


Fig. 02 : Situation géographique des deux sous-bassins versants El-Abd et El-Taht

Le bassin de l'oued El Taht, situé à l'est de son voisin de oued El Abd, est constitué d'une plaine d'altitude variant de 5 à 700 m, dominée par une couronne de djebels atteignant 1 200 m (fig. 02). Le bassin de l'oued El Abd, plus vaste, se compose de deux zones très distinctes :

- **Au sud**, un vaste plateau d'une altitude moyenne de 950 m, de nature karstique, s'étendant jusqu'à la région du Chott Chergui. Ce plateau représente le versant oriental du large ensemble karstique qui s'étend entre Saïda et Takhmert.
- **Au nord**, une plaine semblable à celle de l'oued El Abd, délimitée à l'est et à l'ouest par de hautes chaînes de djebels, formant entre elles des angles caractéristiques.

Au centre de cette plaine émerge un horst karstique de forme triangulaire, traversé par l'oued. Les deux sous- bassins sont ainsi séparés par une cordillère commune de djebels s'étendant du nord au sud-est, qui domine l'ensemble de la région.

3- Cadre géologique

3. 1- Généralités sur la géologie de l'Afrique du Nord :

L'Afrique du Nord, située entre la Méditerranée et le craton africain, peut être subdivisée en trois grandes zones géologiquement distinctes, du nord au sud (fig. 03) :

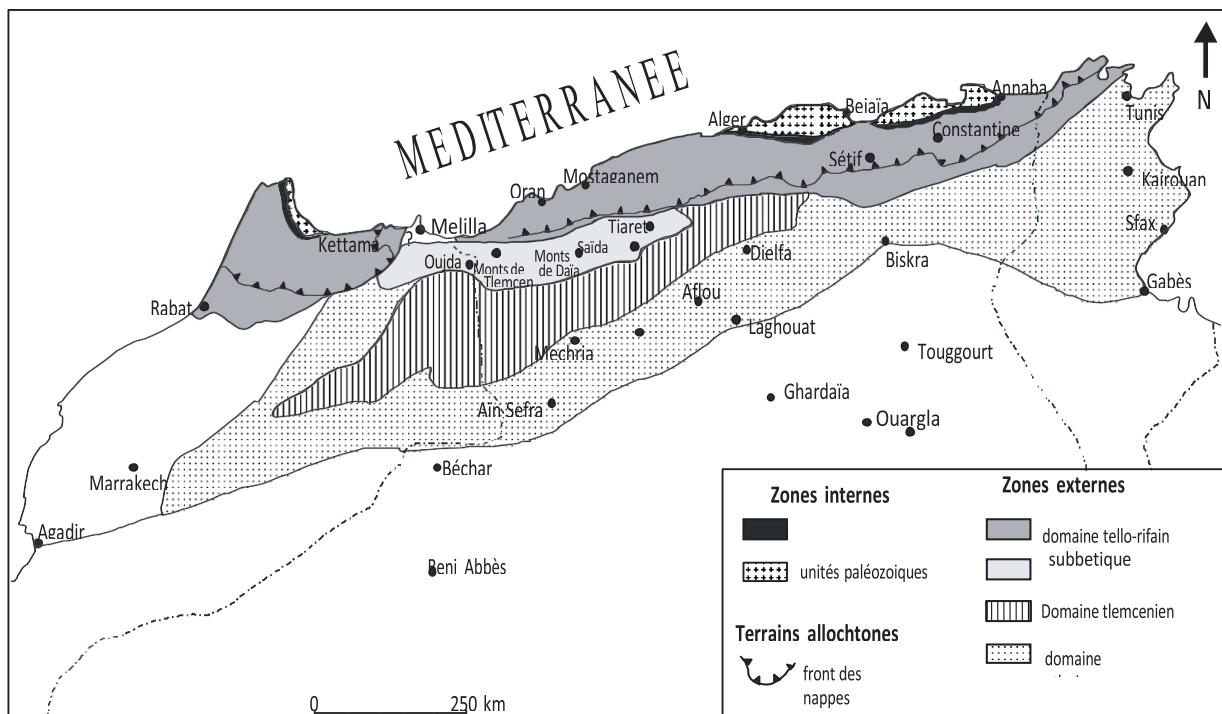


Fig.03 : Schéma structural de la chaîne alpine De la méditerranée occidentale (Safa, 2010)

3.1.1 – Le domaine Tello-rifain :

Ce domaine constitue une portion de la chaîne alpine, s'étendant à l'ouest jusqu'aux chaînes Bético-Baléares au niveau de l'arc de Gibraltar, et à l'est jusqu'au système Sicilo-Calabrais.

3.1.2 – Le domaine Atlasique :

Il représente l'avant-pays tellien de la chaîne alpine. Dans sa partie centrale, il est bordé au nord par l'ensemble de la Meseta oranaise et par le domaine tlemcénien.

3.1.3 – Le domaine Saharien :

Ce domaine correspond à une région stable, appartenant à la plaque africaine.

3. 2- Géologie de l'Algérie du Nord :

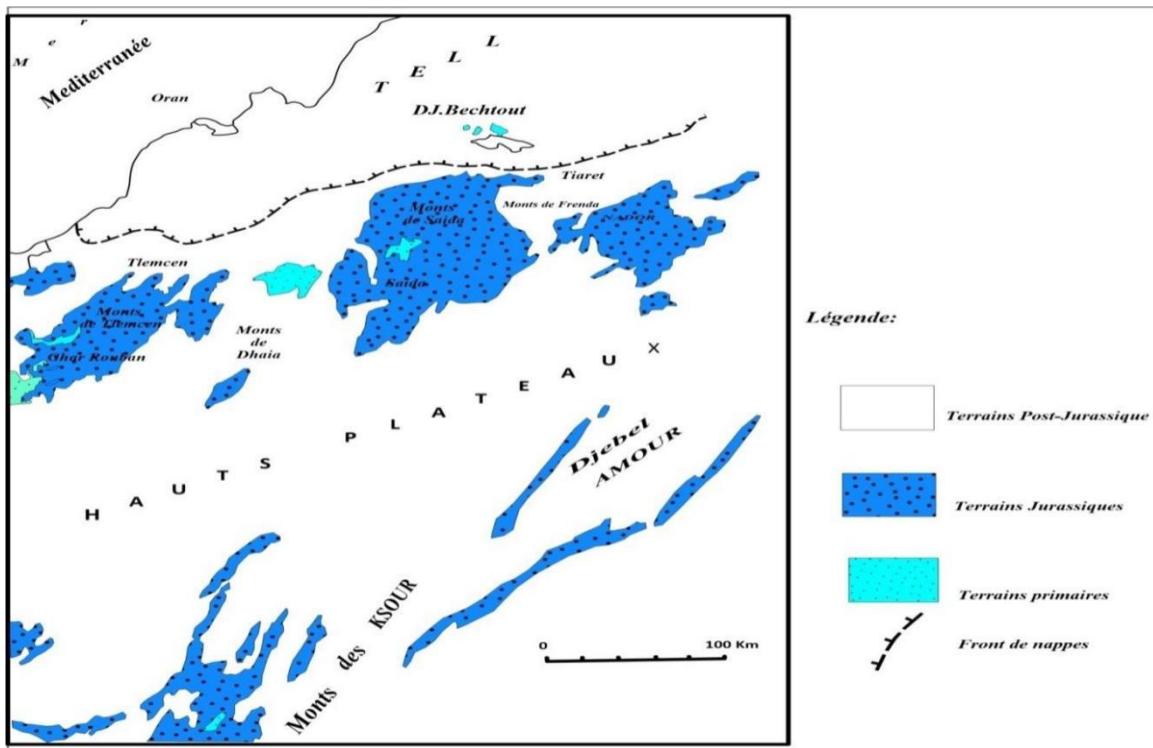


Fig. 04 : Carte géologique simplifiée de l'Oranie (OUARDAS, 1983)

L'Algérie du Nord a été marquée par deux importantes manifestations tectoniques (fig.04), une orogénèse hercynienne et une orogénèse alpine dominante ; qui ont donné naissance à trois grands ensembles structuraux de l'Algérie septentrionale, on y distingue du Nord au Sud

3. 2.1- Le domaine Tellien :

3.2.1.1- Le Tell septentrional :

- les massifs anciens ou noyaux kabyles autochtones
- les chaînes calcaires ou dorsales kabyle
- les flyshs

3. 2.1.2- Le Tell méridional :

Superposition de l'autochtone intra-tellien et de nappes de glissement

3.2.2- Le domaine Présaharien :

3.2.2.1- Les hautes plaines et hauts plateaux :

- les Hautes plaines oranaises bordées au nord par le domaine tlemcenien dans lequel se situe le bassin versant de la Mina
- les Hautes plaines algéroises
- les Hautes plaines constantinoises

3.2.2.2- l'Atlas saharien :

3.2.3- Le domaine de la plateforme-saharienne :

- le Sahara occidental (haut Sahara)
- le Sahara oriental (bas Sahara)

4- Géologie du secteur d'étude

4.1 - Lithostratigraphie :

4.1.1- Lithologie :

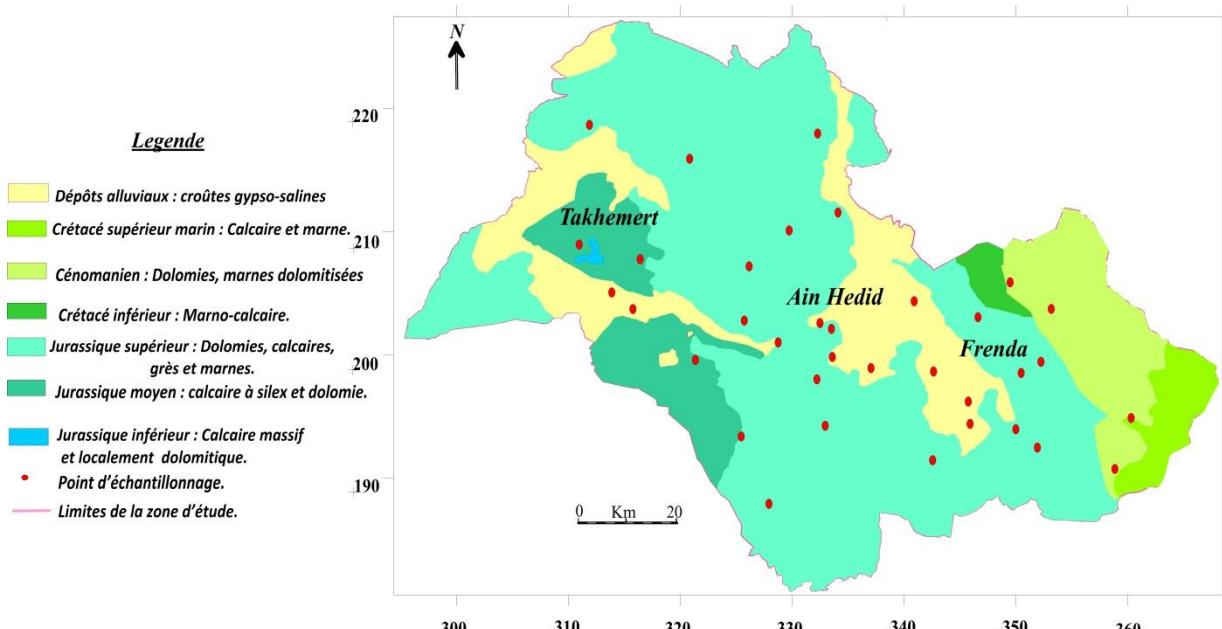


Figure 05: La carte géologique des plaines alluviales des oueds El Abd et El Taht

Au nord des plaines alluviales des oueds El Abd et El Taht (fig. 05), où se trouve et s'écoule également l'oued Mina, le paysage est dominé par des marnes tertiaires particulièrement sensibles à l'érosion. Dans la partie nord-est de ces plaines, ces formations marneuses sont parfois surmontées par des bancs de grès calcaires et de dolomies, ou bien recouvertes par des couches d'aggrégats.

Dans la zone centrale et occidentale de la partie nord, ces bancs gréseux ne subsistent que partiellement, voire disparaissent complètement. L'épaisseur importante des marnes (au moins 100 mètres), combinée à des précipitations hivernales intenses, favorise la formation de ravines profondes et marquées.

Dans la partie centrale et sud-est des deux sous-bassins versants étudiés (oueds El Abd et El Taht), ces cours d'eau ont creusé de larges vallées. Les marnes jurassiques qui affleurent dans ces vallées restent également vulnérables à l'érosion, bien qu'un niveau d'érosion relativement stable y ait été atteint. Les phénomènes d'érosion marquée y sont donc localisés et ponctuels.

La partie sud-ouest de la zone d'étude est composée d'un complexe calcaro-dolomitique datant du Jurassique moyen. Cette formation, aux caractéristiques rocheuses affirmées, offre une forte résistance à l'érosion.

4. 1. 2- Stratigraphie :

4. 1. 2. 1 - Trias – Infralias :

Le substratum proprement dit est constitué de formations basaltiques datées du Lias. Bien que ces formations n'affleurent pas à la surface dans les limites des bassins étudiés, elles ont été atteintes par plusieurs forages profonds. C'est notamment le cas du forage de Bou-Noual, qui atteint une profondeur de 365 mètres, le forage de Métameur à 138,30 mètres de profondeur, ainsi que du forage dénommé « Km 50 », profond de 412 mètres. Dans ces trois cas, le niveau basaltique a été intercepté mais n'a pas été entièrement traversé.(safa. 2010)

4.1. 2. 2 - Jurassique inférieur et moyen :

Les dolomies jurassiques (Aalénien–Dogger) se développent en deux niveaux distincts, séparés par l'intercalation du Toarcien, une formation nettement plus argileuse.

- **Le premier niveau**, situé en dessous, est moins épais et présente une continuité limitée. Il se caractérise par des variations fréquentes de faciès, marquant des transitions vers des conglomérats ou des calcaires dolomitiques.
- **Le second niveau**, situé au-dessus, présente une lithologie plus homogène. Il est

constitué, dans la majorité des cas, de dolomies massives. L'épaisseur moyenne de cet ensemble est estimée à environ 140 mètres. Il est attribué aux étages Aalénien, Bajocien et Bathonien.

- Série lithostratigraphique de bas en haut (fig. 06) :

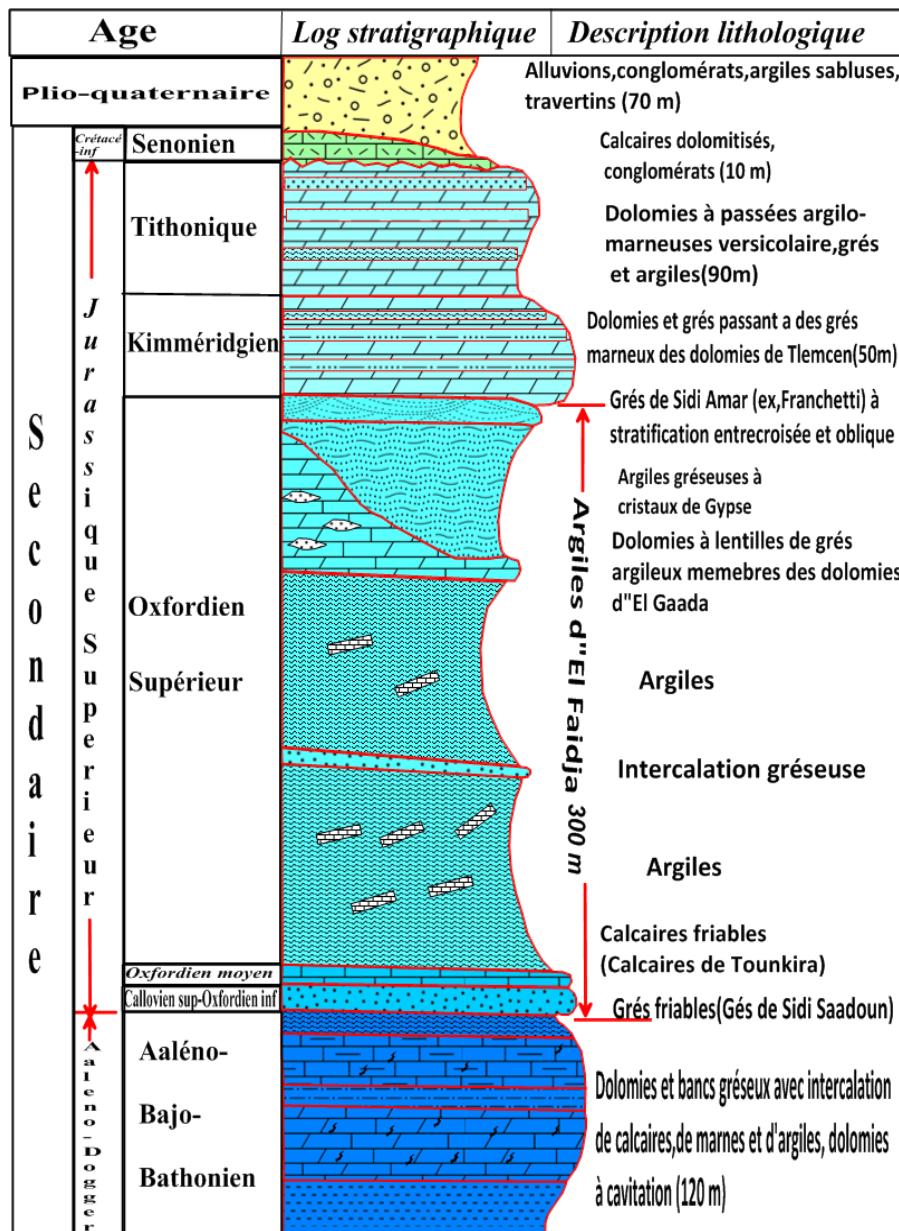


Figure 06 : Logs lithostratigraphique de la région d'étude (Safa, 2010)

La région d'Ain Dez au Sud-ouest de la région étudiée a fait l'objet d'une observation plus

détaillée ; car dans cette zone on observe que la structure géologique influence la piézométrie et les conditions aux limites de l'aquifère.

La distinction de trois membres dans l'ensemble du Jurassique inférieure et moyen est ici suffisante en général :

1° le membre inférieur dolomitique d'une épaisseur moyenne de 50 m appartenant au Lias inférieur et moyen et qui affleure essentiellement au Sud-ouest.

2° Le membre médian marneux gris appartenant au Toarcien d'une épaisseur moyenne de 20 m affleure au Sud ouest et, également de façon très localisée dans le fond des gorges dolomitique de l'oued el Abd.

Le Toarcien : peu épais (25 à 30 m au maximum) mais qui représente une couche repère, imperméable, s'étendant sur une grande superficie. Au Nord le Toarcien est absent.

3° le membre supérieur dolomitique et calcaire appartenant à l'Aaléno-Dogger débute par des bancs étroits lesquels deviennent plus massifs dans la partie supérieure de la formation. Ce membre a une épaisseur moyenne de l'ordre de 150 m. Il constitue la majeure partie des affleurements du jurassique inférieur et moyen et est atteint par tous les sondages.

4. 1. 2. 3 - Jurassique supérieure :

Les formations du Jurassique supérieur couvrent la moitié Nord et l'Est du périmètre d'étude ; ils occupent la totalité du bassin de l'oued et Taht et près de la moitié du bassin de l'oued el Abd.

Le secteur fait partie des monts de Frenda dans lesquels on assiste à une zone de sédimentation deltaïque perturbée par les apports terrigène créant ainsi une série flyshoïde bien développée.

L'oued et Taht draine un massif mésozoïque essentiellement dolomitique dans la partie amont de son bassin versant, tandis que dans sa partie aval, il entaille les alluvions quaternaires laissant apparaître les argiles gréseuses de l'oxfordien supérieur.

Les coupes des forages localisées dans les trois régions frenda, ain hedid et takhemert ,(fig. 07,08 ;09) montrent une évolution de l'épaisseur des dolomies d'el Gaada vers le Sud et le Sud-Ouest.

La coupe (fig 06) montre aussi une évolution de l'épaisseur des dolomies d'el Gaada du Nord-est vers le Sud-ouest et l'importance des affleurements argileux de l'oxfordien supérieur

La coupe (fig 9) montre une diminution de l'épaisseur des formations carbonatées du Jurassique supérieur vers le Nord-ouest et la compartimentation de ces dernières par les failles.

4. 1. 2. 4 - Aaléno-Bajo-Bathonien :

Il s'agit d'une formation essentiellement dolomitique présentant une alternance de bancs gréseux et de calcaires marneux. A l'ouest du sous bassin de l'oued et Taht, sa formation admet un passage progressif de l'Aalénien au Bajocien grâce aux quartzolites à radiolarites (Safa, 2010).

L'Aaléno-Bajo-Bathonien n'affleure que dans la partie Sud Ouest du sous bassin de l'oued et Taht au niveau de koudiet ben Attal à la faveur des failles et de l'érosion, il est confiné sous les formations du Jurassique supérieur. La dolomie est bien cristallisée, très fissurée, présentant des cavités et des chenaux de dimension centimétrique à décimétrique, de couleur grisâtre à blanchâtre et parfois rougeâtre (Safa, 2010).

Les bancs gréseux sont souvent dolomités d'épaisseur métrique et de couleur grisâtre à rougeâtre.

Les bancs de calcaire sont compacts à la base et tendre au sommet, ils tendent à passer à des marnes et argiles de couleur grisâtre, verdâtre, rougeâtre et jaunâtre, les bancs sont d'épaisseur métrique et contiennent parfois des concrétions dolomitiques.

L'Aaléno-Bajo-Bathonien est atteint par de nombreux forages son épaisseur moyenne est de 120m, (fig. 7, 8, 09)

Prof et Cotes	Tubages et cimentation	Plan d'eau	Coupe	Description géologique	Etage
0				Calcaire	
20				Marne grisatre, verdatre et brunatre	
40				Marne grisatre avec passage du grés	
60					
80					
100					
120				Marne grisatre et rougatre	Calloovo-Oxfordien
140				Marnes grisatre avec centration des dolomies	
160				Dolomies fissurés avec des passages d'argile grisatre	
180				Dolomies blanchatres a grisatres dur fissurés	
200				Dolomies blanchatres avec des passages de marne grisatre	
220				Marne grisatre avec des passages d'argile et dolomies rosatre	
240					
260				Marne rougatre	
280					
300					

Figure 7: Forage d'Ain el Hadi (Safa, 2010)

X = 344.925

Y = 194.650

Z = 845

Profondeurs et cotes	Plan d'eau	Coupe	Description géologique	Étage
0			Terre végétale Argile jaunâtre à grisâtre avec Passage de calcaire dur blanchâtre	
25				
50				
75				
100				
125			Marne grisâtre	
150				
175				
200				
225				
250				
275			Marne grisâtre avec passage de	
300			Calcaire dur blanchâtre à	
325			Grisâtre et de dolomies gréseux	
350				
375			Dolomies rougeâtre fissuré avec	
400			Passage de marne jaunâtre	
425			Dolomies blanchâtre très fissuré	
450			Avec galeries Alternance de dolomie blanchâtre et Du marne verdâtre et noirâtre	
				A . B . B

Fig. 8 : Forage de Frenda

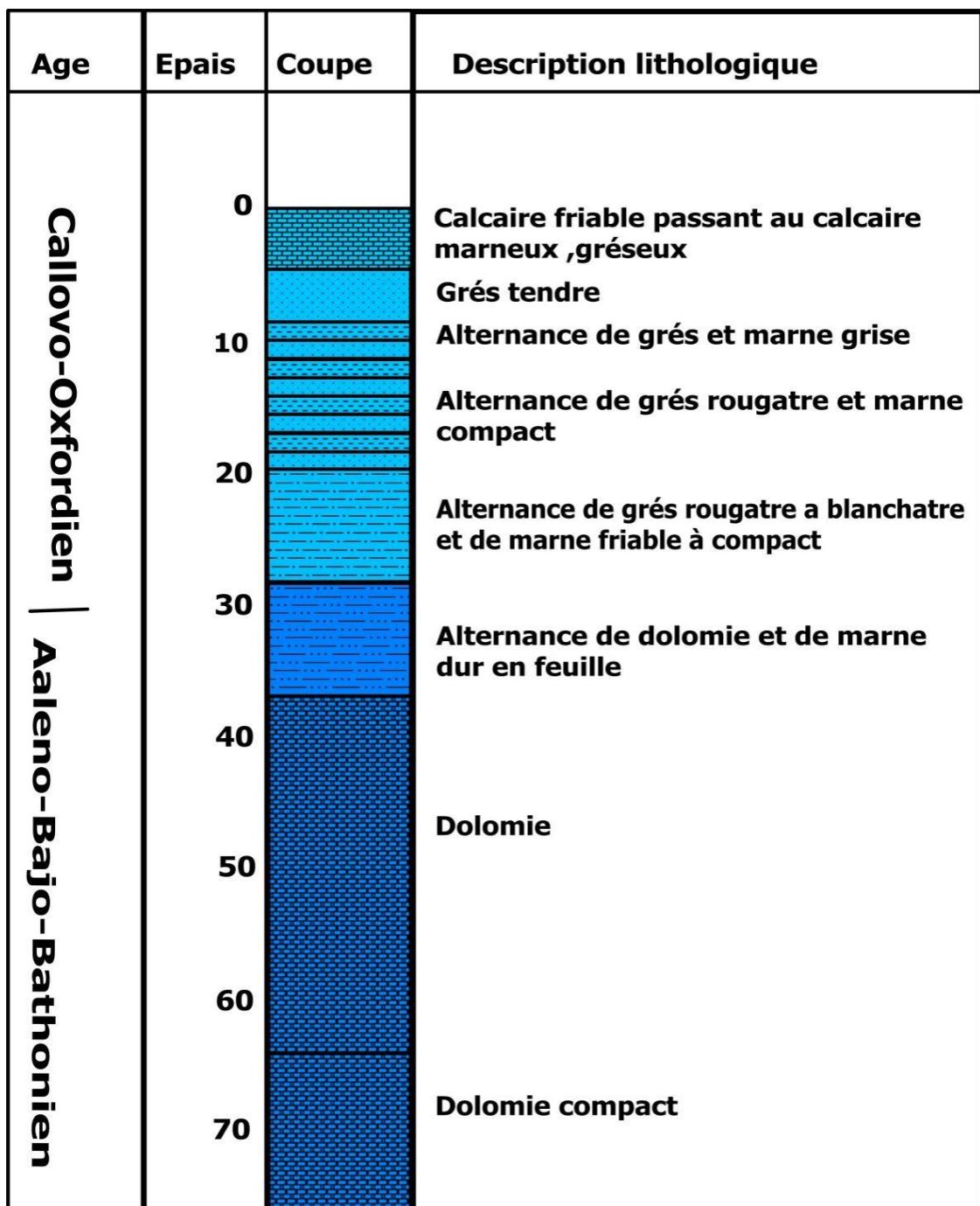


Figure 09: Forage de Takhmert

4. 1. 2. 5 - Le Callovo-Oxfordien :

Il prédomine largement les autres formations. Il est formé de marnes et d'argiles verdâtres et de bancs de grés et constitue des reliefs mous. L'épaisseur est de l'ordre de 200 à 250 m.

Le Callovo-Oxfordien : très variable en ce qui concerne la relation de proportionnalité des composants argileux et gréseux ; son épaisseur peut dépasser 400m (djebel Er Rebib) et, diminue jusqu'à 150 m (Safa, 2010).

4. 1. 2. 5. 1 - Oxfordien moyen :

Une formation de calcaire friable reposant sur les grés de Sidi Saadoun au Sud d'El Gaada, la formation est de faible épaisseur, elle est appelée calcaires de Tounkira.

4. 1. 2. 5. 2 - Oxfordien supérieur :

Il s'agit d'une formation principalement argileuse, appelée argiles de Faïdja, que l'on retrouve plus à l'est, au niveau du djebel Nador. Elle constitue le fond de la dépression du sous-bassin de l'Oued et Taht, et est bien développée, marquant les versants du bassin par des corniches tendres.

La majorité des argiles de Faïdja présente un faciès similaire à celui des argiles de Saida. Leur substratum est formé par les grès de Sidi Saadoun (Caratini, 1967), d'âge Callovo supérieur à Oxfordien inférieur, affleurant à environ 3 km d'El Gaada.

Cette série argileuse comporte des intercalations de bancs décimétriques de grès compact, rougeâtre à brunâtre, avec des concrétions siliceuses. Vers le sommet de la formation, la série devient argilo-gréseuse, présentant un faciès très pelletoïde, parfois avec des grains grossiers de couleur blanchâtre à grisâtre. On y observe fréquemment des cristaux de gypse de taille centimétrique.

Enfin, une formation carbonatée se développe dans la partie sommitale des argiles de Faïdja. Il s'agit de dolomies dont l'épaisseur ne dépasse pas deux mètres le long du versant est du sous-bassin de l'Oued et Taht, mais qui s'épaissent considérablement, atteignant environ cinquante mètres, le long de la limite sud, au niveau d'El Gaada (fig. 10 et 11).

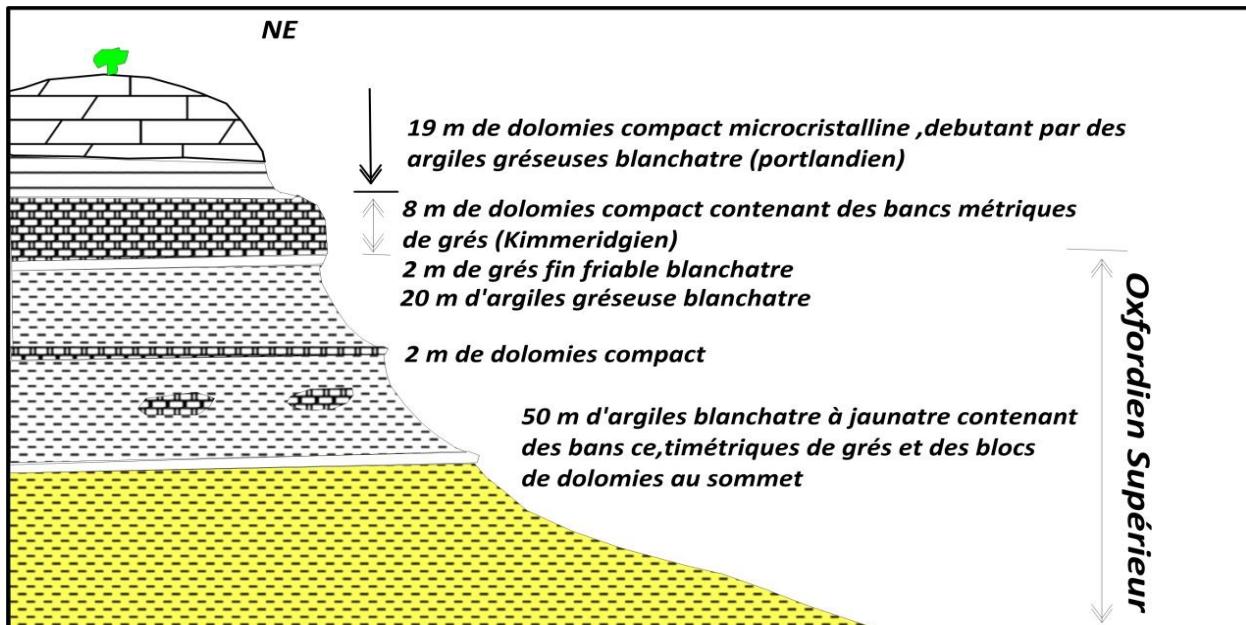


Figure 10 : Coupe géologique au niveau du Djebel Ahloudj et el Gaada

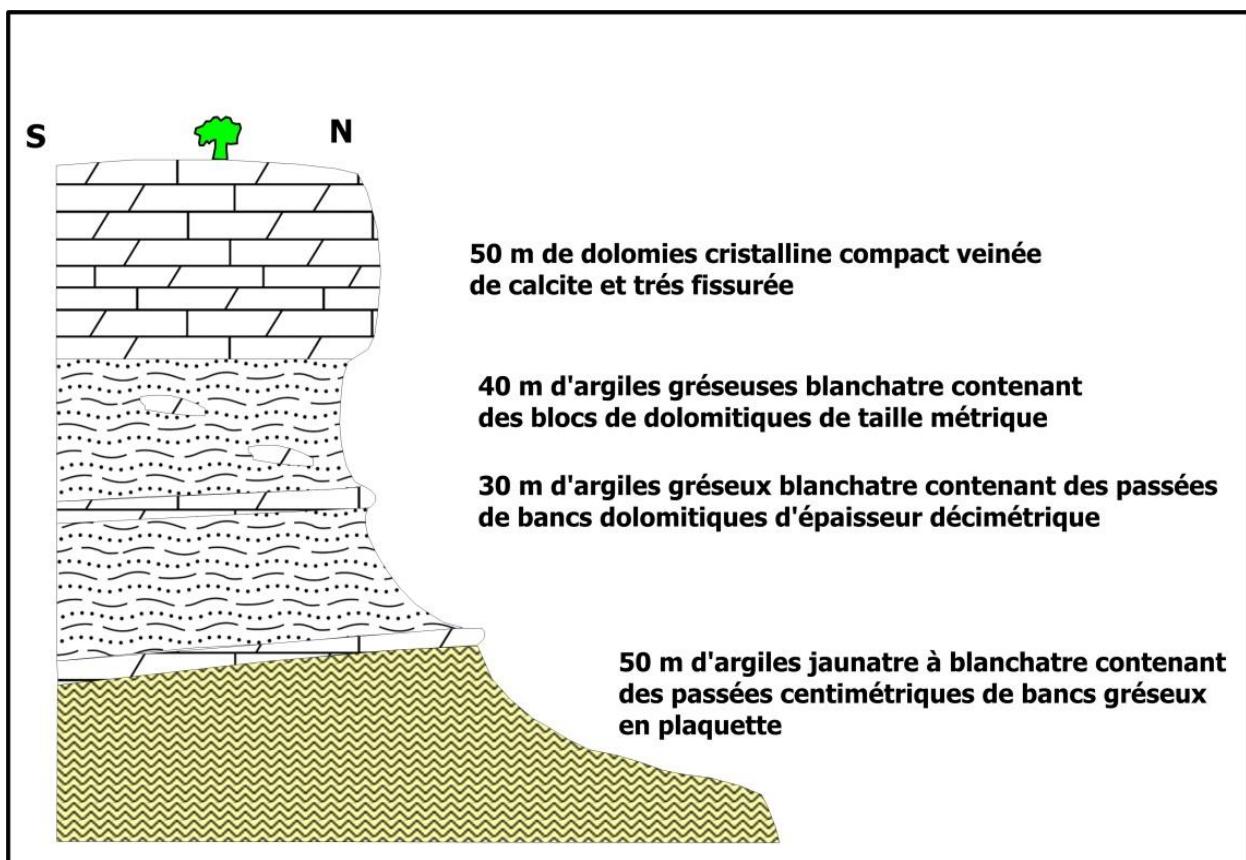


Figure 11: Coupe géologique de l'oxfordien supérieur à el Gaada (Safa, 2010)

Cette variation d'épaisseur reflète l'irrégularité du fond topographique au moment de la sédimentation. Les dolomies forment les deux falaises aux pentes abruptes situées aux limites nord et sud d'El Gaada, donnant au site une apparence perchée avec une surface subtabulaire fragmentée par des failles et inclinée vers le nord-ouest. Ces dolomies sont cristallines, fortement fissurées, parcourues de veines de calcite blanchâtre, et présentent une teinte grise, brunâtre à noire en surface, donnant à l'ensemble un aspect ruiniforme caractéristique.

Sur le versant nord d'El Gaada, elles débutent par une alternance avec des lentilles de grès argileux tendre, blanchâtre à jaunâtre, d'environ trois mètres d'épaisseur, constituant le membre des dolomies d'El Gaada.

La fin de l'Oxfordien supérieur est marquée par des dépôts de grès similaires à ceux de Boumedine (ex. Franchetti). M. Benest (1985) a démontré que la limite supérieure des argiles de Faïdja est hétérochrone : elle est plus récente à l'est, au djebel Nador (Kimméridgien inférieur), qu'à l'ouest.

Le grès est friable, à grains fins, de couleur grisâtre en surface et blanchâtre à la cassure, avec des intercalations argileuses verdâtres. Il présente une stratification oblique et entrecroisée liée à des phénomènes de chenaux (Ouardas, 1983), son épaisseur varie de 0 à 10 mètres. L'épaisseur moyenne de l'Oxfordien supérieur est d'environ 300 mètres.

4. 1. 2. 6 - Le Lusitanien :

Le Lusitanien est beaucoup moins répandu et occupe une position élevée, constituant le flanc des djebels. Il se compose de bancs gréseux alternant avec des couches argileuses et calcaires, pour une épaisseur totale d'environ 200 à 250 mètres.

Les grès du Lusitanien se trouvent principalement à la périphérie orientale de la zone. Leur épaisseur diminue dans le sens opposé à celle du Callovo-Oxfordien, passant d'environ 200 mètres à l'extrémité occidentale de la coupe géologique Ouest-Est à seulement 70 mètres au niveau du djebel Boumaaza.

4. 1. 2. 7- Le Kimméridgien :

Cette formation est représentée par des dalles dolomitiques qui couronnent les djebels. Ces dalles, de surface relativement réduite, dominent les vallées des oueds El Abd et Taht, avec une épaisseur variant entre 50 et 120 mètres. Les dolomies du Kimméridgien apparaissent sous forme de barres aux sommets les plus élevés, notamment près de Frenda et dans le groupement des djebels El Gaada et Boumaaza, constituées de débris de bancs basal d'une épaisseur de 10 à 20 mètres.

On retrouve également une formation de dolomies de Tlemcen, formant une bande d'environ trente mètres d'épaisseur le long du versant est du sous-bassin de l'Oued et Taht, entre Kef Mellah et Dir Behar, où cette formation s'enfonce sous les calcaires sénoniens.

Ces dolomies sont cristallines, parfois microcristallines, avec de gros galets leur conférant un aspect bréchique. Leur couleur varie du grisâtre au noirâtre, verdâtre et parfois violacée. Elles se présentent en bancs massifs, alternant avec des couches métriques de grès dolomitiques, durs et compacts, qui évoluent vers des bancs de grès marneux et friables. La surface des dolomies est généralement altérée, avec des champs de lapiez et de minces couches de sol rouge résultant de la décalcification. Elles sont fissurées et souvent remplies de calcite.

La dolomie constitue également l'entablement des djebels Bou Rechoua, Kébir, Sghir et Boutaleb, situés au nord du bassin de l'Oued et Taht, conférant à la formation une apparence ruiniforme.

Vers le nord-ouest et le sud-est, les formations carbonatées du Kimméridgien et du Tithonique sont particulièrement épaisses et se trouvent topographiquement à des altitudes supérieures aux plaines alluviales. Ces formations du Jurassique supérieur, fortement fracturées, représentent d'importants aquifères perchés, notamment les dolomies de l'Oxfordien supérieur, qui occupent une vaste zone autour d'El Gaada, ainsi que celles du Kimméridgien (Safa, 2010).

4. 1. 2. 8 - Le Portlandien :

Il peut exister localement mais n'est pas différencié sur la carte.

4. 1. 2. 9 - Tithonique :

La formation, caractéristique de la région et connue sous le nom de formation de Frenda, est largement répandue depuis le versant sud-est du bassin de l'Oued et Taht, le long des axes

routiers Frenda-Mechraa Sfa et Frenda-Ain Kermes. Elle s'étend également vers le nord-est du bassin, réapparaissant plus à l'est au niveau de Ouled Sidi Khaled.

Cette formation débute par des grès argileux friables, de teinte jaunâtre à verdâtre, qui évoluent ensuite vers des bancs massifs de dolomies et de grès, entrecoupés de passées argileuses et argilo-marneuses aux couleurs variées.

La dolomie est microcristalline, en bancs compacts, de couleur brunâtre à jaunâtre en surface, avec des intercalations de marnes gréuses et d'argiles marneuses. Elle forme généralement le sommet des koudiates (collines) situées au sud-est du bassin, leur conférant une forme bosselée, avec une épaisseur pouvant atteindre 50 mètres.

Les bancs de grès, métriques et massifs, sont friables à leur base et deviennent compacts vers leur sommet. Leur couleur varie du jaunâtre au brunâtre, alternant avec des couches d'argiles aux teintes variées. L'épaisseur totale de cette formation atteint environ 80 mètres (Safa, 2010).

4. 1. 2. 10 - Le Crétacé inférieur :

Il apparaît sur le Kimméridgien et le Portlandien localement indifférenciés à l'extrême limite Nord-Ouest du bassin de l'oued el Abd.

4. 1. 2. 11 - Le Sénonien :

Il est relativement peu représenté. Constitué par des calcaires poreux, il est transgressif sur les dolomies du jurassique moyen dans la partie Sud du plateau dolomitique du bassin de l'oued el Abd.

Il est transgressif sur l'ensemble des formations sous-jacentes, largement répandu à l'Est du sous bassin d'oued et Taht, dans la vallée de l'oued Ferdja, il n'apparaît qu'à Dir Behar, l'extrême Sud-est du bassin constituant l'une des limites de cette transgression vu la discontinuité du Sénonien vers l'Ouest de Dir Behar.

Sur le plan lithologique, le Sénonien se présente sous divers faciès, il est constitué essentiellement de calcaires comme c'est le cas de l'affleurement de Dir Behar mais il peut être constitué aussi de conglomérats associés à des grés et de gypses, de grés et d'argiles, de calcaires dolomitiques et de marno-calcaires.

Le calcaire est cristallisé, de couleur grisâtre à noirâtre à la patine et jaunâtre à brunâtre à la cassure, il est compact, fissuré et sous forme de dalles subhorizontales orientées vers le Sud-est, ayant une surface altérée son épaisseur varie de 0,5 à 5 mètres au niveau de Dir Behar.

4. 1. 3 - Les formations alluviales :

Les formations alluviales récentes recouvrent le fond des vallées. Recouvrement Plio-Quaternaire : prédominent les alluvions fines a passé de galets et du gravier avec la croûte calcaire près de la surface, plus rarement on rencontre des éboulis.

4. 1. 3. 1- Plio-Quaternaire :

Le Plio-Quaternaire est représenté sous forme de dépôts de travertins. Il est localisé à Frenda et au pied d'el Gaada, sous forme de petits dépôts de travertins, le plus important est celui de Frenda où il atteint une hauteur de 30 mètres, celui-ci est très compact de couleur brunâtre.

4. 1. 3. 2 – Quaternaire :

Il assure le remplissage des dépressions de l'oued et Taht et el Abed, on y rencontre des alluvions constituées d'un remblai de sable argilo-limoneux et de gravillons dans l'ensemble de la plaine alluviale du Taht et Abd, à la base de ces alluvions s'intercalent des poudingues d'éléments gréseux, de taille centimétrique à décimétrique et d'un ciment gréso-sableux, témoignant de l'existence d'anciens chenaux.

Des croûtes calcaires d'épaisseur métrique, fissurées, durs et parfois friables, se rencontrent au Nord-Ouest du djebel Ahloudj.

Des accumulations de piedmonts constitués essentiellement d'éboulis se localisent de part et d'autre d'el Gaada.

L'épaisseur du quaternaire est variable, le puits le plus profond creusé dans ces alluvions n'excède pas les 40 mètres, cependant les coupes géo électriques des rapports de géophysique, montrent une épaisseur plus importante atteignant les 100 mètres.

5- Etude structurale

L'oued Taht et El Abd s'écoulent dans une dépression formée par des phénomènes d'érosion, qui ont creusé une crique géologique dans la partie amont de leur bassin versant, au niveau de Ternanech.

Le horst du Taht, tel que décrit par les auteurs, est le résultat d'une tectonique cassante ayant affecté la région. Cette tectonique a engendré de multiples failles, conférant à la région une structure caractéristique de horsts et grabens.

Le secteur d'étude s'étend entre la transversale Ain Sefra–Saida et la transversale El Bayedh–Tiaret (fig. 12).

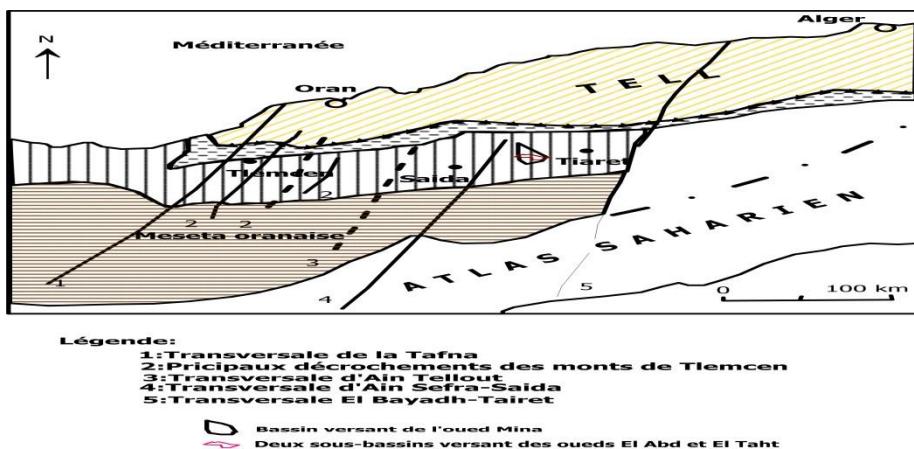


Fig.12: Les grands traits de la structure de l'Afrique du Nord-Ouest (Safa, 2010)

La tectonique cassante qui affecte les formations du Jurassique supérieur a favorisé le développement d'un karst structuré, contrôlant la localisation de la majorité des émergences de la région.

Au nord du bassin, où se situe le horst de Metameur, les accidents tectoniques suivent une direction privilégiée Sud-Ouest – Nord-Est (SO-NE).

Au sud du bassin, des failles au niveau d'El Gaada ont créé une série de compartiments qui ont connu des mouvements verticaux.

Au sud-est, on observe le horst de Bou Kalmouz ainsi que le graben de Touaghzout. La ville de Frenda et ses environs sont traversés par plusieurs failles, générant des compartiments successivement surélevés.

Le pendage des formations du Jurassique supérieur dans la partie amont du bassin varie entre 10° et 35°, orienté vers le sud-est, tandis qu'au niveau du djebel Ahloudj, il est compris entre 10° et 20° avec une orientation vers le nord-ouest.

L'établissement du diagramme polaire des failles (fig. 15) montre :

- des accidents N 40° à N 60° avec une fréquence de 12,5 %
- des accidents N 60° à N 80° avec une fréquence de 25 %
- des accidents N 80° à N 100° avec une fréquence de 25 %

- des accidents N 100° à N 120° avec une fréquence de 16

Les diagrammes polaires des fissures affectant les formations géologiques (dolomies de Tlemcen, Aaléno-Bajo-Bathonien) montrent trois directions correspondant aux fréquences maximales Diagramme polaire des fissures du gré des dolomies de Tlemcen

- mesures à Sidi Yahia : N 120° à N 140° avec une fréquence de 19,2 %
- Mesure à Kef Mellah : N 120° à N 140° avec une fréquence de 32,7 %
- Mesure à Touaghzout : N 40° à N 60° avec une fréquence de 20,8 %
- Diagramme polaire des fissures des dolomies de l'Aaléno-Bajo-Bathonien
- Mesure à Ben Attel : N 160° à N 180° avec une fréquence de 30,9 % Les fissures semblent prendre des directions préférentielles que celles des failles à Sidi Yahia, Kef Mellah et à Ben Attel à l'exception de celle de Touaghzout où elles sont concordantes. Ces directions vont servir à la détermination du sens privilégié de l'écoulement souterrain dans les milieux karstiques.

La région étudiée fait partie des monts de Frenda, une zone montagneuse d'altitude moyenne d'environ 1300 mètres, située entre les monts de Saida à l'ouest, les monts du Nador à l'est,

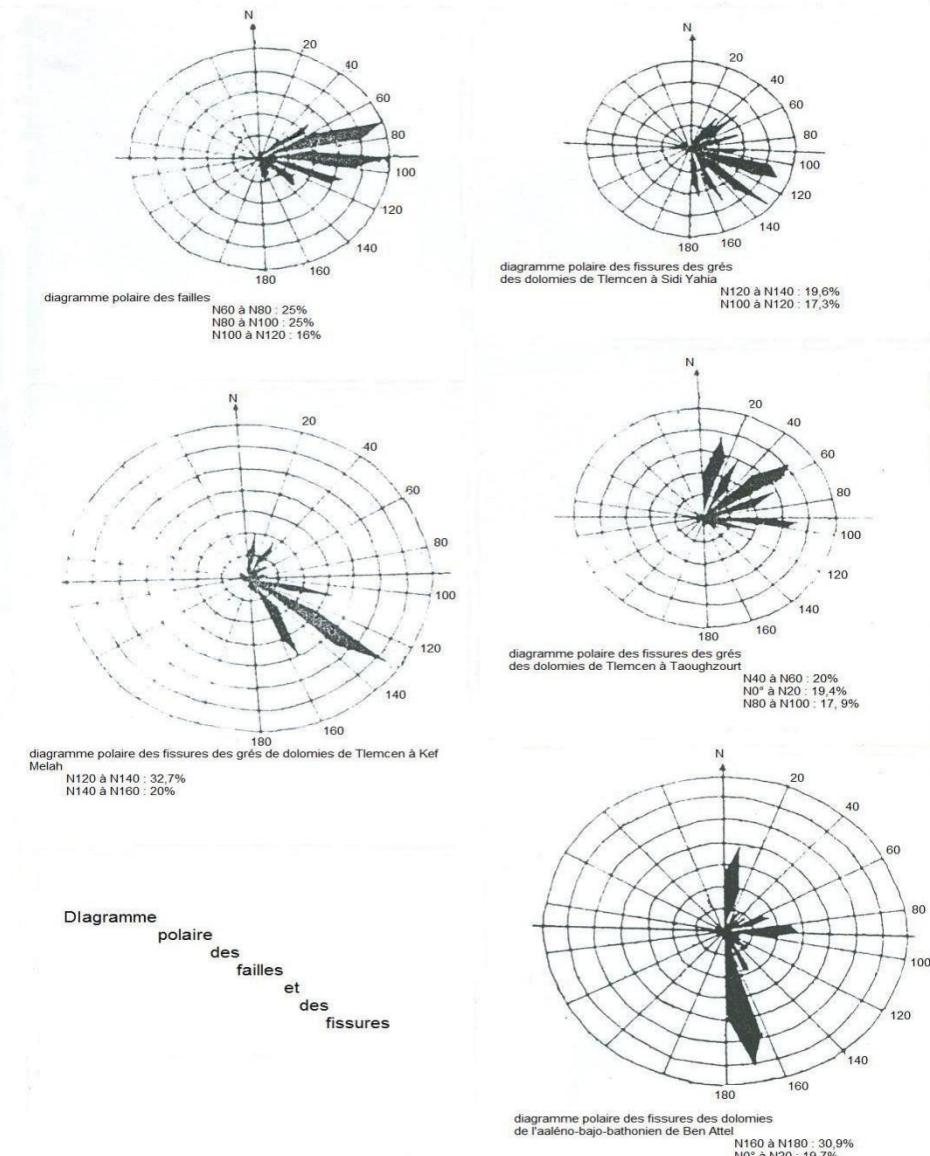


Fig. 13 : Diagramme polaire des failles et des fissures (Safa, 2010)

les monts de Béni Chougrane au nord-ouest, et les monts de l'Ouarsenis au nord-est.

Cette région se caractérise par une sédimentation deltaïque, où une série flyshoïde bien développée verticalement se manifeste, présentant de nombreux indices de chenaux.

Les différents forages effectués dans les plaines alluviales révèlent un pendage de l'Aaléno-Bajo-Bathonien dirigé vers l'ouest dans le secteur d'étude (fig. 14).

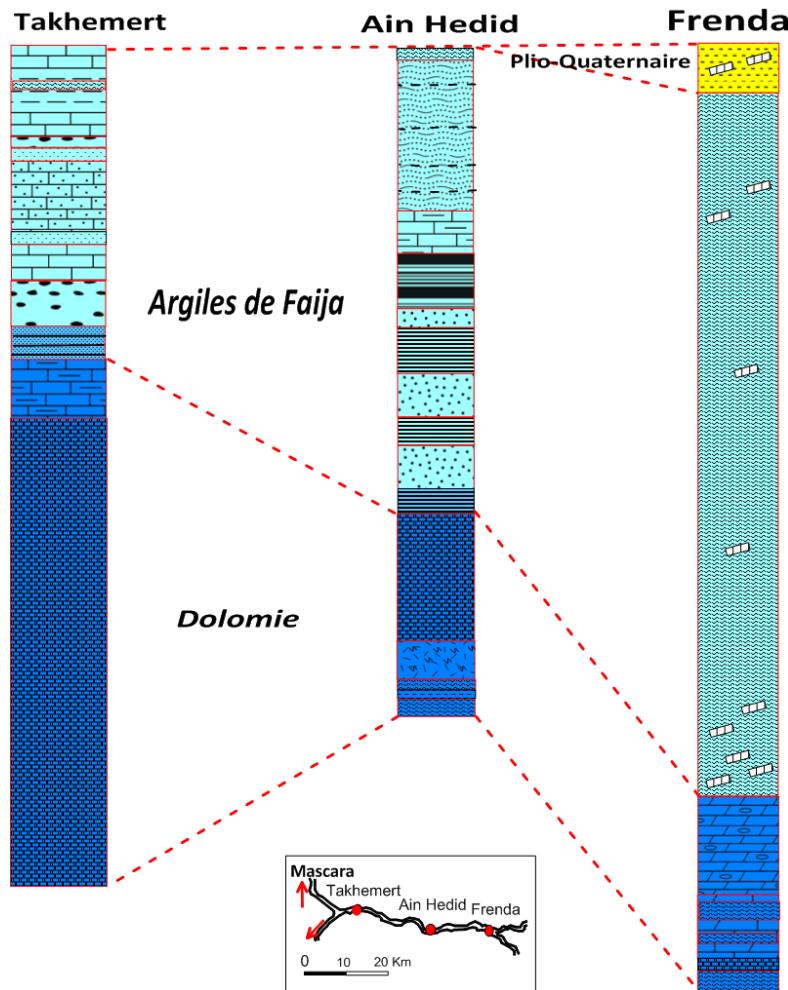


Fig. 14: Corrélation des forages de Takhemert, Ain el Hadid et Frenda

L'épaisseur du Callovo-Oxfordien est importante vers l'est, où il se présente sous une succession d'argiles et de grès, tandis qu'à l'ouest du secteur, cette succession évolue vers des argiles et des calcaires. Les dolomies de l'Aaléno-Bajo-Bathonien sont argilo-marneuses à l'ouest et compactes à l'est, avec des bancs pouvant dépasser 60 mètres d'épaisseur.

La tectonique cassante a donné naissance à une structure en escalier, favorisant le développement d'un système karstique au sein des formations carbonatées du Jurassique

supérieur. La stratification géologique et la lithologie sont globalement uniformes dans toute la zone d'étude. L'extension chronologique des formations est limitée au Jurassique incomplet, du Lias au Kimméridgien, avec deux formations principales : les dolomies de l'Aaléno-Bajo-Bathonien et la série détritique du Callovo-Oxfordien, qui représentent la majorité des affleurements. Les dolomies forment un plateau karstique dénudé au sud-ouest de la zone (djebel Touskiret et zone de collecte des eaux de l'oued El Abd supérieur), avec une altitude comprise entre 770 et 870 mètres.

Au nord de Takhmert, s'élève un horst dolomitique triangulaire (djebel Ghar Sbaa, Er Roukine, Es Souane et Dir el Kralafel, de 620 à 740 mètres) sillonné par le canyon de l'oued El Abd et ses affluents.

Dans le reste de la zone, c'est l'alternance détritique du Callovo-Oxfordien qui affleure, avec un développement régulier. En montagnes-témoins, on distingue aux sommets les grès Lusitaniens ou les dolomies Kimméridgiennes. Les premiers, correspondant aux grès de Franchetti dans la région des monts de Saida et de Tlemcen, forment des sommets arrondis et stériles, tandis que les seconds constituent une barre de repère résistante à l'altération superficielle, créant les sommets plats caractéristiques des montagnes à table. Contrairement aux grès, ces plateaux dolomitiques se distinguent par leur végétation, souvent composée de broussailles ou de forêts dévastées.

La structure géologique est monoclinale, stratifiée subhorizontalement, avec deux directions tectoniques principales : l'une dite « Tellienne », orientée sud-ouest–nord-est, et l'autre allant de l'ouest au nord-est–sud-est. Dans le secteur compris entre Takhmert et Ain el Hadid, ces deux directions semblent se confondre, formant une importante zone de torsion.

Dans les principales dépressions, on rencontre près de la surface des dépôts alluviaux plio-quaternaires, dont l'épaisseur reste faible, ne dépassant généralement pas 20 mètres.

6- Contexte régional

La région étudiée fait partie d'un ensemble jurassique dont l'axe central suit la direction générale atlascique (fig. 15.16). Cet ensemble affleure entre les domaines à remplissage tertiaire du Tell et de la plaine de la Mina au nord, et les Hauts Plateaux de la région du Chott Chergui au sud. Cette unité jurassique, relativement complète du Lias au Portlandien, disparaît

temporairement vers l'est et l'ouest sous les recouvrements crétacés des régions de Tiaret et Télagh (Mascara).

Les vastes plateaux dolomitiques situés à l'est de la vallée de Saïda et au sud de la plaine de Ghriss, récemment étudiés à l'échelle régionale, constituent le prolongement occidental de la zone d'étude.

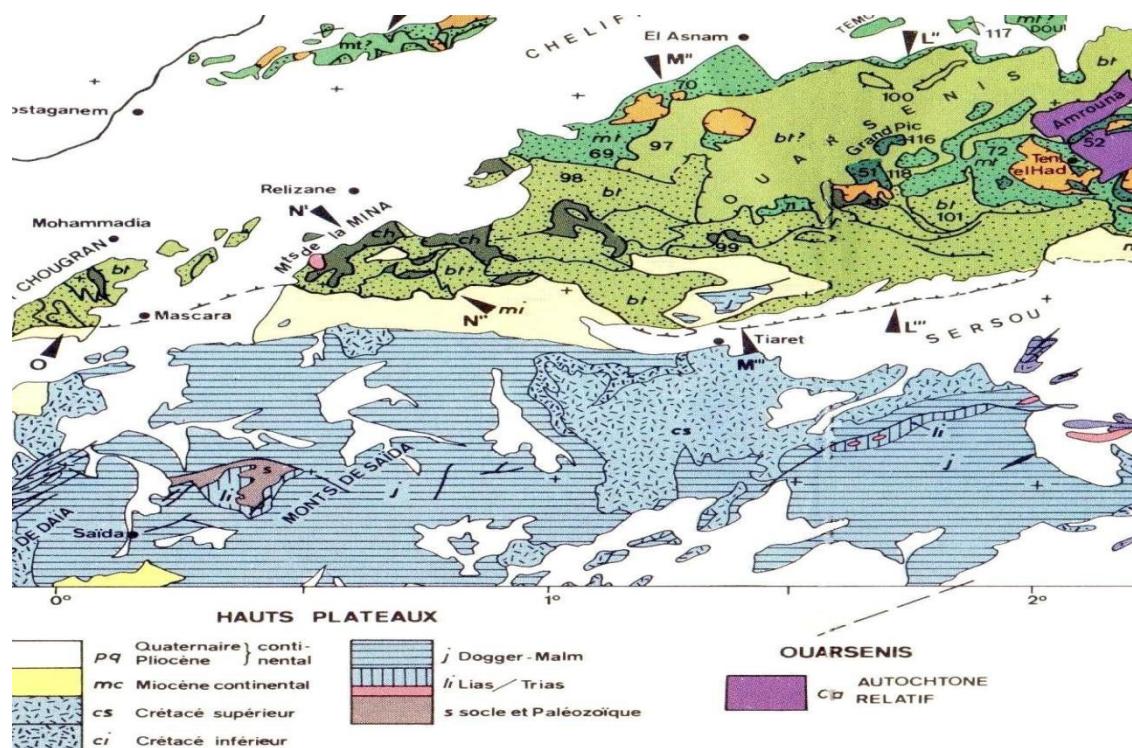


Fig. 15: Carte structurale d'après (WILDI, 1983)

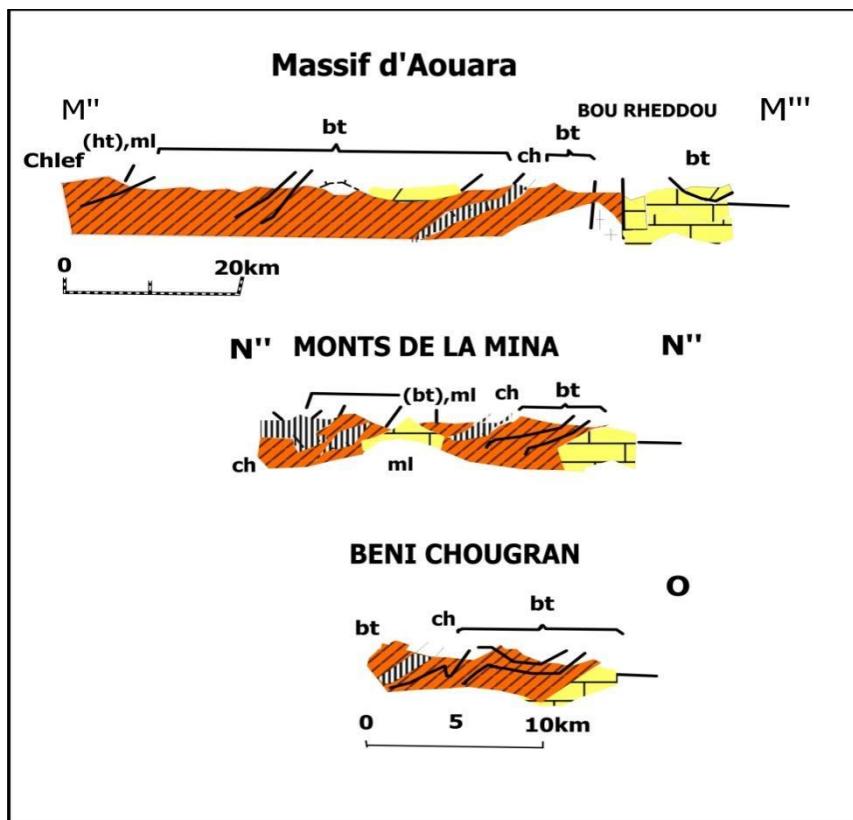


Fig. 16 : Coupes géologiques à partir de la carte structurale de la chaîne Tello-rifaine d'après W. WILDI, 1983

7 - Etude géophysique

7.1- Objectifs :

Cette étude a été orientée vers l'aquifère dolomitique de l'Aaléno – Dogger et a eu pour objectif principal de préciser sous les plaines alluviales la position du toit de cette formation et sa fracturation.

En outre, pour les besoins de l'étude des sondages électriques ont été exécutés vers les zones les plus éloignées.

- Etude du front de nappe à l'aplomb d'Ain Amara
- Etude de la plaine de Maarad à 4 Km à l'Est d'Ain Makhlof.
- Etude du secteur de Sidi Yahia autour d'oued Chiba à 15 Km au Sud Est de la source.
- Etude de la liaison possible au sein de l'aquifère entre les zones facturées du Sud Est d'Ain Makhlof et Sud-Ouest de Frenda passant sous le djebel el Gaada.

L'étude géophysique a mis en œuvres 400 S.E. dont la longueur de ligne AB a été choisie en fonction des épaisseurs présumés de la couverture sédimentaire. Les résultats de cette campagne qui sont détaillés dans le rapport de la Société Strojexport sont utilisés pour la réalisation de la carte des zones favorables pour l'implantation des forages.

7.2- Analyse des résultats :

Les coupes géologiques et la carte finale reproduisent tous les résultats.

a- Sous les plaines :

La région étudiée appartient à un ensemble jurassique dont l'axe central est aligné avec la direction générale atlasique (fig. 15). Cet ensemble affleure entre les domaines à remplissage tertiaire du Tell et de la plaine de la Mina au nord, ainsi que les Hauts Plateaux de la région du Chott Chergui au sud.

Cette unité jurassique, relativement complète, s'étend du Lias au Portlandien, mais disparaît momentanément vers l'Est et l'Ouest sous les recouvrements crétacés des secteurs de Tiaret et Télagh (Mascara).

Les vastes plateaux dolomitiques situés à l'Est de la vallée de Saïda et au Sud de la plaine de Ghriss, récemment étudiés à l'échelle régionale, représentent le prolongement occidental de la zone d'étude.

b- Zones excentriques :

- Ain Amara

Un certain affaissement de l'aquifère apparaît. Ceci peut faire supposer qu'il y a interruption de la nappe. Le front de nappe se trouverait alors en contact de terrains tertiaires plutôt argileux. Le débit de front de nappe doit être négligeable.

- Plaine de Maarad

Cette zone où la dolomie est à faible profondeur sous les galets paraît très facturée. Au centre de la plaine les sondages électriques donnent des résistivités relativement faibles qui peuvent être des indices d'une importante karstification.

- Sidi Yahia

Il existe une analogie nette avec la plaine de Maarad. Les fissurations paraissent favorables

également à l'aplomb du lit de l'Oued.

Mennzah Ech Cheikh

La liaison tectonique recherchée ne se manifeste pas de manière évidente. De manière générale, la fracturation observée sous les plaines semble se raccorder à la tectonique visible en surface, conformément au système tectonique régional en croix.

La fissuration marquée, ou karstification, n'est pas clairement apparente, mais elle semble localisée le long des axes supposés de circulation souterraine, notamment au niveau du plateau dolomitique proche ou juste au-dessus du lit de l'oued, dans les dépressions où la karstification a pu se développer verticalement. Ces observations ont permis d'élaborer une carte des zones favorables à l'implantation des forages.

7.3- Synthèse structurale :

Pour connaître les structures hydrogéologiques de la zone étudiées, trois facteurs sont déterminants :

- Profondeur du toit des dolomies de l'Aaléno-Bajo-Bathonien en égard aux phénomènes tectoniques
- Qualités géoélectrique des dolomies
- Les mêmes qualités du Callovo-Oxfordien

C'est la carte géoélectrique qui résume tous les résultats concernant la partie principale de la zone étudiée le long de la route nationale N° 14

On observe trois structures partielles dont les relations intérieures sont assez différentes. Ces sont les suivantes :

- a) – Structure de l'oued el Abd et de la plaine adhérente à l'Ouest
- b) – Structure de l'oued et Taht
- c) – Structure de l'élévation intermédiaire.

Au périmètre de Bou Noual (profils A, B, C) on rencontre, pour la plupart, les dolomies à résistivité faible de 100 à 250 ohm.m.

L'objectif de cette étude géophysique dans les plaines alluviales des oueds El Abd et El Taht été de résoudre d'urgence quelques problèmes structuraux locaux pour parvenir aux conclusions hydrogéologiques définitives.

Les périmètres sont les suivantes :

« **A** » : Ain El Hamara dans le canyon de l'oued el Abd – 24 Km en aval de Bou Noual

« **B** » : La dépression Maarad dans le Karst dolomitique dans la vallée de l'oued el Abd – 7 Km en amont de l'Ain Makhlouf

« **C** » : Sidi Yahia au flanc du plateau du Djebel el Outid, sur la rive droite de l'Oued Chiba

« **D** » : Mennzah Ech Cheikh, 12 à 16 Km le long de la route d'Ain El Hadid vers le Sud à Rosfa.

« A » : Le but de prospection a été de mettre au point le caractère du contact des dolomies avec le Callovo-Oxfordien pour mieux connaître les dispositions structurales dans les environs de la station de la prise d'eau d'Ain el Hamara (entre les S.E. N° 4 et 5 sur la rive droite).(fig.17)

Le contact est tectonique. Une faille coupe la vallée dans le sens oblique entre les S.E. N° 5 et 6 disposant évidemment, sur la rive droite, la vallée latérale du Chaabet es Saf. Les dolomies s'enfoncent vers le Nord. Au S.E. N° 7 leur toit se trouve à la profondeur de 175 m. Plus loin, devant le S.E. N° 8 il apparaît encore une autre faille dont le rejet de même sens est de 125 m.

La valeur du substratum de 115 ohm.m au lieu du S.E. N° 4 indique l'existence probable de basalte.

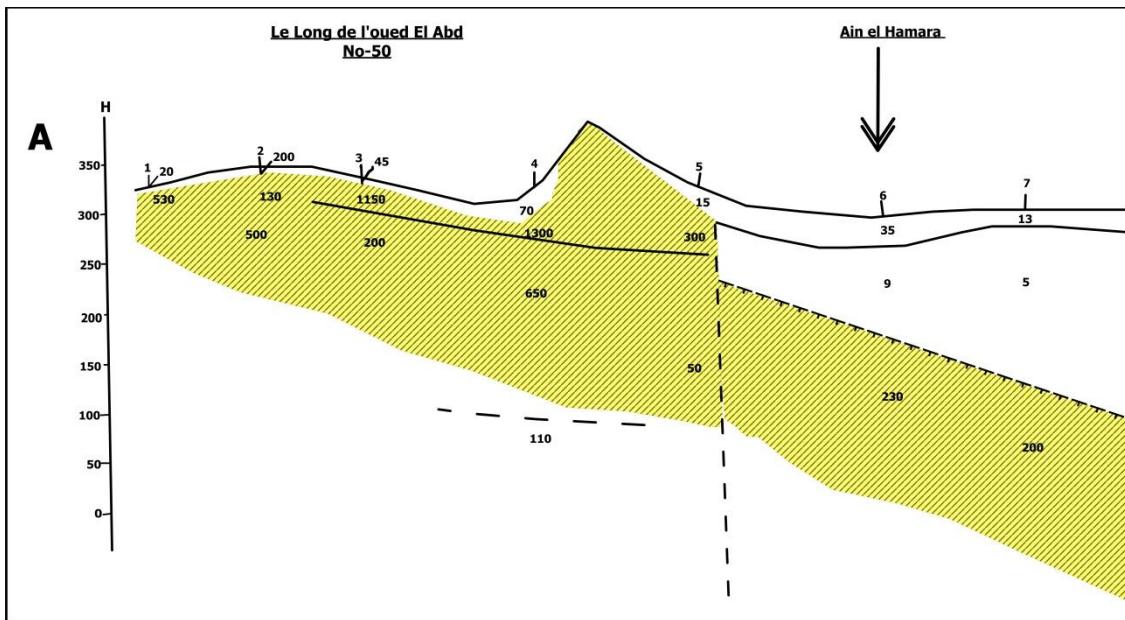


Fig. 17 : Périmètre de A. el Hamara (Strojexport, 1976)

« **B** » Le profil des S.E. N° 6 – 2 rencontre une faille disposant la vallée de l'oued directement au lieu de S.E. N° 5 (voir la conductibilité extrême au-dessous des alluvions). C'est le segment du Nord-Ouest du profil qui est effondré, en accord avec la coupe géologique SO– NE. La couche à résistivités modérées (65 ohm.m à gauche, respectivement 70 et 90 ohm.m à droite) encadre, sans doute, le Toarcien argileux (fig.18) Puis le substratum correspond aux dolomies inférieures du Dogger.

La même faille doit traverser le profil transversal (S.E. N° 1 – 4) à l'Ouest du S.E. N° 3 mais elle n'est pas bien lisible en coupe.

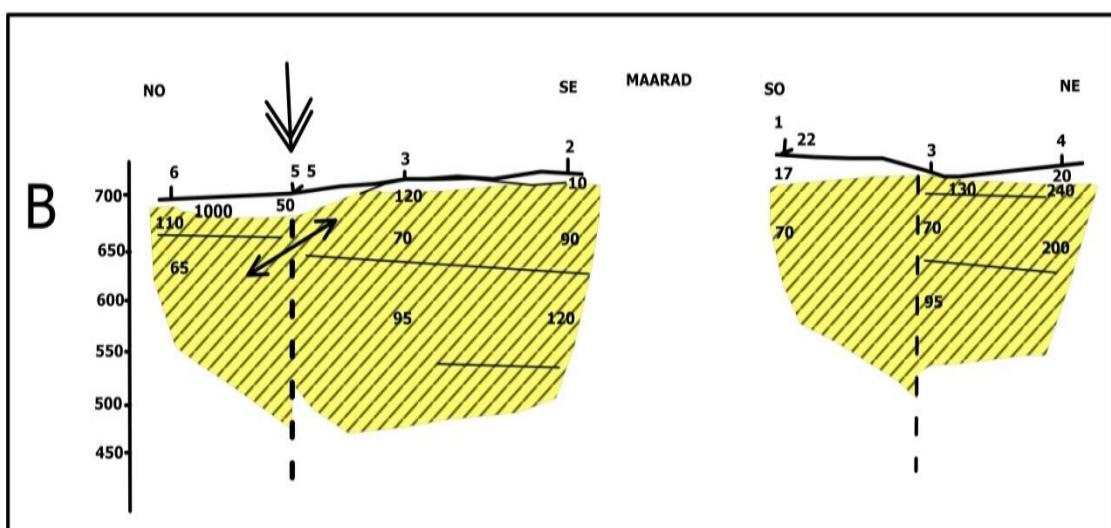


Fig. 18 : Périmètre de Maarad (Strojexport, 1976)

”C” : Les deux profils ont testé les qualités des dolomies dans la zone fracturée près du contact superficiel avec le Callovo-Oxfordien.(fig.19)

Les dolomies sont caractérisées, pour la plupart, par les résistivités extrêmes – à l’exception des S.E. N° 6 et 7 où elles sont 220 et 200 ohm.m.

On peut attendre de bonnes conditions hydrogéologiques entre les S.E. N° 1 et 2, mais un développement défavorable des calcaires argileux peut se présenter par les valeurs identiques.

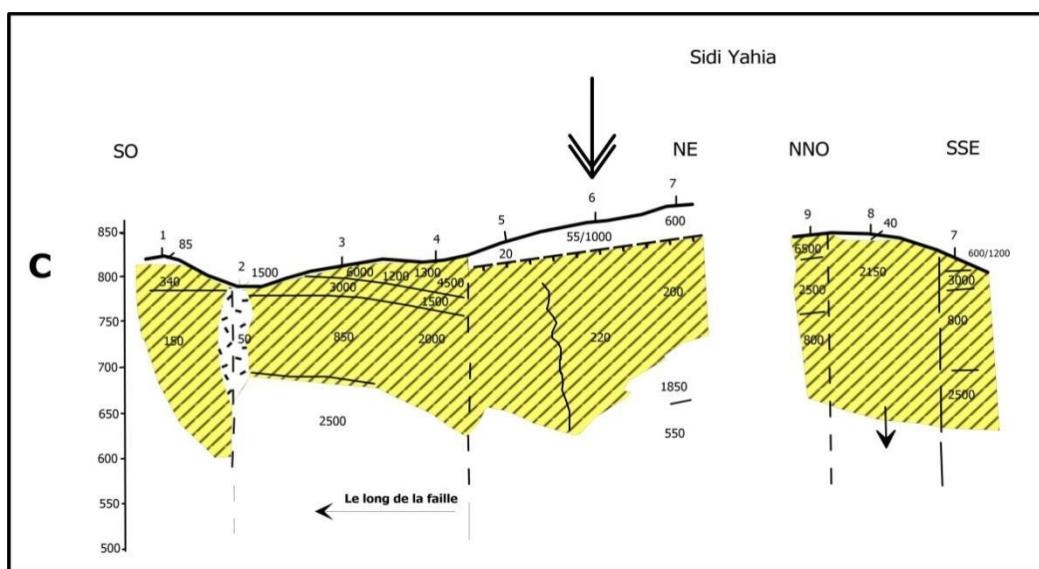


Fig. 19 : Périmètre de Sidi Yahia (Strojexport, 1976)

”D” : Les grandes profondeurs interprétées sont surprenantes en égard à la proximité de l’affleurement des dolomies à l’Est. Mais, de l’autre côté, le bloc le plus profondément effondré (S.E. N° 7- 5) est proche au fossé près de la bordure de l’Ouest de la structure de l’oued Taht (la faille 32/2 – 29/1 semble continuer plus loin vers le Sud-Ouest, le long de l’oued Mekachiche, et atteint peut – être entre les périmètres « C » et « D » (Fig.20)

De même la faille indiquée sur la rive orientale du même effondrement entre les S.E. N° 4 et 5 peut correspondre, en suivant immédiatement le piedmont Nord-ouest du Djebel el Gada, à la faille signalée entre les S.E. N° 2 et 3 du profil 32.

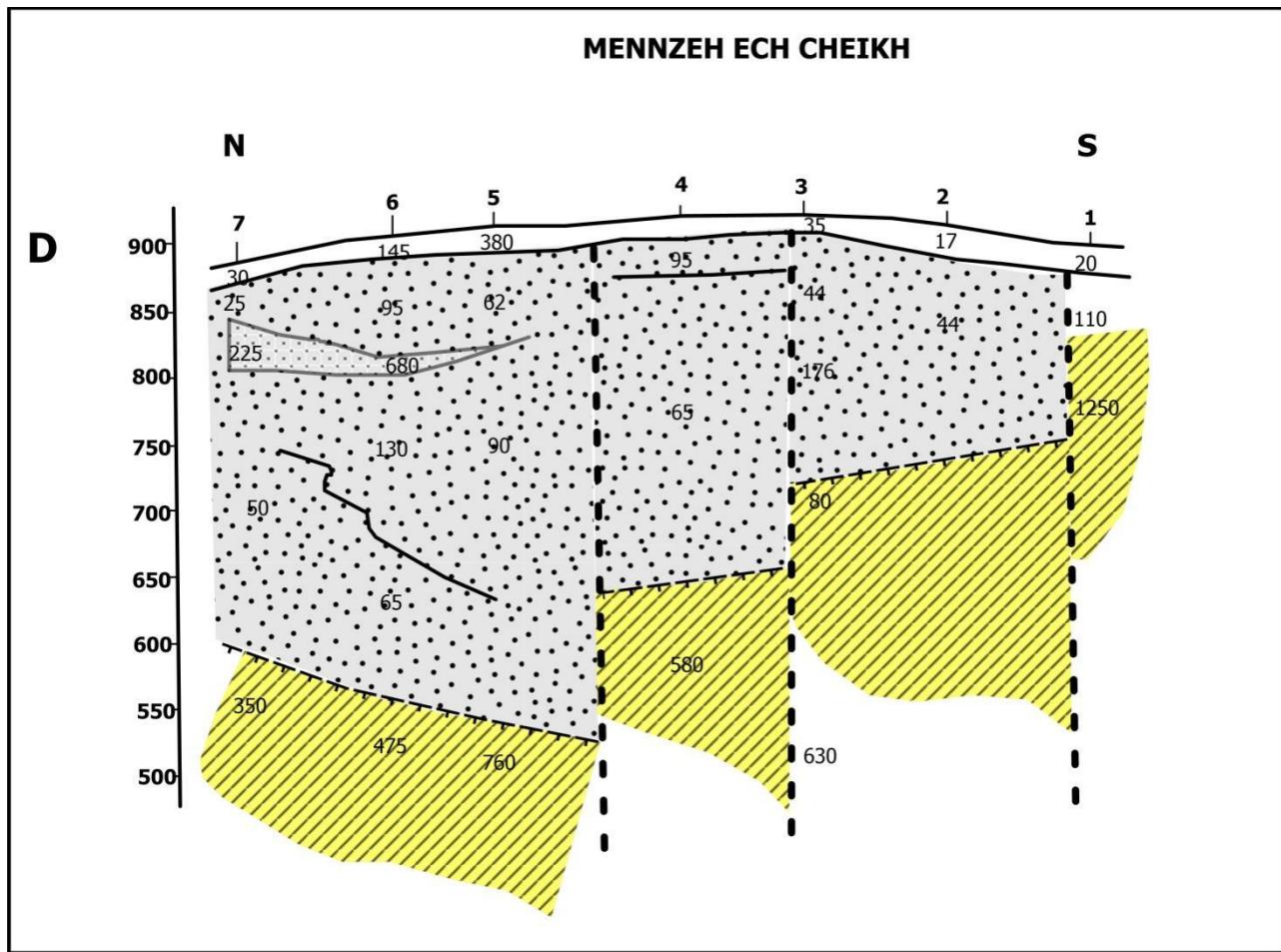


Fig. 20: Périmètre de Mennzah ech Cheik (Strojextsport, 1976)

Chapitre 3 : Etude Hydrogéologique

1 - Aperçu hydrogéologique

Le bassin versant de l'oued et Taht se caractérise par deux milieux hydrogéologiques étroitement liés avec le contexte géologique :

- les formations détritiques constituées de sables argilo-limoneux, de poudingue et d'argiles gréseuses à l'aval

- les formations carbonatées à l'amont

2. Caractéristiques hydrogéologiques des formations :

Sur la figure suivante (fig.01), nous reproduisons l'inventaire des aquifères potentiels.

Log	Age	Lithologie	Epaisseur	Perméabilité	Hydrogéologie
	Plio-Quaternaire	Sables argilo-limoneux, grés conglomérat et graviers	70 m	Interstice	Aquifère superficiel à perméabilité moyenne
	Senonien	Calcaires massifs fissurés	10 m	Fissures	Imperméable vue son impluvium réduit et l'orientation SE des bancs
	Portlandien	Dolomies à passées argilo-marneuse, grés et argiles versicolore, présence de cavité dans les dolomies avec remplissage calcaire des fissures	140 m	Fissures et interstice	Aquifère perché discontinu à bonne perméabilité débit des sources supérieur
	Kimméridgien				
	Callovo				Argiles imperméables représentant le substratum des formations sus-jacentes
	Oxfordien	Grés tendre à stratification entrecroisée dolomies, argiles gréseuses à cristaux de gypse et argiles à intercalation gréuseuse et dolomitique	300m	Fissures interstice imperméable	Grés tendres à bonne perméabilité constituant un aquifère peu-important
	Aaléno-Bajo	Dolomies, calcaire et grés à passées argileuses, présence de vavité et de chenaux	120m	Fissures et chenaux	Dolomies d'El Gaada constituant un aquifère perché avec une perméabilité de fissure, impluvium important (Supérieur à 30 Km²)
	Bathonien				Argiles gréseuses esmi perméable constituant un aquifère superficiel négligeable
					Aquifère profond captif avec une bonne perméabilité de fissures et de chenaux

Figure 01 : Caractéristiques hydrogéologiques des formations

2.1- Alluvions Quaternaires :

Ces alluvions constituées de sable argilo-limoneux, de grés peu cohérent, de conglomérat et gravier, se présentent dans l'ensemble comme une formation à perméabilité d'interstice moyenne, cependant ils peuvent avoir également une bonne perméabilité (Safa, 2010).

2.2- Calcaires sénonien :

Le calcaire est en banc massif, affecté par de nombreuses fissures et d'altérations superficielles d'où résulte une perméabilité de fissure

2.3- Formation du Portlandien et du Kimméridgien :

Le Kimméridgien est composé de dolomies de Tlemcen fortement altérées, dont les bancs présentent en surface des champs de lapiez et des karsts, comme le gouffre d'Ibn Khaldoun. De nombreuses fissures sont également visibles sur les bancs gréseux.

Le Portlandien se caractérise par des argiles intercalées entre des bancs gréseux et dolomitiques d'épaisseur variable, surmontés de dolomies massives, très altérées et fissurées, avec de fines couches argileuses.

Ces deux formations, superposées, sont traversées par un réseau dense de fractures et fissures, assurant une perméabilité élevée à l'ensemble.

2.4- Formation du Callovo-Oxfordien :

La base de la formation est marquée par un dépôt d'argile imperméable, ponctué de fines couches gréseuses et dolomitiques. Vers le sommet, les argiles deviennent gréseuses et contiennent des cristaux de gypse, ce qui les rend semi-perméables lorsqu'elles affleurent en surface.

Au sud du bassin, ces formations sont recouvertes par les dolomies massives, altérées et fissurées d'el Gaada, où la présence de dolines favorise la circulation des eaux souterraines à travers les bancs dolomitiques.

La partie sommitale, à l'est du bassin, est composée de grès tendres, fracturés et présentant une bonne perméabilité interstitielle, à condition qu'ils ne soient pas enfouis en profondeur.

2.5- Formation de l'Aaléno-Bajo-Bathonien :

La formation est constituée essentiellement de calcaires dolomitiques, les nombreuses fissures et cavités qui l'affectent lui confèrent une très bonne perméabilité.

3- Caractéristiques et cadre hydrogéologique des émergences

3.1- Introduction :

La plupart des émergences se localisent à l'amont du bassin versant de l'oued et Taht concentrées dans les zones de faille normales et décrochantes, leur température de 15 à 24°C, une variation qui s'explique par la différence d'altitude des sources ainsi que par la différence du couvert végétal ; on a deux types d'émergence liés directement à la lithologie.

3.2- Emergences issues des dolomies :

3.2.1- Dolomies de Tlemcen et de Frenda :

Les dolomies représentent l'un des meilleurs réservoirs aquifères de la région. Leur surface est marquée par de nombreuses dolines qui influencent l'écoulement des eaux superficielles. Cet aquifère est ponctué de sources qui jaillissent de différentes manières : soit par simple écoulement gravitaire juste après les précipitations, ces exsurgences étant nombreuses mais difficiles à localiser précisément ; soit le long de failles ; soit encore au contact des bancs gréso-dolomitiques avec les formations argileuses sous-jacentes de l'Oxfordien (fig. 02).

Etude et modélisation Hydrochimique

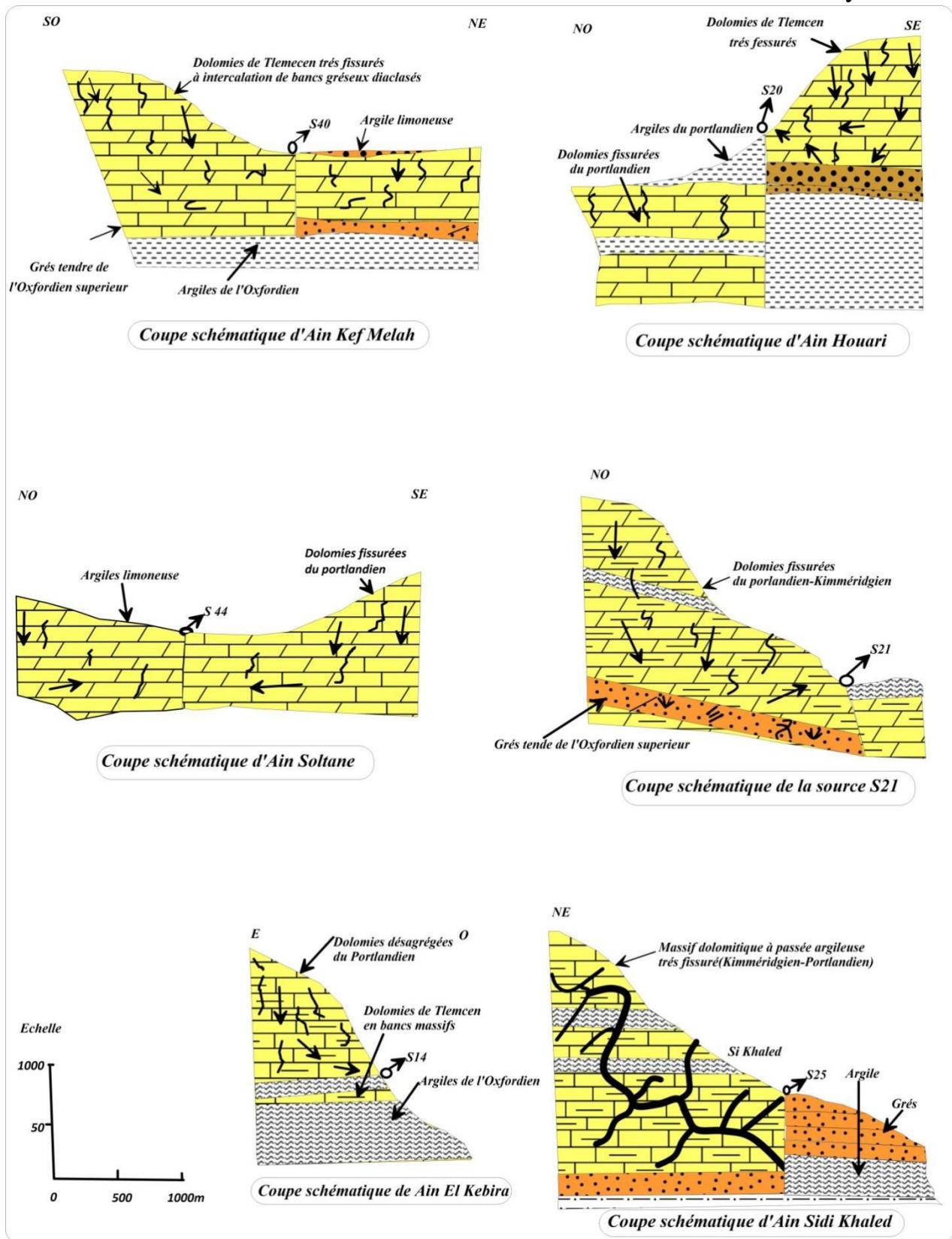


Figure 02. Coupes schématiques d'A. Kef Mellah, A. Houari, A. Soltane, A. Sidi Khaled et A. Kebira

3.2.2- Les sources émergeant à la faveur de faille :

Ces sources apparaissent majoritairement le long d'un alignement de failles orientées Nord-Est/Sud-Ouest (NE-SO), notamment celles de Kef Mellah, Bled Sbiba, Toughzourt, Ain Sidi Khaled, et Ain Soltane. Elles présentent un régime irrégulier, avec un débit supérieur à 1 litre par seconde en période hivernale (fig. 03).

3.2.3- Sources émergeant par contact des dolomies kimméridgiennes avec les argiles de l'Oxfordien :

Elles se concentrent au Nord-ouest de la ville de Frenda et à l'extrême Sud-est du bassin, leur fort débit est sensiblement lié à la période hivernale (supérieur à 2 l/s) : sources de Ain Kebira (fig. 03).

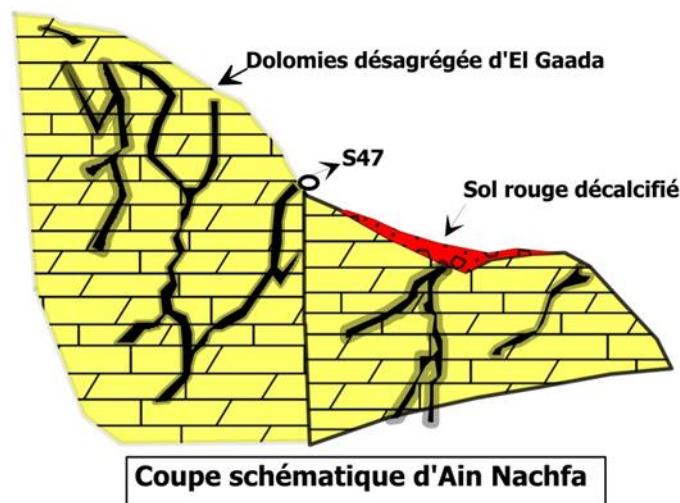
4. DOLOMIES D'EL GAADA

Le plateau d'El Gaada, très irrégulier et couvert de forêt, présente des zones de décalcification ainsi que des clairières cultivées. Les conditions d'émergence y sont similaires à celles décrites précédemment, avec un nombre particulièrement élevé d'exsurgences. La température des eaux émergentes varie entre 18 °C et 24 °C selon l'altitude et la couverture végétale.

4.1- Sources émergeant à la faveur de failles :

Elles ont la caractéristique d'avoir un débit très fort même en étiage : source d'Ain Nachfa (7 l/s), Ain el Hadid (4 l/s) (fig. 03).

SO NE



SE NO

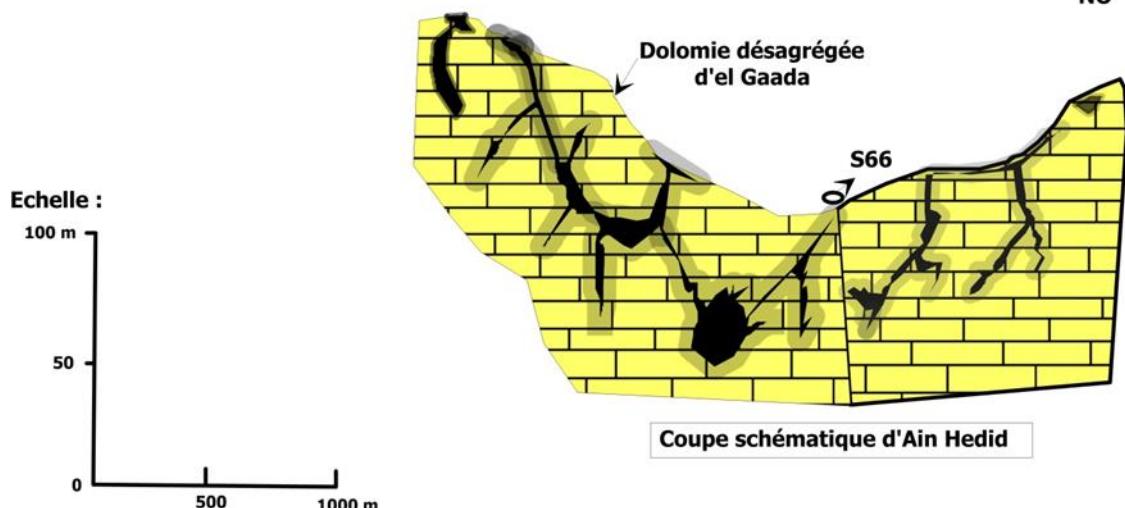


Figure 03 : Coupe schématique d'Ain el Hadid, Ain Nachfa (Safa, 2010)

4.2. Sources émergeant par contact des dolomies d'el Gaada avec les argiles de l'Oxfordien :

Le débit est généralement inférieur à 1 l/s : Ain Medrijane, Ain Kerma (fig.04).

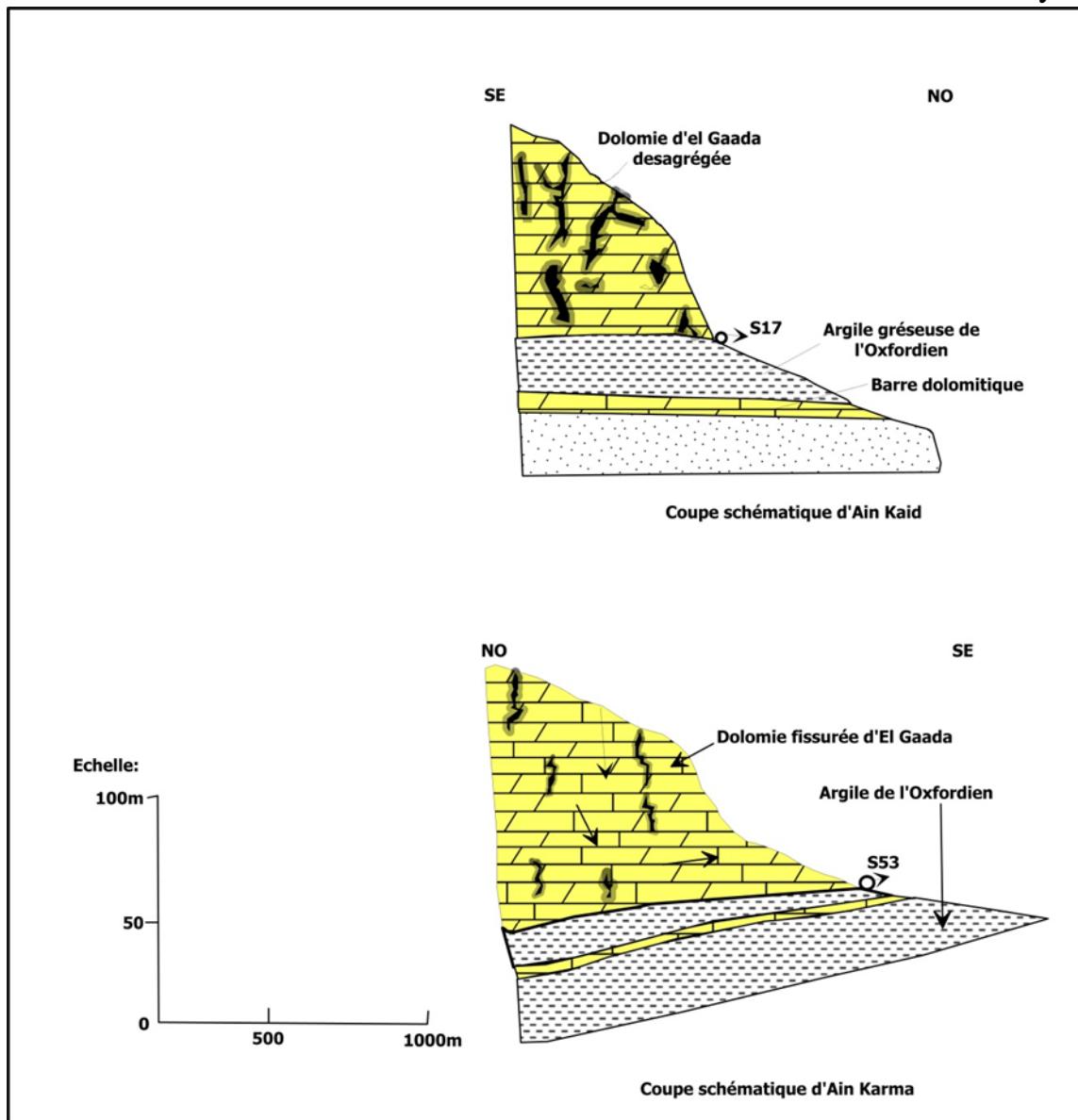


Figure 04 : Coupe schématique de A. Kerma et A. Kaid (Safa, 2010)

5. Sources émergeante par contact des terrasses sablo-argileuses et conglomerat de l'oued (fig. 05)

Ces sources tarissent en période d'étiage : Source d'Ain Saada , et Source d'Ain el Kheir (0.8 l/s).

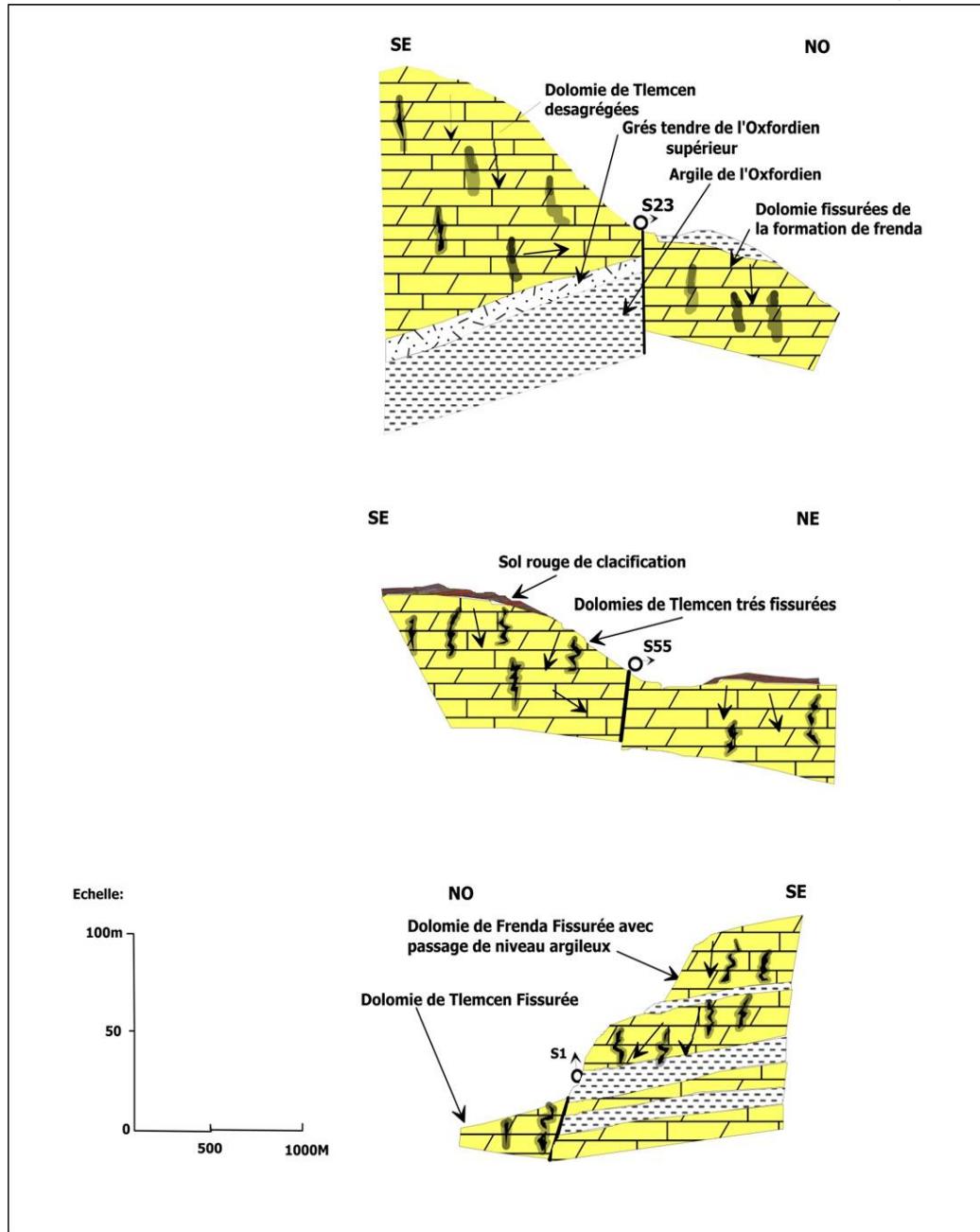


Figure 05 : Coupe schématique de A. Saada, la cave et A. el Kheir (Safa, 2010)

a. Conditions hydrogéologiques

Le sous-bassin versant de l'oued el Abd présente un écoulement superficiel plus ou moins important, tandis que celui de l'oued et Taht reste quasiment à sec pendant presque toute l'année. Les eaux superficielles de l'oued el Abd sont alimentées par l'émergence d'Ain Makhoul, un groupement de sources s'étendant sur environ 2 km dans la gorge entre le djebel Touskiret et Dir er Khrarba, situé à 4,5–6,5 km en amont du carrefour routier près de Takhmert. Cette émergence est due à une zone karstifiée au sein de l'aquifère des dolomies Aaléno-Bajo-Bathoniennes, dont la tectonique est bien marquée par deux failles parallèles longeant le canyon (Safa, 2010).

Etude et modélisation Hydrochimique

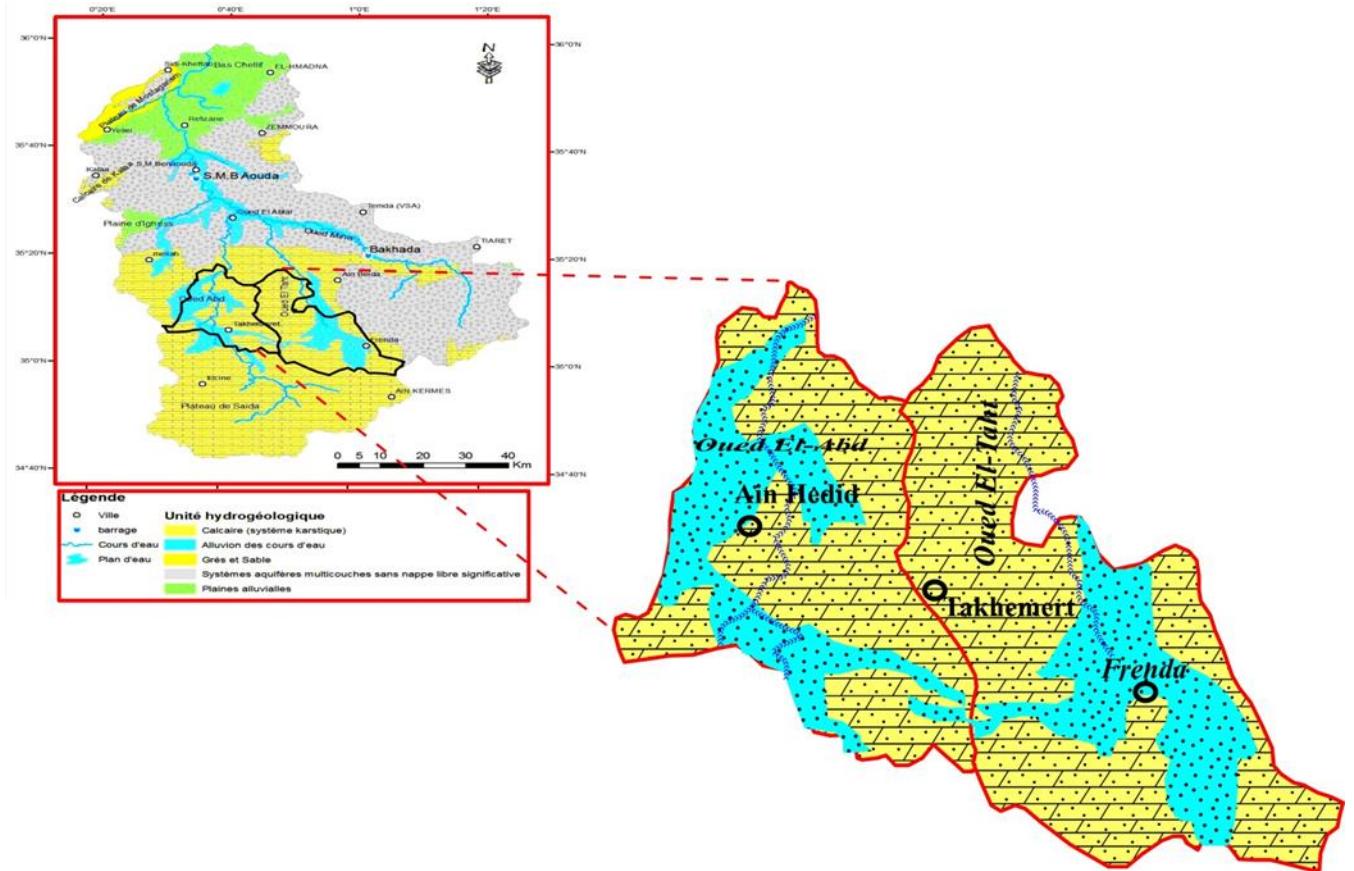
Les dolomies constituent donc un réservoir souterrain majeur, notamment dans les zones fracturées et aux intersections des deux principaux axes tectoniques. Leur bonne perméabilité combinée à leur structure subhorizontale étendue joue un rôle très favorable dans l'alimentation en eau.

À l'inverse, les conditions superficielles défavorables de l'oued et Taht (fig. 06) s'expliquent par l'enfoncissement plus profond de la même formation dolomitique. Le sous-bassin versant est ainsi limité aux formations du Callovo-Oxfordien et du Lusitanien, qui présentent des ressources en eau faibles et irrégulières, insuffisantes pour alimenter le bassin pendant la saison sèche où il reste à sec.

Cependant, le Callovo-Oxfordien comporte localement des faciès détritiques perméables, qui jouent plutôt un rôle de milieu drainant que de véritable aquifère autonome. C'est notamment le cas de l'oued el Abd, où les grès de base calloviens, situés sous le fond de l'oued, drainent les eaux souterraines issues des émergences recouvertes.

Les dolomies du Kimméridgien n'ont pas d'importance en tant qu'aquifère dans les sous-bassins. Leur extension se limite au plateau élevé de Frenda et à quelques résidus au sommet des montagnes-témoins, comme el Gaada, où elles forment des nappes discontinues aux ressources limitées et régimes locaux propres.

Parmi les recouvrements plio-quaternaires, prédominent des alluvions fines et imperméables. Néanmoins, dans les dépressions situées au contact des plateaux dolomitiques, des éboulis ou conglomérats récents peuvent localement se développer.



6. Les aquifères

On distingue deux types d'aquifères pour les deux sous-bassins constituant le bassin versant de la Mina

* Aquifère argilo – gréseux à gréso – argileux de qualité médiocre (Callovo-Oxfordien et Tertiaire) à moyenne (Lusitanien)

* Aquifère constitué de dolomie et d'alluvions grossières de bonne qualité dans l'ensemble (Jurassique inférieur et moyen et Kimméridgien et alluvions récentes le long des oueds).

✓ Les formations alluvionnaires (galets) :

Ces dépôts, situés le long des oueds, présentent une épaisseur trop faible (entre 1 et 5 mètres) pour constituer un aquifère significatif. Ils sont parfois en contact direct avec les dolomies, avec lesquelles ils se confondent hydrodynamiquement, notamment au niveau de la source d'Ain Makhlof.

Etude et modélisation Hydrochimique

Quant à l'aquifère quaternaire, il s'agit d'une nappe libre dont le niveau statique est directement lié au réseau hydrographique superficiel. Sa puissance peut atteindre jusqu'à 70 mètres, mais son extension latérale reste relativement limitée. Les eaux de cet aquifère sont généralement saumâtres.

En amont du bassin, l'aquifère est compartimenté en trois parties séparées par des buttes dépassant 1000 mètres d'altitude, qui convergent vers le thalweg principal de l'oued. Dans cette zone, située à l'extrême sud-est, le puits le plus profond creusé dans ces alluvions ne dépasse pas 30 mètres (Safa, 2010).

✓ **Aquifère du Sénonien :**

Dans le secteur de l'oued et Taht, le Sénonien transgressif ne peut constituer un aquifère vue sa faible puissance

✓ **Les formations du Lusitanien et du Kimméridgien :**

Ces formations se situent en position élevée et sont rapidement drainées. Les impluviums sont limités, et les pentes du Lusitanien favorisent le ruissellement superficiel. Les sources présentent un débit faible et irrégulier, s'asséchant pour la plupart en été. Ainsi, aucun écoulement pérenne significatif ne parvient à partir de ces formations pour alimenter les oueds principaux.

Le Kimméridgien, en revanche, alimente la ville de Frenda ainsi que les oueds principaux, avec un débit résiduel très faible rejoignant l'oued el Abd. Aucun potentiel important n'est cependant à retenir de cette zone.

Les formations du Kimméridgien et du Portlandien, superposées, forment un karst perché doté d'une bonne perméabilité grâce à un réseau de fissures. Les zones effondrées de cet aquifère facilitent le contact latéral entre les niveaux gréso-dolomitiques et les argiles imperméables de l'Oxfordien, compliquant ainsi la circulation continue des eaux souterraines (Safa, 2010).

Cet aquifère est alimenté par son propre impluvium : les précipitations qui y tombent s'infiltrent rapidement via le réseau de fissures, limitant les pertes par évapotranspiration.

L'épaisseur de l'aquifère varie latéralement, diminuant vers le nord-est avec l'apparition des grès tendres de l'Oxfordien, notamment le long de failles (exemple : carrière de sable de Frenda).

✓ **Les formations du Callovo-Oxfordien et du Tertiaire :**

Très argileuses dans les vallées, elles sont drainées par les oueds. L'étude a montré d'importantes salinités dans les puits et dans l'oued et Taht en étiage quand ne sont drainées que ces formations argileuses, L'eau est inutilisable normalement pour l'irrigation parce dépasse les normes de l'OMS . Ces formations sont donc complètement stériles du point de vue d'un apport souterrain important d'eau potable.

✓ **Aquifère de l'Oxfordien :**

Grés tendres :

Vu son extension limité, il représente un aquifère peu important du point de vue réserves, son épaisseur varie latéralement, il peut être alimenté par les formations sus-jacentes comme il est alimenté par les précipitations lorsqu'il affleure.

Argiles gréseuses :

En affleurant en surface, cette formation constitue un aquifère de très faible perméabilité, sa puissance n'excède pas les deux mètres, les puits qui y sont creusés constituent des puits citerne.

Dolomies d'el Gaada :

Les dolomies, caractérisées par une perméabilité due à leur réseau de fissures, forment un synclinal perché dont l'épaisseur peut atteindre 60 mètres. Cet aquifère est alimenté directement par infiltration des précipitations, grâce à un système de karstification bien développé qui protège les eaux de l'évapotranspiration. Son impluvium, d'une superficie supérieure à 30 km², constitue un karst important pour la région. Le plateau d'el Gaada reçoit entre 35 et 40 millions de m³ d'eau pluviale par an, dont environ un quart alimente cette nappe perchée.

Le karst est ponctué de nombreuses émergences, qui peuvent atteindre un débit total de 15 m³/s en période humide.

Les eaux de source drainant el Gaada traversent les accumulations de piedmont, avant de rejoindre les écoulements souterrains des aquifères quaternaires. Cet aquifère repose sur les argiles imperméables de l'Oxfordien. Les puits creusés dans les dolomies restent rares et peu profonds, ne dépassant généralement pas 10 mètres (Safa, 2010).

Aquifère de l'Aaléno-Bajo-Bathonien :

Il s'agit d'une nappe captive profonde, dont le toit est formé par les argiles de l'Oxfordien. À l'ouest, au niveau du cœur du dôme de Takhmert, affleure son mur imperméable constitué par les marnes du Toarcien. Son alimentation se fait principalement vers l'ouest, aux environs de Takhmert (bassin versant de l'oued el Abd), où la nappe affleure sur une large surface, bénéficiant d'un apport direct des précipitations.

7- Les écoulements de base

Une analogie se dessine entre les vallées des oueds Taht et el Abd, en aval d'Ain Makhlof, permettant d'isoler, dans le débit de l'oued el Abd, la contribution des aquifères autres que celui des dolomies du Jurassique inférieur et moyen.

Les impluviums de ces deux vallées, associés aux aquifères distincts du Jurassique inférieur et moyen, couvrent des superficies comparables d'environ 700 km², notamment au niveau des stations d'Ain Amara et de Kef Mahboula (Safa, 2010).

8. Importance particulière de l'aquifère dolomitique du jurassique inférieur et moyen

La recherche doit s'orienter surtout vers cette formation dolomitique.

I. Première analyse des potentialités de cette aquifère

Le vaste plateau dolomitique, dont la fracturation est bien visible sur les cartes géologiques et qui correspond à des zones favorables pour l'implantation des forages, s'achève au nord par l'entaille de l'oued el Abd. Ce dernier reste en contact avec les dolomies, formant des gorges au niveau du horst triangulaire, notamment entre Bou Noual et Ain Amara. L'oued el Abd constitue l'exutoire principal de l'aquifère étudié.

Sous le bassin de l'oued et Taht ainsi que la plaine de l'oued el Abd, l'aquifère devient captif, partiellement dans le secteur de Takhmert. Il est atteint par les forages existants, dont les débits restent faibles, à l'exception notable du forage de Bou Noual .

9 – Etude de l'aquifère dolomitique inférieur et moyen pour l'ensemble des deux bassins

9.1- Piézométrie et limites :

9.1.1- La Piézométrie :

Elle est établie à l'aide des points sélectionnés (fig. 07) et montre un écoulement du Sud vers le Nord avec une rupture du gradient hydraulique à proximité du Chott Chergui.

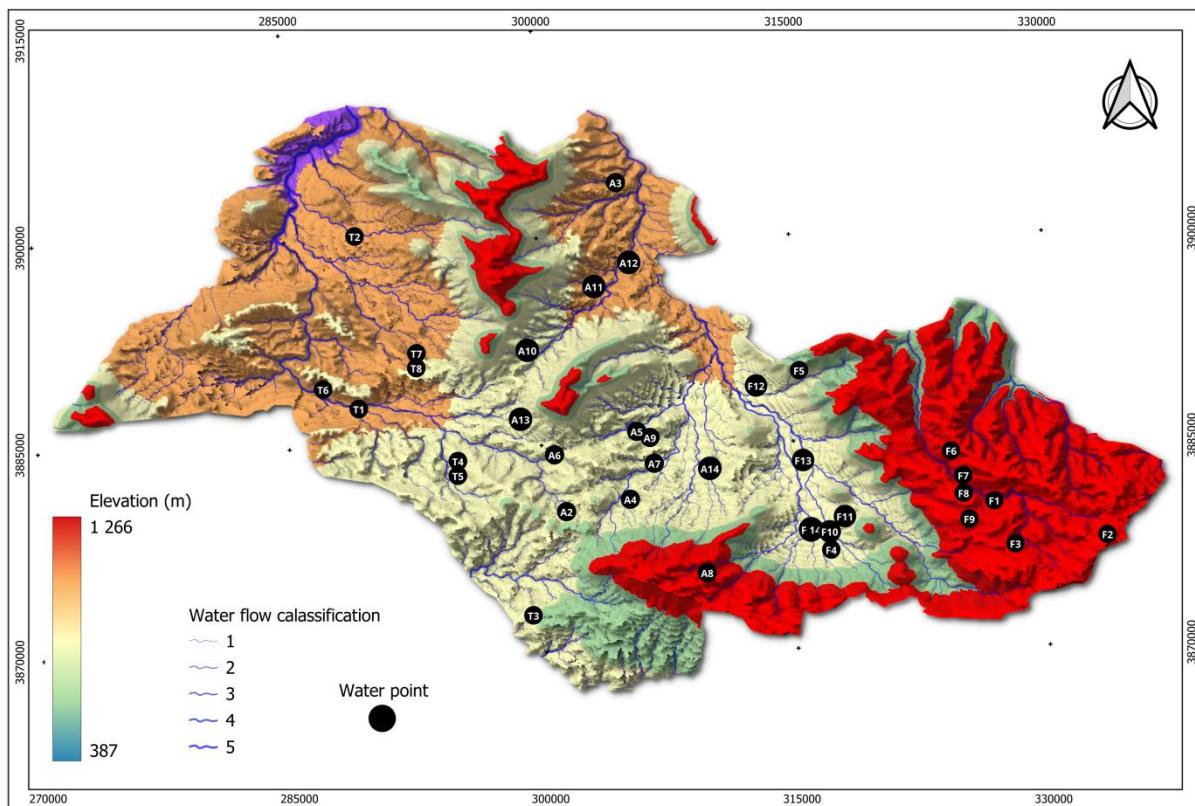


Figure 07 : Localisations des prélèvements dans la zone d'étude

Selon cette carte piézométrique (fig 08), le niveau piézométrique varie entre les trois zones étudiées.

À Frenda, ce niveau varie de 689,5 à 1215,44 mètres au-dessus du niveau de la mer. Pour Ain Hedit et Takhemert, le niveau piézométrique varie respectivement entre 564 et 950 mètres au-dessus du niveau de la mer, et entre 526,8 et 728 mètres au-dessus du niveau de la mer. De plus, la figure (07)

Etude et modélisation Hydrochimique
met en évidence des informations sur la topographie et l'altitude de la zone d'étude.

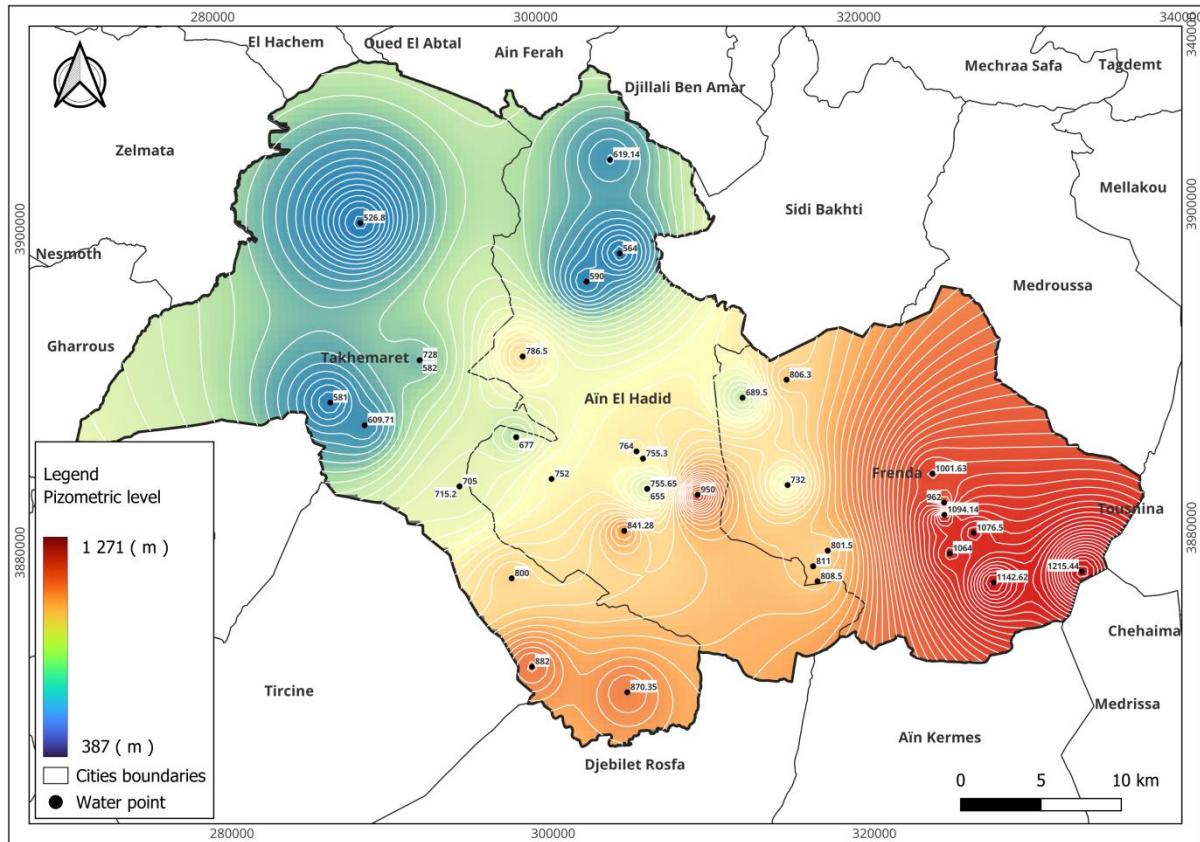


Figure 08 : La carte piézométrique de la région d'étude

Le tableau (07) indique des informations supplémentaires en précisant les coordonnées géographiques, le niveau statique et le niveau piézométrique des 36 points d'eau de la zone d'étude (fig 07). Le niveau statique a été mesuré avant l'échantillonnage de l'eau destinée aux analyses physico-chimiques au début du mois de juin 2021.

Cette opération s'est déroulée sur trois jours : le premier jour dans la région de Frenda, le deuxième à Ain Hédi et le troisième à Takhemert.

Etude et modélisation Hydrochimique

Tableau 7 : Coordonnées géographiques, niveau statique et niveau piézométrique des points d'échantillonnage dans la zone d'étude.

Point d'eau	Coordonnées géographiques		Niveau statique (m)	Altitude (m)	Niveau piézométrique (m)
	X	Y			
F1	1.09798	35.04705	44.5	1121	1076.5
F2	1.17174	35.02548	6.56	1222	1215.44
F3	1.11158	35.01928	44.38	1187	1142.62
F4	0.99155	35.01995	44.5	853	808.5
A1	0.87556	35.07156	32.35	788	755.65
A2	0.78325	35.02164	45	845	800
A3	0.85021	35.25491	8.86	628	619.14
A4	0.85992	35.0481	8.72	850	841.28
T1	0.68299942	35.1070021	26.29	636	609.71
T2	0.68015797	35.2196824	18.2	545	526.8
A5	0.86823	35.09242	34	798	764
A6	0.81044	35.07708	91	843	752
A7	0.87556	35.07156	133	788	655
A8	0.86199	34.95796	66.65	937	870.35
F5	0.97052	35.13237	66.7	873	806.3
F6	1.06979	35.08003	59.37	1061	1001.63
F7	1.0778	35.06391	133	1095	962
F8	1.07798	35.05705	8.86	1103	1094.14
T3	0.79703017	34.9722646	45	927	882
T4	0.74769372	35.0729593	26.8	742	715.2
T5	0.74769481	35.0729142	40	745	705
T6	0.65963236	35.1196789	30	611	581
T7	0.72061761	35.1433479	60	788	728
T8	0.72051008	35.143256	68	650	582
F9	1.08174	35.03548	83	1147	1064
F10	0.98863	35.0283	28	839	811
F11	0.99858	35.0371	48.5	850	801.5
F12	0.94052	35.12237	65.5	755	689.5
F13	0.97121	35.07367	50	782	732
F14	0.98863	35.02839	44.5	839	794.5
A9	0.8727	35.08843	37.7	793	755.3
A10	0.79072	35.14535	34.5	821	786.5
A11	0.83421	35.18703	87	677	590
A12	0.85691	35.20271	81	645	564
A13	0.7863	35.10032	98	775	677
A14	0.90991	35.06826	40	990	950

F:Frenda, **T**:Takhemert, **A**:Ain Hedid

9.1.2- Les limites:

9.1.2.1- Verticale :

Le Trias assure l'étanchéité vers le bas, mais c'est essentiellement le Toarcien qui constitue le substrat imperméable principal de l'aquifère Aaléno-Dogger. Lorsque l'aquifère est captif, son toit peut correspondre au Callovo-Oxfordien, voire parfois au Tertiaire. C'est notamment dans la plaine de Takhmert que le recouvrement est parfois très mince, rendant l'aquifère plus ou moins captif. La piézométrie montre alors que la nappe ne peut être artésienne, mais seulement en charge sous ce recouvrement.

Certaines nappes perchées, localisées sur le plateau, reposent sur les argiles bigarrées de Sidi Youssef. Ces nappes perchées ne sont cependant pas prises en compte dans l'établissement de la piézométrie, ce qui rend superflu un grand nombre de points d'observation recensés.

9.1.2.2- Horizontale :

Vers le nord, les données géophysiques révèlent une faille à fort rejet mettant en contact le front de l'aquifère avec les terrains argileux tertiaires. Cependant, l'existence d'un écoulement au niveau de ce front de nappe ne peut être totalement écartée. Ce point pourrait être clarifié par la réalisation d'un forage juste au nord de la faille (Safa, 2010).

À l'est et à l'ouest, les limites des bassins versants correspondent à des lignes extrêmes au-delà desquelles aucun écoulement n'est attendu. Néanmoins, des fuites ponctuelles peuvent survenir, notamment par l'intermédiaire d'un horst ou suite à des pompages localisés à l'intérieur de ces limites.

À l'ouest, au contact du plateau de Saïda, l'extrémité orientale de la faille du horst de Tiffrit ainsi que la faille de Sidi-Youssef forment une structure géologique favorisant le partage des eaux entre les versants est et ouest.

Dans la région d'Ain Dez, au sud-ouest du plateau, la structure géologique particulière, caractérisée par une zone fracturée orientée nord, ouest-sud et est, semble être à l'origine de perturbations piézométriques. Un compartiment dolomitique plus ou moins isolé apparaît ainsi entre cette zone fracturée et la faille de Sidi-Youssef.

Chapitre 5. Etude et modélisation Hydrochimique

Partie 01 : Etude Hydrochimique

1. Introduction

L'objectif de l'étude hydrochimique des plaines alluviales des oueds El-Abd et El-Taht est de mieux comprendre l'évolution spatio-temporelle des paramètres physico-chimiques des eaux (pH, CE, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- et NO_3^-). Ces paramètres sont liés à la dissolution et à la nature lithologique des formations traversées par les eaux souterraines et superficielles. Les analyses physico-chimiques ont été réalisées au laboratoire de l'Algérienne des Eaux (ADE), unité de Tissemsilt.

2. Matériels et méthodes

Dans cette étude, nous avons recouru aux méthodes suivantes :

- Détermination des paramètres physico-chimiques analysés *in situ*¹ et en laboratoire² selon Rodier et al. (2009) et l'étude de la relations entre les éléments chimiques.
- Représentation graphique de l'évolution des paramètres chimiques des points d'eau
- Cartographie des éléments physico-chimique mesurés et analyses pH, CE, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- et NO_3^- en utilisant des outils informatiques (Surfer v. 9.0 et Mapinfo v.7.5,)
- Détermination des faciès chimiques de la nappe par la représentation des paramètres chimiques sur les diagrammes de Piper, Gibbs, et les boites a moustaches en utilisant le logiciel Diagramme v.6.1 et origino pro 2021
- Etude statistique multi-variée des éléments physico-chimique par le logiciel SPSS v.16 et Origin pro 2022
- Détermination de la qualité des eaux a l'aide de l'indice de la qualité des eaux (IQE) des points d'eau .
- Cartographie de l'indice de la qualité des eaux en utilisant des outils informatiques (Surfer v. 9.0 et Mapinfo v.7.5)

3. Procédures d'échantillonnage et techniques d'analyse

Afin d'évaluer la qualité physico-chimique des ressources en eau au niveau du deux bassins-versants des Oueds Abd et el Taht, notamment les plaines alluviales, 36 échantillons d'eau ont été collectés

entre juin et août (2021) pendant la petite saison sèche dans des bouteilles en polyéthylène. Notre méthode d'échantillonnage était basée sur une sélection de 36 échantillons en période de basses eaux (tab 07), en tenant compte l'emplacement du forage et les sources par rapport à la lithologie de notre secteur d'étude. Au total, 28 puits de forage et 08 échantillon d'eau de source ont été obtenus dans les communes de Takhemert , Ain Hedid , et Frenda. La densité des puits est légèrement plus élevée dans les zones (Nord-Ouest) que dans les zones sud et centrale de la zone d'étude

L'emplacement des points d'échantillonnage a été déterminé à l'aide d'un système de positionnement global (GPS) et sont situés sur la carte de localisation (Fig 01). Les échantillons ont été prélevés après pompage pendant 10 à 15 min jusqu'à conductivité soit constante et ont été conservés dans des glacières (à 4 C°) puis transportés au laboratoire pour une analyse physico-chimique juste après la campagne de prélèvement selon les méthodes standard Rodier et al (2009)

Afin de vérifier et de valider les données collectées, le principe de la balance ionique a été appliqué. L'erreur de balance ionique (EIB) a été évaluée dans cette étude pour confirmer l'analyse précision pour une mesure correcte des ions. Plusieurs études ont établi cette BEI sur une valeur de précision à environ $\pm 8\%$ (Fu et al., 2022) et $\pm 10\%$ (El Baba et al., 2020). Cependant dans notre étude cette erreur ionique le solde est acceptable à $\pm 5\%$ (Adimalla et al., 2019;2021) en utilisant l'équation suivante :

$$\text{EIB} = (\Sigma \text{ Cations} - \Sigma \text{ Anions}) / (\Sigma \text{ Cations} + \Sigma \text{ Anions}) * 100$$

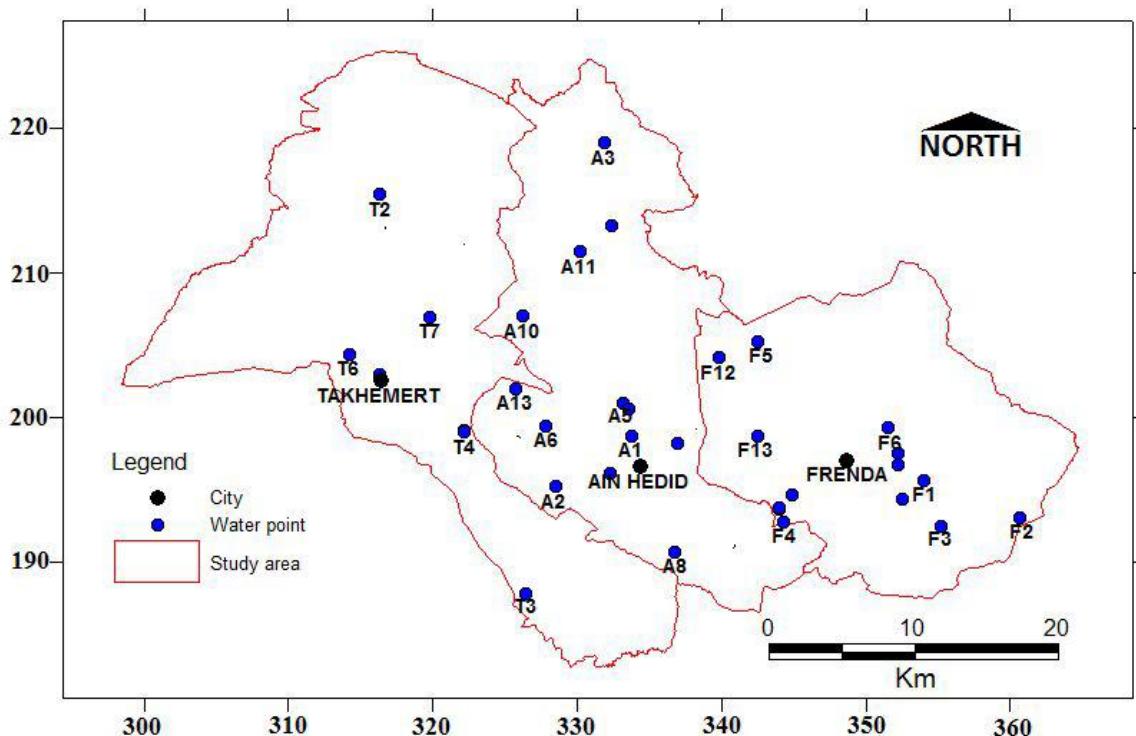


Figure 01: La carte de localisation des prélèvements des points d'eaux

3.1. Les paramètres physiques et chimiques

En totale paramètres ont été mesurés et analysés in situ¹ et en laboratoire² selon Rodier et al. (2009).

Les paramètres physiques mesurés sont : pH, Conductivité (EC), T° et TDS.

Les paramètres chimiques analysés sont :

- Les cations : Ca⁺², Mg⁺², Na⁺, K⁺.
- Les anions: Cl⁻, SO₄⁻², HCO₃⁻, NO₃⁻

3.1.1. Paramètres physiques:

La conductivité (EC), (pH), la température de l'eau (T°) et (TDS) ont été mesurées à l'aide d'un appareil portable (HACH SL 1000). L'instrument a été calibré à l'aide de solutions tampons avec pH valeurs de 4, 7 et 9, ainsi que des valeurs (EC) de 147, 1413 et 12,88 µS/cm, respectivement (fig 02) .



Figure 02: Multi paramètre type

3.1.2. Paramètres chimiques:

3.1.2.1. Les anions :

➤ Dosage de nitrate NO_3^- :

Le dosage des nitrates se déroule en plusieurs étapes précises. Tout d'abord, 10 ml de l'échantillon à analyser sont prélevés. Ensuite, on ajoute 2 à 3 gouttes de solution de NaOH à 30 %, suivies de l'ajoutement de 1 ml de salicylate de sodium. Le mélange est évaporé à sec soit au bain-marie soit à l'étuve 75 -88 °C, (en veillant à ne pas surcharger ni surchauffer excessivement et en laissant refroidir par la suite) (fig 03,04) .

Après un repos de 10 minutes, le résidu est repris avec 2 ml de H_2SO_4 . On ajoute ensuite 15 ml d'eau distillée, puis 15 ml de tartrate double. Enfin, on procède à la mesure spectrophotométrique à une longueur d'onde de 420 nm. Le résultat final est exprimé en mg/l.

• Courbe d'étalonnage.

Dans une série de capsule de 60 ml, introduire successivement :

N° de Capsule	B	I	II	III	IV

Etude et modélisation Hydrochimique

ETALON 5MG/1.	0	1	2	5	10
Eau distillée	10	9	8	5	0
de salicylate de Na	1	1	1	1	1
Correspondant en mg/1 de nitrique.	0	0.5	1	2.5	5

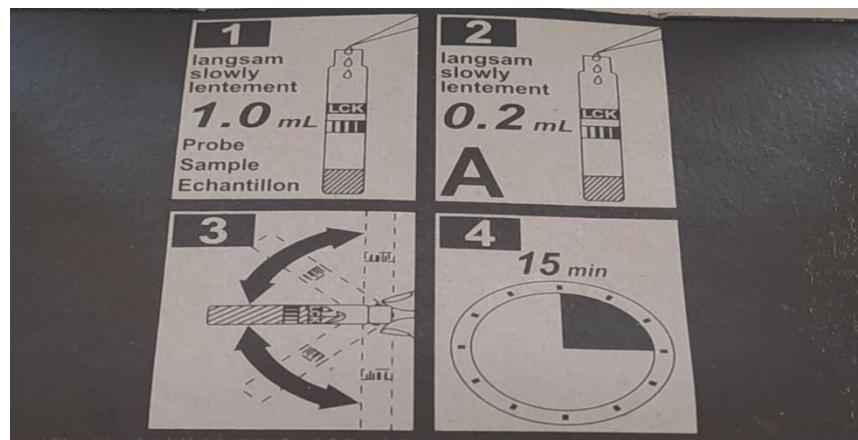


Figure 03 : Mode opération de nitrate



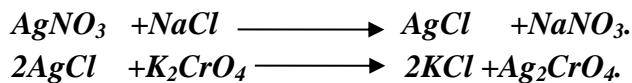
Figure 04 : Dosage de nitrate

3.1.2.2. Dosage du chlorure (Cl⁻)

➤ Détermination de Chlorures :

Réaction des ions chlorure avec des ions argent pour former du chlorure d'argent insoluble qui est précipité quantitativement, addition d'un petit excès d'ions argent et chromate formation du chromate d'argent brun rouge avec des ions chromates qui ont été ajoutés comme indicateur.

Cette réaction est utilisée pour l'indication du virage durant le titrage, le PH est maintenu entre 5 et 9,5 afin de permettre la précipitation (fig 05) .



➤ Mode opératoire:

- Prendre 5mL d'eau analysé.
- Ajouter 2 gouttes de K₂CrO₄(coloration jaunâtre).
- Titrer avec AgNO₃ à 0.01N jusqu'à coloration brun rougeâtre.

• Expression des résultats :

$$\text{Cl}^- \text{ mg/l} = V_{\text{AgNO}_3} \times 71 \times F$$

V AgNO₃ : volume d'AgNO₃ nécessaire pour le dosage de l'échantillon.

F : facteur de correction du titre d'AgNO₃.

Pour le F

Prendre 5ml de la solution mère à 71mg/L.

Ajouter 2 gouttes de l'indicateur coloré.

Doser par AgNO₃ (0.01N) jusqu'à virage de couleur (brun rougeâtre).

$$F = \frac{1}{V_{\text{AgNO}_3}}$$



Figure 05 : Dosage du chlorure.

➤ Détermination de sulfates (SO_4^{2-}) :

Les ions sulfates sont précipités et passés à l'état de sulfates de baryum en présence de BaCl_2 (fig 06)

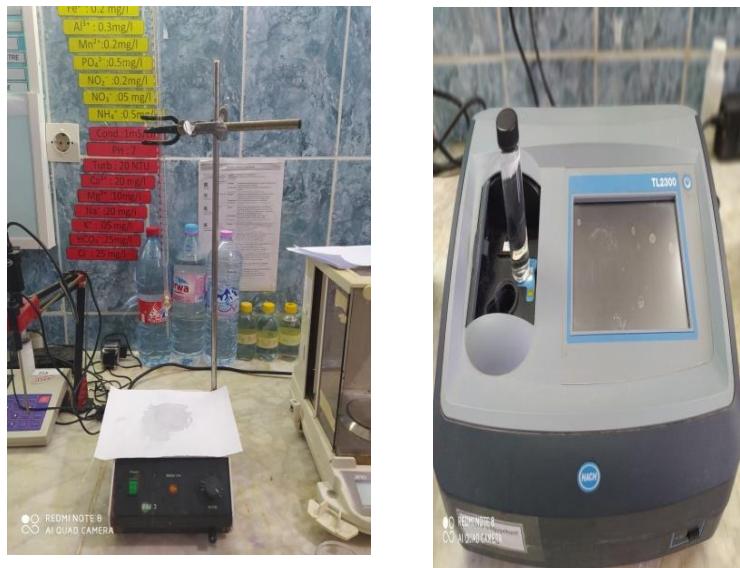


Figure 06 : Dosage de sulfate

➤ Mode opératoire :

- Prendre 20mL de l'eau à analyser.
- Ajuster par 10mL de l'eau distillée.
- Ajouter 5ml de la solution stabilisante
- Ajouter de chlorure de baryum.
- Agiter énergiquement pendant une minute.
- Lire au spectrophotomètre à $\lambda = 420\text{nm}$.
- Expression des résultats : Le résultat est donné en mg/L.

➤ Détermination du bicarbonate HCO_3^- :

Le bicarbonate dans l'eau provient de la dissolution du gaz carbonique dans les sources naturelles (fig 07).

Le mode opératoire :

- Prendre 50ml d'eau à analyser.
- Ajouter l'indicateur coloré BBT.
- Titrer par HCl jusqu'au virage jaune.
- Obtenir le V_{eq} d' HCl indiqué dans la burette.

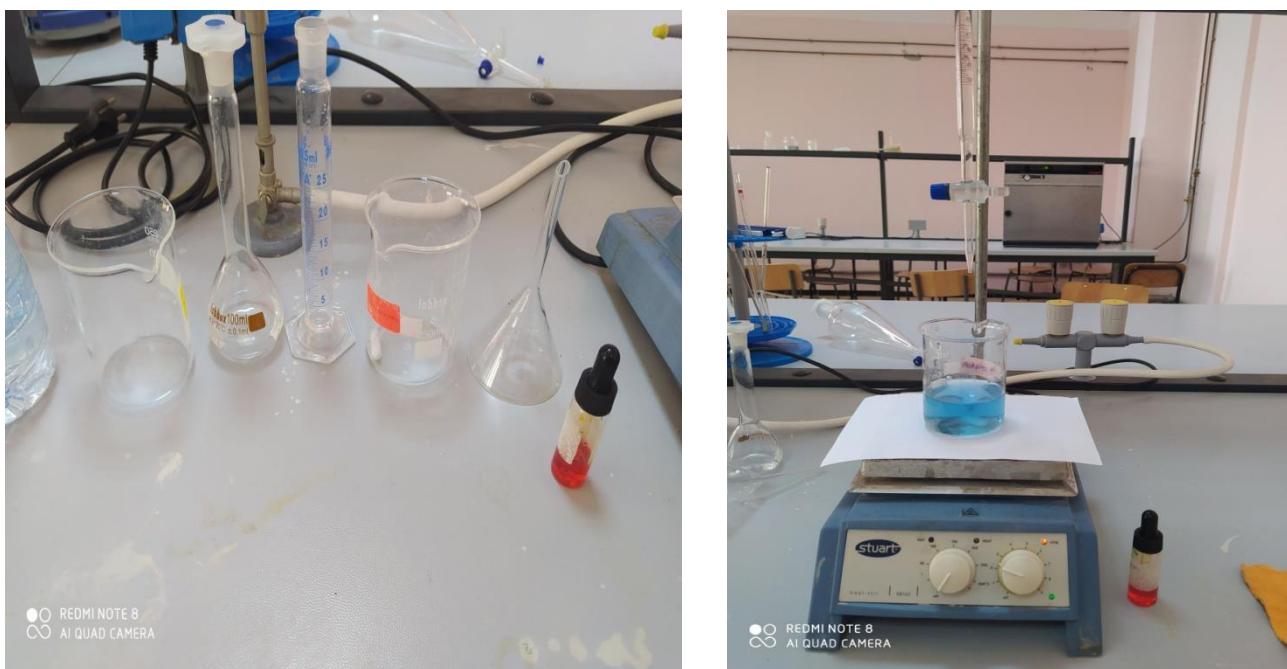


Figure 07 : Dosage du Bicarbonate.

Expression de résultat :

$$[\text{HCO}_3^-] \text{ mg/L} = \text{VA} \times 61.$$

VA : Volume d'acide versé.

3.1.2.2. Les cations :

➤ Dosage du Calcium Ca^{2+} et du Magnésium Mg^{2+} :

□ Pour le Calcium Ca^{2+}

Principe : le calcium est dosé avec une solution aqueuse d'E.D.T.A à pH entre 12 et 13. Ce dosage se fait en présence du Murexide,

- l'E.D.T.A réagi tout d'abord avec les ions calcium libres puis avec les ions calcium combinés avec

l'indicateur coloré qui vire alors de la couleur rouge au violet.

Pour le Calcium Ca^{2+} : $(V1) \text{ Ca}^{2+}$ (fig 09) .

– Prendre 50 ml d'eau à analyser.

– Ajouter 2 ml de NaOH à 2 N(mol).

– Ajouter du Murexide (l'indicateur coloré).

– Et titrer avec l'E.D.T.A jusqu'au virage à la couleur violet.

Etude et modélisation Hydrochimique

– noter le volume d'EDTA versé.

Pour le Magnésium : (V2) Mg²⁺ (fig 08) .

– Prendre 50 ml d'eau à analyser.

– Ajouter 2 ml de NH₄OH (10,1).

– Ajouter le noir Eriochrome (l'indicateur coloré)

– Et titrer avec l'E.D.T.A jusqu'au virage à la couleur bleu.

– Noter le volume d'EDTA versé.



Figure 08 : Dosage du magnésium



Figure 09 : Dosage du calcium

Expression des résultats :

La détermination du Calcium en mg/l est donnée par la formule suivante :

$$\text{Ca}^{+2} = V1 \times 8,016$$

V1 : Volume d'EDTA nécessaire pour une concentration donnée.

La détermination du Magnésium en mg/L est donnée par la (Mg^{2+}) formule suivante :

$(V2-V1) \times 4.86$ où :

✓ V2 : Volume total d'E.D.T.A de Ca^{+2}

✓ V1 : Volume Mg^{+2}

□ **Dosage du sodium Na^+ (fig 10) .**

- Principe : photométrie de la flamme est un des procédés les plus rapides et sensibles connus, aujourd'hui pour le dosage des éléments alcalino-terreux. Les éléments à analyser (sodium, potassium, etc....) sont généralement sous forme de sels. L'analyse se fait en partant de leurs solutions.
- Mode opératoire :
 - Allumer l'appareil à l'aide du bouton vert (Power).
 - Ouvrir le robinet de la bouteille du gaz.
 - Allumer la flamme à l'aide du bouton noir « IGNITION » sans lâcher le doigt jusqu'à l'affichage « FLM » en rouge sur l'écran.
 - Pipetter de l'eau distillée remplie dans une cuvette.
 - Optimiser la flamme si elle est jaune à l'aide du bouton « fuel » jusqu'à ce que la couleur devienne bleu violacé.
 - Optimiser à zéro à l'aide du bouton « Blank ».
 - Laisser se stabiliser 5 à 10 minutes.
 - Une fois qu'elle se stabilise à zéro, activer la cuvette d'eau distillée et la remplacer par une autre cuvette remplie par une solution étalon de Na^+ ou du K^+ à 10 mg/L.
 - Optimiser à 10 mg/l à l'aide du bouton « FINE »

Etude et modélisation Hydrochimique

- Retirer la cuvette remplie par une solution étalon de « Na^+ » à 10 mg/L et la remplacer par une cuvette remplie d'eau distillée et vérifier si l'écran affiche zéro (0,000).
- Retirer la cuvette remplie par l'eau distillée et la remplacer par une cuvette remplie par une solution étalon de « Na^+ » à 10 mg/l et vérifier si l'écran affiche (10).
- Retirer la cuvette et la remplacer par une autre cuvette remplie d'eau distillée.
- A la fin, passer aux échantillons inconnus jusqu'à ce que la valeur affichée sur l'écran soit stable (3 essais pour chaque échantillon).

A la fin du dosage et par mise de la sécurité, il faut toujours fermer la bouteille de gaz propane en premier lieu ensuite l'appareil et la pompe



Figure 10 : Dosage du sodium spectrophotomètre en flamme

Expression des résultats : Le résultat est donné directement en mg/l.

4. Analyse statistique

Différentes méthodes statistiques, notamment l'Analyse en Composantes Principales (ACP) et l'Analyse Hiérarchique des Agrégats (CHA), sont employées pour présenter nos données en utilisant les logiciels SPSS 20 et OriginoPro 22.

L'ACP représente l'une des techniques statistiques essentielles qui regroupe les données en fonction des inter-corrélations entre les variables et des similitudes entre les facteurs d'étude. Les corrélations entre les variables de la qualité de l'eau peuvent mettre en lumière de nombreuses relations hydrochimiques (Cosgrove et al., 2019). Les graphiques en boîte à moustache ont été générés à l'aide de Minitab 16.

5. Indice de qualité des eaux (IQE)

Etude et modélisation Hydrochimique

Afin de classer correctement la qualité de l'eau selon les normes internationales recommandées par l'OMS (Vasanthavigar et al., 2010), un indice de qualité a été adopté dans cette étude (Aljanabi et al., 2021). Cet indice est une technique de classification de la qualité de l'eau qui repose sur la comparaison des paramètres de qualité de l'eau avec les normes internationales ou nationales algériennes dans le cadre de cette étude. L'IQE résume de grandes quantités de données sur la qualité de l'eau en termes simples (Excellent, Bonne, Mauvaise, Très mauvaise, etc.). Dans cette étude l'indice IQE est appliqué pour estimer l'influence des facteurs naturels et anthropiques sur la base de plusieurs paramètres clés du chimisme dans les plaines alluviales des oueds El-Abd et El-Taht .Cet indice est calculé à l'aide de l'équation suivante rapportée par Bekkoussa et al (2018).

Étape 1

$$IQE = \sum SI_i = \sum W_i q_i = \sum \left[\left(\frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right) * \left(\frac{C_i}{S_i} * 100 \right) \right] \quad (1)$$

Ou :

C_i: Concentration de chaque paramètre,,

S_i: Valeur limite de chaque paramètre fixée par les normes de l'OMS,

w_i: Poids de chaque paramètre en fonction de son importance relative dans la qualité de l'eau potable (tableau 2)

q_i: Notation de la qualité pour chaque paramètre,

W_i: le poids relatif,

SI_i: le sous-indice des paramètres.

Pour une explication détaillée des calculs appliqués, une valeur numérique appelée poids relatif (W_i), spécifique à chaque paramètre physique (Tableau 6), est calculée à l'aide de l'équation suivante
Équation selon Brown (1970,1972):

$$W_i = K/S_i \quad (2)$$

Où :

k: constante de proportionnalité et est calculée à l'aide de l'équation suivante :

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

n: nombre de paramètres

S_i: valeur maximale de la norme de l'OMS pour les eaux de surface de chaque paramètre en mg/l à l'exception du pH et du TDS (ppm).

Étape 2: la valeur du sous-indice (SI_i) a été calculée à l'aide de l'expression suivante

$$SI = [(C_i - S_o)] / [(S_i - S_o)] \times 100 \quad (4)$$

où

S_o = valeurs réelles des paramètres dans l'eau pure (généralement $S_o = 0$ pour la plupart des paramètres, sauf pour le pH).

$$S_{pH} = [(C_{pH} - 7)] / [(8.5 - 7)] \times 100 \quad (5)$$

6. Résultats et discussions

6.1. Traitement des résultats de l'analyse

Pour interprétation des résultats d'analyse, la procédure de contrôle a comporté la vérification de la balance ionique. Donc, Toutes les erreurs de la balance ionique (EIB) pour les trois régions se situent dans une limite acceptable de $\pm 5\%$ (tableau 8). Les eaux souterraines de la zone d'étude se caractérisent par leur richesse et une grande variation des éléments chimiques. Les résultats des paramètres chimiques et physiques de l'eau étudiée sont présentés dans le tableau (8).

Tableau 8: Paramètres statistiques des variables physico-chimiques des eaux souterraines.

Composants	<u>FRENDA</u>			<u>AIN HEDID</u>			<u>TAKHEMERT</u>		
	Min	Max	Moyen	Min	Max	Moyen	Min	Max	Moyen
Na^+ (mg/L)	22	265	61.51	29	415	185	24	225	129.75
Ca^{2+} (mg/L)	48.89	142.68	100.31	44.08	226.8	136.79	48.89	195.59	135.06
Mg^{2+} (mg/L)	3.96	103.66	47.69	30.25	160.704	78.12	4.96	202.36	59.02
K^+ (mg/L)	1.2	13.8	5.99	2.4	19.4	9.43	2.5	8.5	4.11
HCO_3^- (mg/L)	201.3	463.6	358.16	262.3	463.6	345.96	323.3	463.6	366
SO_4^{2-} (mg/L)	12.9	219.11	84.71	20.14	466.75	191.21	13.7	193.07	128.59
Cl^- (mg/L)	56.8	383.4	126.28	71	937.2	377.3	35.5	454.4	284

Etude et modélisation Hydrochimique										
NO₃⁻	(mg/L)	3.53	141.71	66.45	4.33	152.95	34.66	14.49	117.87	53.05
T°	C°	26	29	27.89	25.3	29.2	27.56	25.5	29.2	27.6
pH		7.4	7.63	7.55	7.25	7.83	7.55	7.27	7.82	7.41
EC	(μ S/cm)	477	1860	1097.79	765	4630	2047.7	615	2390	1614.8
TDS	(ppm)	239	933	549.5	383	2320	1038.64	308	1194	807.37

Les éléments utilisés dans ce contrôle sont les quartes anions (Cl^- , HCO_3^- , NO_3^- et SO_4^{2-}) et les quartes cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+). Cette balance s'écrit comme suit :

$$\text{EIB} = (\Sigma A - \Sigma C) / (\Sigma A + \Sigma C) \times 100 \text{ en \% pour chaque échantillon d'eau.}$$

Avec :

ΣA = la somme des anions en milliéquivalents par litre.

ΣC = la somme des cations en milliéquivalents par litre.

Si l'erreur calculés est inférieure à $\pm 5\%$ on peut considérer d'analyse comme acceptable (Domenico et Schwartz, 1990). Il en ressort que la majorités des points d'eau sont des échantillons qui présentent un bonne équilibre ionique

En effet, la corrélation de la somme des cations et la somme des anions donne une corrélation significatives (Figure 11). De même, la corrélation linéaire entre la somme des ions et le TDS et EC respectivement sont significatives et très. On peut donc conclure que les procédures analytiques sont très bonnes et la sommes des ions jouent un rôle dans la minéralisation des eaux de notre région d'étude (Figure 12).

D'après la carte Distributions spatiales des cations et anions dans la région d'étude (fig 12), Elle montre la répartition spatiale des cations et anions totaux (Σ Cations en bleu et Σ Anions en vert) dans les plaines alluviales des oueds El-Abd et El-Taht, couvrant les localités de Takhmert, Ain Heddid et Frenda.

La carte (fig 12) illustre l'équilibre ionique entre les cations et anions dissous dans les eaux souterraines de la région étudiée. Dans la majorité des sites, les proportions entre Σ cations et Σ anions sont relativement équilibrées, traduisant une bonne validité analytique. Toutefois, certaines zones (notamment vers Ain Heddid et le sud de Takhmert) montrent une dominance des cations, suggérant

Etude et modélisation Hydrochimique
 une influence possible de la dissolution des roches évaporitiques ou silicatées. La variabilité spatiale observée indique l'existence de différents processus géochimiques liés à la nature des aquifères, à l'infiltration locale ou à des sources anthropiques potentielles (irrigation, pollution).

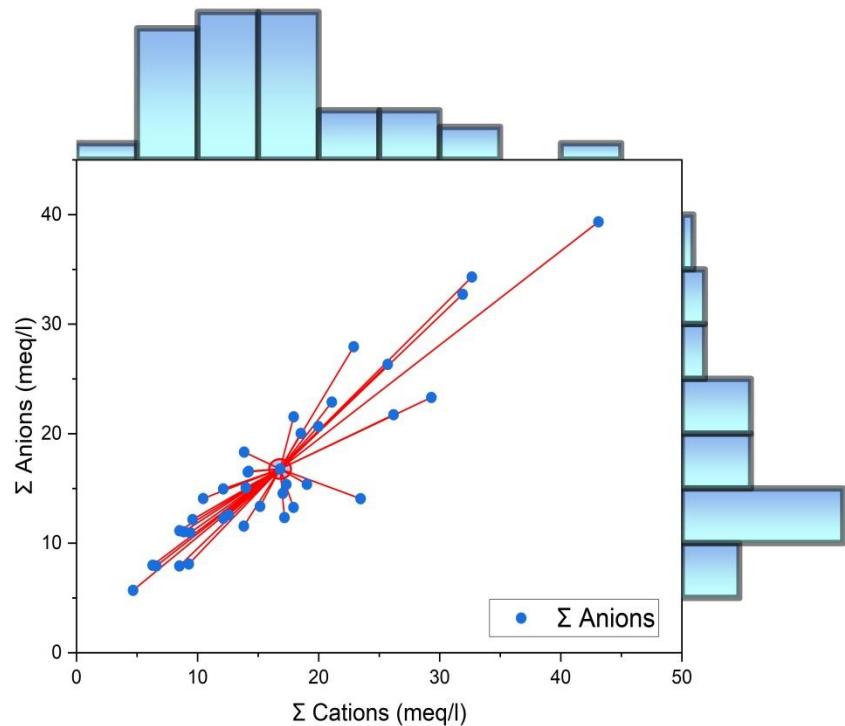


Figure 11 : Corrélation entre la somme des anions et des cations

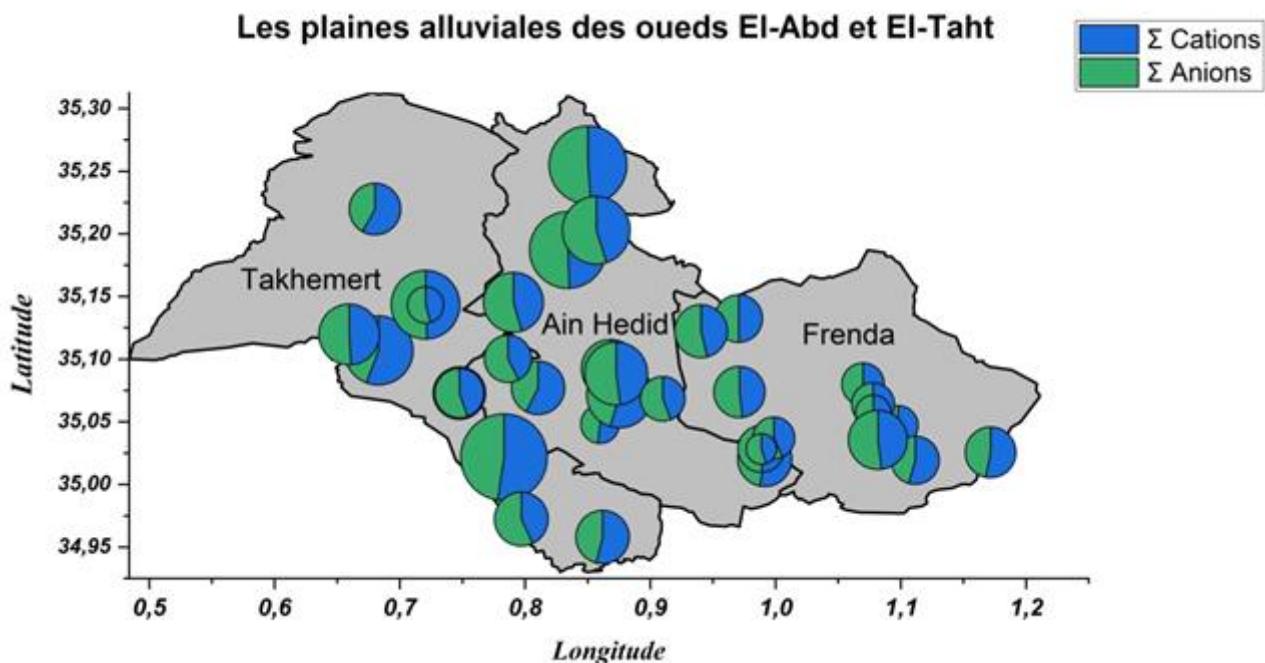


Figure 12 : Distributions spatiales des cations et anions dans la région d'étude

6.2. Analyse statistique des données chimiques

Les paramètres statistiques (minimum, maximum, moyenne) pour les trois zones d'étude sont calculés et récapitulés dans le tableau (Tableau 08) suivant, mettant en évidence une grande variabilité des concentrations des éléments chimiques. Cette variabilité suggère une hétérogénéité spatiale significative de ces éléments, soulignant ainsi la nécessité d'une étude spatiale pour identifier les zones représentant différentes classes de qualité des eaux.

Les concentrations moyennes de calcium, magnésium, chlorures et nitrates pour les trois régions dépassent les normes internationales de l'OMS (2008), soit respectivement 135, 78, 377 et 66 mg/l.

En analysant l'ensemble de la zone d'étude et en se basant sur les résultats moyens, on constate que le Ca^{2+} (122,22 mg/l) et le Mg^{2+} (62,04 mg/l) sont les cations majoritaires, tandis que le chlorure (258,9 mg/l) est l'anion prédominant. Cette situation pourrait s'expliquer par la dissolution du Ca^{2+} et du Mg^{2+} provenant de la calcite et de la dolomite.

Cette richesse en Ca^{2+} est particulièrement remarquable à Ain Hérid (226,8 mg/l), une valeur qui approche la norme de potabilité de 75 mg/l (WHO, 2008). De plus, cette même région (Ain Hérid) enregistre la concentration la plus élevée en Cl^- (Tableau 8). Une étude similaire réalisée dans le

Etude et modélisation Hydrochimique
bassin de la plaine de Ghri (Algérie occidentale) par Bekkousa et al. (2018) a confirmé ces conclusions.

Les résultats mettent en lumière une teneur élevée en NO_3^- et une conductivité électrique dépassant les normes de l'OMS (WHO, 2008) dans la zone d'étude.

Matrice de corrélation

L'analyse de la matrice de corrélation (Figure Corrélation) permet de constater que presque toutes les variables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} et Cl^-) sont positivement corrélées avec la TDS et la conductivité électrique. En examinant la matrice de corrélation des divers paramètres, on note que la plupart des ions présentent des corrélations significatives entre eux. Ces corrélations indiquent qu'ils évoluent ensemble, suggérant ainsi une origine commune.

Par ailleurs, on observe d'autres corrélations notables. Il s'agit des paires (Na^+ - K^+), (Ca^{2+} - Mg^{2+}), (Cl^- - K^+) et (Na^+ - Cl^-), (K^+ - SO_4), (Na^+ - SO_4) et (Cl^- - SO_4). La TDS et la CE étaient significativement corrélées positivement avec tous les ions sauf HCO_3^- et NO_3^- , ces derniers présentant des corrélations négatives avec les autres éléments.

Une corrélation forte ($R > 0,5$) a été observée entre les indicateurs chimiques Cl^- , Mg^{2+} , Na^+ , SO_4^{2-} , Ca^{2+} et la minéralisation totale (TDS et conductivité électrique), suggérant une origine évaporitique (NaCl , CaSO_4 et MgSO_4) de ces éléments dans l'eau. Cependant, ce n'est pas le cas pour les HCO_3^- , qui présentent une corrélation faible avec l'indicateur de salinité TDS.

On remarque que la TDS et la CE sont fortement corrélées avec Cl^- ($R = 0,98$), avec Na^+ ($R = 0,89$) et avec SO_4 ($R = 0,83$). Enfin, une corrélation significative a été observée entre le Mg^{2+} et le Ca^{2+} ($R = 0,65$, $R = 0,54$ respectivement). Ces relations ont été exploitées pour obtenir des informations sur les liens existants entre deux ou plusieurs éléments et les ions responsables de la minéralisation des eaux (Cosgrove et al., 2019).

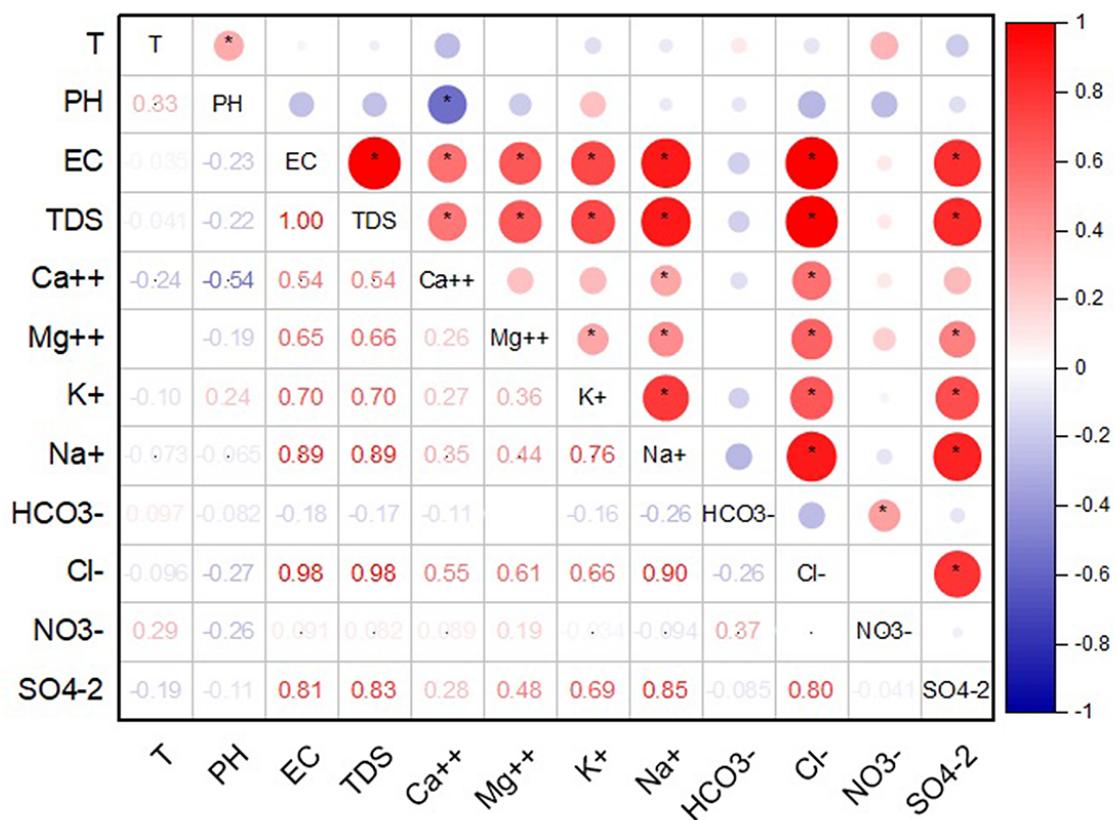
De plus, les coefficients de corrélation entre les chlorures et le sodium sont de $R = 0,90$, tout comme avec le TDS, ce qui indique une origine commune pour ces deux éléments. Cela s'explique par la dissolution de l'halite (NaCl) (Calligaris et al., 2019) que l'on trouve dans les formations de la région d'étude, provoquant la libération de concentrations égales de sodium et de chlorure dans la solution.

La forte corrélation entre les sulfates d'une part, et le chlorure et le sodium d'autre part, suggère que l'échange d'ions peut également avoir une influence considérable sur la composition des eaux souterraines. Il convient de noter que le calcium et le magnésium présentent également une forte

corrélation avec la minéralisation des eaux, en raison du lessivage des argiles ou de la présence de formations carbonatées et des phénomènes d'échange de bases.

D'autres corrélations significatives entre le potassium et le sodium, le chlorure et les sulfates respectivement. La corrélation est légèrement significative entre le magnésium et le sodium, ainsi qu'entre le magnésium et les chlorures, ce qui peut s'expliquer par l'implication des ions sodium dans le phénomène d'échange cationique avec le substratum argileux de l'aquifère. Ces mécanismes perturbent l'acquisition de la charge saline des eaux, ce qui se traduit par plusieurs phénomènes, tels que les échanges de bases caractéristiques des eaux fortement minéralisées, le lessivage des niveaux évaporitiques et la dissolution du gypse et de l'halite, qui peuvent augmenter respectivement les teneurs en ions magnésium et chlorures.

Dans cette analyse de corrélation révèle des liens entre les composants chimiques des eaux souterraines et les mesures de salinité. La plupart des ions montrent des corrélations significatives, suggérant une origine commune. Certains couples d'ions (comme Na-K, Ca-Mg, etc.) sont particulièrement liés. La salinité et la conductivité électrique sont fortement corrélées avec Cl-, Na et SO₄, indiquant une origine évaporitique. Le calcium et le magnésium sont liés à la minéralisation des eaux en raison de processus tels que le lessivage et les échanges de bases. Les minéraux évaporitiques semblent être la principale source de calcium et magnésium, tandis que les minéraux carbonatés contribuent moins en raison de leur moindre solubilité.(fig.13)



*The correlation was significant at level 0.05**

Figure 13: Correlation entre les paramètres mesurés

La représentation graphique de l'évolution des cations et des anions en fonction de la TDS et de la conductivité électrique (Figure 14 et 15) illustre une relation positive et significative. En effet, lorsque la conductivité et la TDS augmentent, cela favorise l'enrichissement minéral des eaux souterraines. Ainsi, le calcium, le magnésium, le chlorure et le sodium sont les principaux ions responsables de ce processus de minéralisation. Cela entraîne des concentrations importantes de Na⁺, Cl⁻, Ca²⁺, Mg²⁺ et SO₄⁻² dans les eaux souterraines.

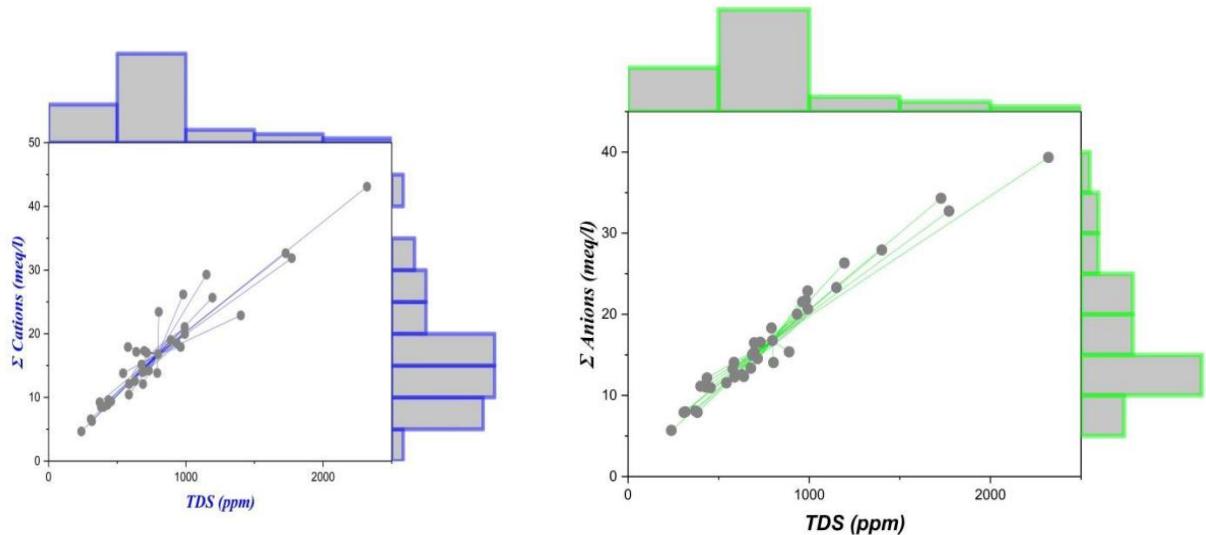


Figure 14: Évolution des cations et des anions en fonction du TDS.

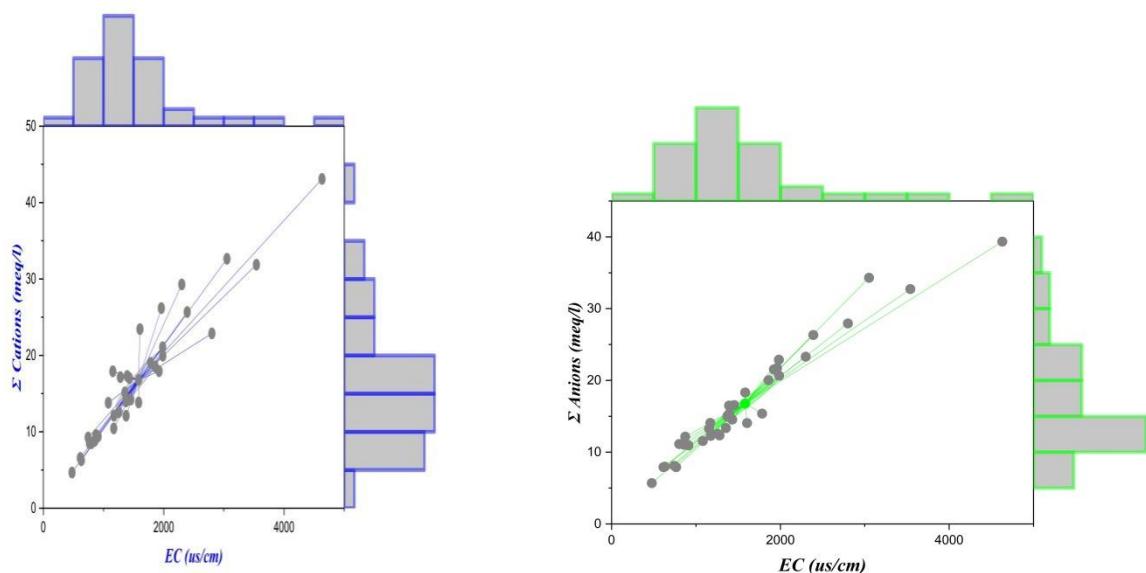


Figure 15: Évolution des actions et des anions en fonction de la(CE)

6.3. Cartographie hydrochimique

Pour visualiser la répartition spatiale des paramètres physico-chimiques, nous avons créé une cartographie hydrochimique. Les concentrations des ions varient en fonction de divers facteurs tels que la composition lithologique, le régime hydrique de la nappe, ainsi que les conditions météorologiques et climatiques. Par exemple, une température élevée favorise l'évaporation, tandis que les précipitations entraînent le lessivage et la dissolution des roches.

Dans notre étude, nous avons analysé et mesuré les paramètres physico-chimiques suivants : le pH, la Conductivité Électrique ($\mu\text{s}/\text{cm}$), la TDS, la Température, les HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ et NO_3^- (Tab.09). Nous avons choisi d'utiliser la méthode d'interpolation (IDW) pour créer des cartes représentant la répartition spatiale des paramètres de qualité des eaux souterraines des nappes alluviales des Oueds El-Abd et El-Taht.

Tableau 09 : Les paramètres physico-chimiques

Nom des forages	X	Y	PH	T	EC	TDS	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	HCO_3	Cl^-
F1(guermo)	35,062190	1,044263	7,63	29,00	744	372	9,2	16,9	5,00	53,1	5,5	1
F2(hopital 01)	35,062244	1,509910	7,52	29,00	1356	678	14,3	30,4	4,6	63	6,6	2,5
F3(benachera)	35,059304	1,049344	7,56	28,00	1080	543	17,00	30,1	5,3	35	7,3	1,3
F4(khochette beghal)	35,058259	1,050999	7,4	28,9	1394	697	16,00	36,9	4,7	52	6,7	1,9
A1(les carrieres)	35,071560	0,875560	7,6	29,00	1783	889	13,2	24,4	9,6	41*5	5,6	4,4
A2(abid)	35,187030	0,834210	7,6	28,01	4630	2320	28,3	60,7	19,4	83*5	5,3	13,2
A3(klib mefetah)	35,247093	0,834007	7,54	27,1	3050	1727	19,5	49,1	14,1	57*5	7,1	9
A4(s,ain zizou)	35,206337	0,788927	7,83	29,00	765	383	6,1	17,7	2,5	29	5,8	1,2
T1(hassi tonia-oued abd)	35,120156	0,659634	7,31	26,7	2300	1150	9,6	50,4	4,00	40*5	6,4	6,3
T2(bounoual)	35,219090	0,646100	7,45	28,00	1279	639	20,1	28,3	4,6	26*5	6,3	2,9
A5(sarl benamra)	35,092420	0,868230	7,49	25,9	1606	803	25,00	47,00	9,7	97	7	3,5
A6(mekadam madani)	35,091274	0,766696	7,62	28,00	1155	578	18,2	36,00	5,8	74	7,1	2,4
A7(soundage)	35,069010	0,911209	7,46	25,3	1961	981	23,2	37,2	11,9	50*5	6	5,4
A8(oued yehia)	35,100320	0,786300	7,41	28,00	1430	715	24,00	32,8	5,5	85	6,2	3,4
F5(ghawti)	35,063815	1,063163	7,52	29,00	1254	627	13,6	24,5	1,2	61	8,1	2
F6(s,ain kabda)	35,062397	1,082133	7,52	28,00	858	429	17,8	19,00	2,4	27	7,2	1
F7(oued ferdja)	35,062569	1,085611	7,5	26,5	911	455	14,00	19,6	2,8	33	7,4	1,1
F8(zawet benyezdi)	35,055976	1,054321	7,56	26,00	632	316	12,3	13,1	2,9	22	6,2	0,9
T3(belhadj-oulad youssef)	35,057299	0,654006	7,27	26,7	1583	792	14,7	25,2	2,5	83	7,3	3,9
T4(A3-BENYOUSEF HACHEMI)	35,073113	0,651275	7,38	25,5	1392	696	26,6	21,2	2,5	78	6,6	3,3
T5(Douar benyousef-bellal)	35,073109	0,651271	7,3	26,6	1374	687	20,3	21,6	2,7	78	6,6	3,4
T6(oued benhmed-bounoual)	35,206337	0,687125	7,42	29,2	1986	993	24,4	25,4	8,5	44*5	6,8	5,3
T7(A4-BOUKHACHA)	35,109517	0,675422	7,34	29,00	2390	1194	18,4	39,00	5,00	45*5	8,6	6,4
T8(benhmed-o-aoun)	35,14325	0,72051	7,82	29,1	615	308	6,1	13,5	3,1	24	7,4	0,5
F9(FRENDA -bendahma)	35,06550	1,063246	7,58	27,00	1860	933	11,00	16,5	13,8	53*5	5,6	5,4
F10(FRENDA -02)	35,06280	1,020630	7,62	28,00	1174	587	13,9	24,00	13,1	48	7	1,4
F11(HOPITAL 02)	35,062247	1,050984	7,49	27,00	802	401	6,1	17,1	2,2	35	7,5	1
F12(MAHKAMA)	35,063639	1,046586	7,63	28,00	1454	730	14,00	27,1	12,00	68	8,6	2,4
F13(OUELHA)	35,064017	1,041543	7,59	28,00	1373	686	9,9	26,5	11,3	68	8,2	2,2
T9 (KHERCHOUF)	35,060377	1,060028	7,58		477	239	6,1	8,1	2,5	31	4,3	0,8
A9(SOUNGAGE 02)	35,128024	0,908479	7,49	25,3	1982	991	13,2	22,8	13,4	53*5	7,1	5,4
A10(BENWAHCHIA)	35,14535	0,79072	7,46	28,5	1923	962	14,8	24,1	6,5	37*5	7,8	4,5

Etude et modélisation Hydrochimique

A11(ROUTE OULD,SADEK DOUAR	DOUAR	35,044219	0,864094	7,25	28,00	3540	1771	28,3	54,1	9,1	45*5	5,7	11,5
A12(DOUAR O,MOHAMED)		35,128015	0,908479	7,82	29,2	2800	1400	5,5	16,3	15,4	73*5	6,3	7,1
A13(MEKADAM MADANI)		34,97226	0,79703	7,61	26,5	1170	585	11,1	17,2	6,7	77	7,8	2,4
A14(CENTRE,GAADA)		35,06826	0,90991	7,5	30,00	873	436	8,5	20,00	2,4	33	8,6	1,1

6.4. Distribution spatiale des paramètres mesurés

➤ Carte de Conductivité électrique

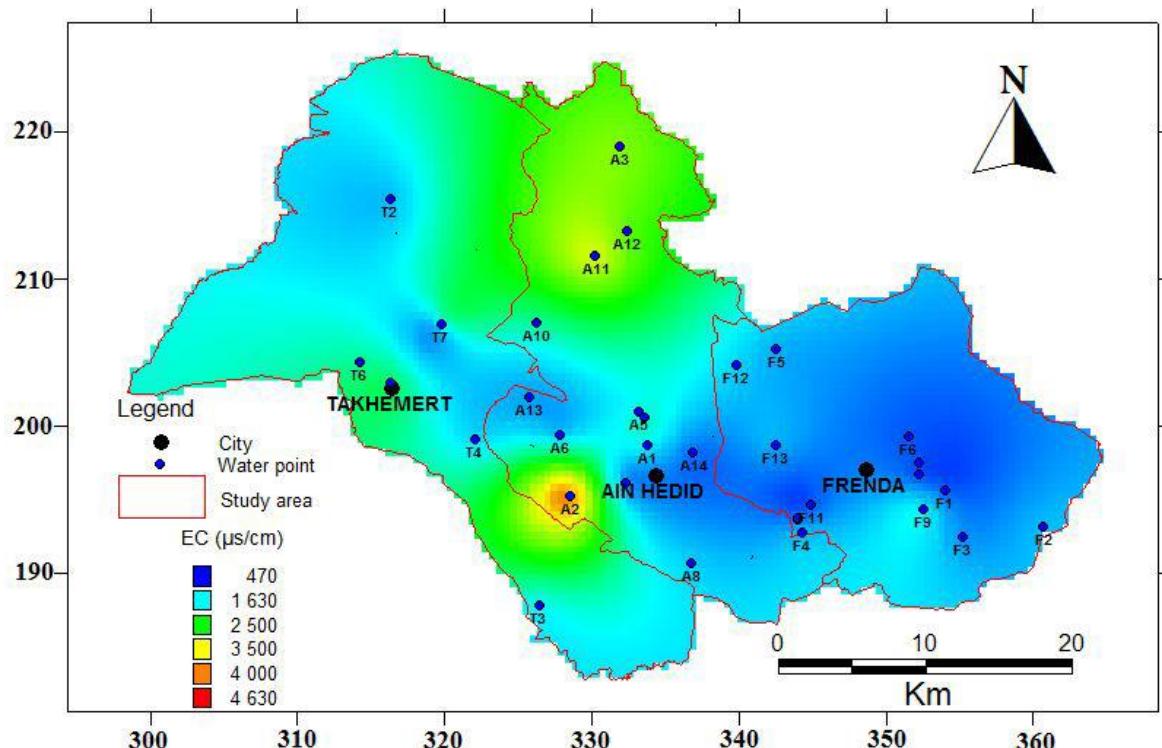


Figure 16: Distribution spatiale de la conductivité électrique des sources étudiées

Selon la figure (16), il est observé que la répartition spatiale de la conductivité électrique est généralement conforme aux normes de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) dans l'ensemble de la plaine alluviale, à l'exception de deux sources présentant des valeurs élevées dans la région A11 et la région A2. Ces valeurs atteignent respectivement 2800 $\mu\text{s}/\text{cm}$ et 4000 $\mu\text{s}/\text{cm}$. La variation de la conductivité électrique peut être attribuée à l'augmentation de la minéralisation, qui résulte de l'intercommunication entre les eaux des calcaires jurassiques ou de la dolomie du Jurassique et celles des alluvions, ainsi que de l'évaporation due à la proximité de la surface piézométrique à certains endroits (faible profondeur) et du climat semi-aride. De plus, cette augmentation de la minéralisation est également due à la dissolution des formations évaporitiques et des minéraux silicatés. Cette augmentation de la minéralisation contribue à accroître la conductivité électrique de la région d'étude.

Carte de TDS :

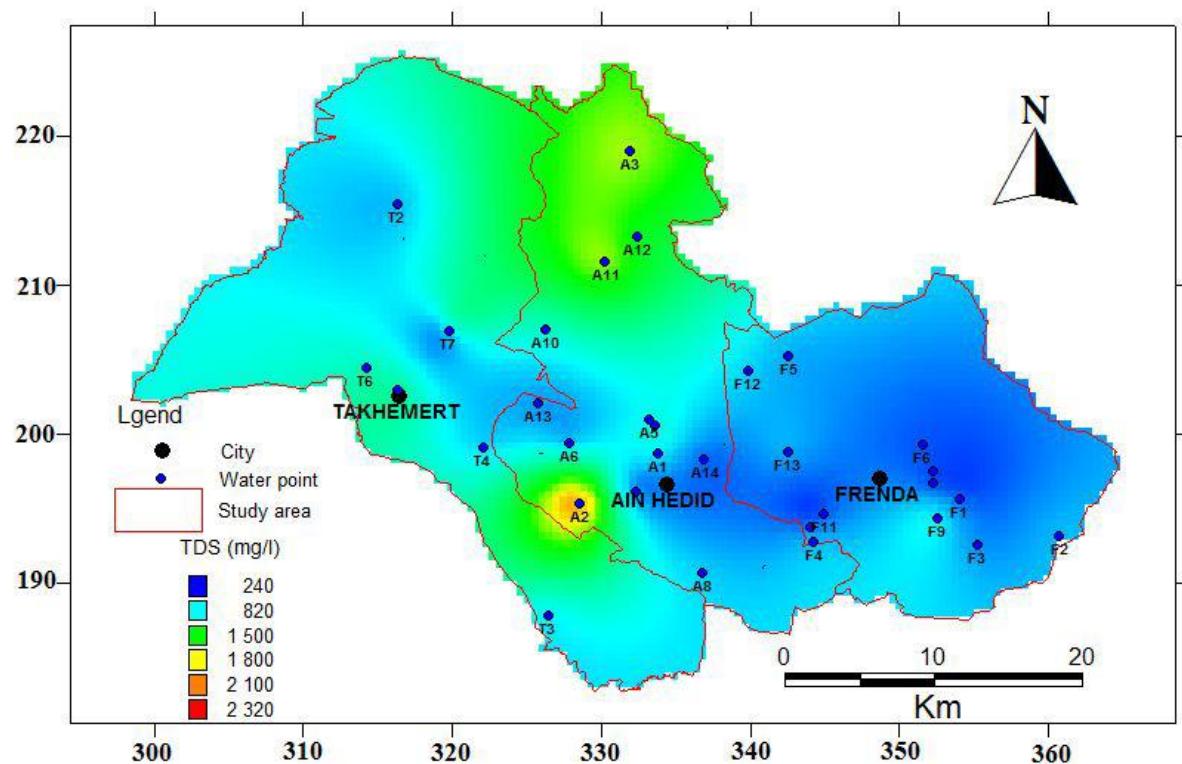


Figure 17. Distribution spatiale de la TDS des sources étudiées

Carte de pH :

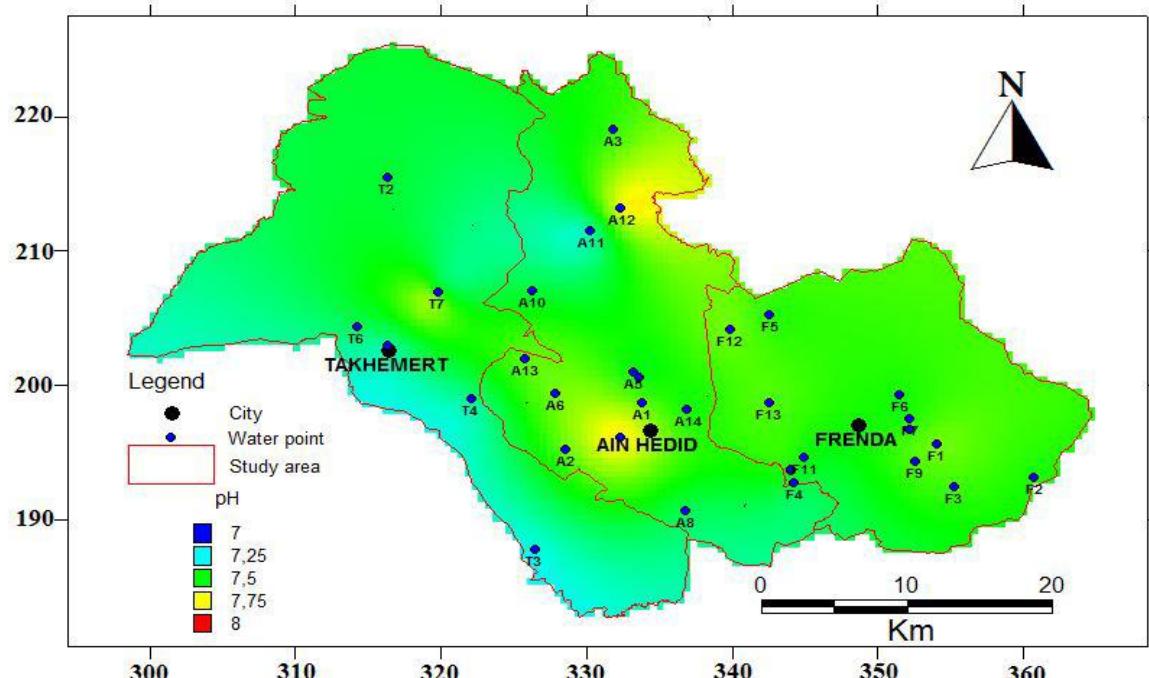


Figure 18. Distribution spatiale du pH des sources étudiées

Les mesures du pH varient entre 7 et 7.8, et ces valeurs restent conformes aux normes établies par l'OMS. Elles indiquent que la majeure partie de la nappe alluviale des oueds El-Abd et El-Taht présente une eau au caractère neutre, comme le montre la figure (17, 18).

➤ Distribution spatiale des cations :

• Carte du calcium

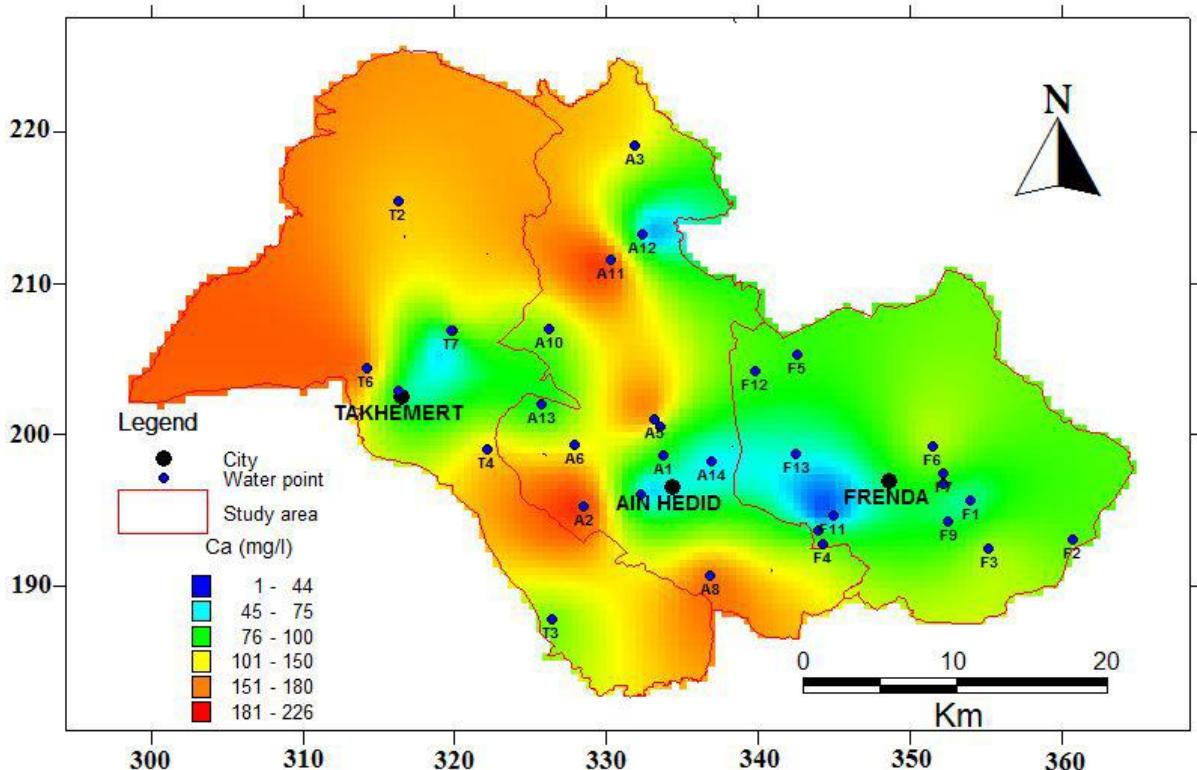


Figure 19: Distribution spatiale du calcium (Ca^{+2}) des sources étudiées

Les concentrations en calcium dans la nappe alluviale des oueds El-Abd et El-Taht varient entre 44 mg/l et 226 mg/l. Ces valeurs excèdent les normes établies par l'OMS, à l'exception des sources situées au centre de Frenda (F11, F13), Ain Hidid (A1, A14, A7, A12), et Takhmert précisément au centre, représentées par les sources T1 et T7 respectivement. Ces niveaux de calcium indiquent que la majeure partie de la nappe alluviale des oueds El-Abd et El-Taht contient une eau riche en calcium qui dépasse les normes de l'OMS.

On observe une augmentation des concentrations en calcium en se déplaçant d'est en ouest vers le sud. Cela suggère soit une dissolution des formations calcaires marneuses (calcite (CaCO_3)), soit la dissolution des formations calcaires et dolomites du Jurassique supérieur ($(\text{Ca, Mg})\text{CO}_3$), ou encore la présence de terrains gypseux d'El Gaada ($(\text{CaSO}_4, 2(\text{H}_2\text{O})$)), voire même la dissolution des calcaires et dolomies de l'Aaléno-Dogger. Ces dernières sont en contact plus intense avec les eaux souterraines de la nappe alluviale, ce qui explique l'augmentation des concentrations en calcium due

au phénomène de dissolution. Enfin, il est à noter que l'ion calcium est sensible au phénomène d'échange de bases.

- **Carte du Magnésium :**

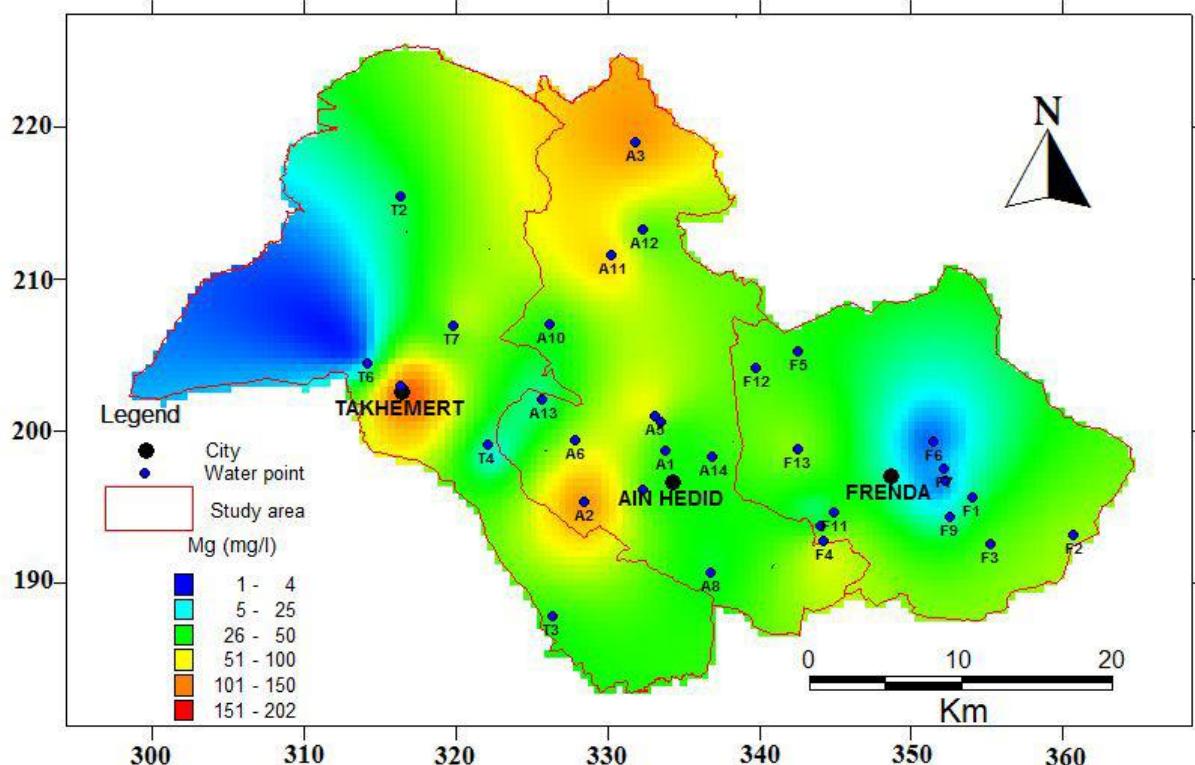


Figure 20. Distribution spatiale du Magnésium (Mg^{+2}) des sources étudiées

Les concentrations du magnésium varient de 4 à 150 mg/l. Il est important de noter que cette concentrations peut varier considérablement en fonction de la lithologie et la nature géologique du sol. On observe des concentrations plus élevées en magnésium près des formations dolomitiques $[(Ca,Mg)CO_3]$ du Jurassique inférieur et moyen (Figure 20). La limite fixée par l'OMS (2008) est de 50 mg/l. Il est à noter que les teneurs en magnésium dépassent ces normes dans toute la plaine sauf dans la partie nord-ouest de Takhmeret et au centre de la région de Frenda. L'évolution du magnésium est similaire à celle du calcium, car ces deux éléments proviennent des mêmes sources (calcaire et dolomie). Ils contribuent que sont les deux éléments à augmenter la dureté totale de l'eau.

- **Carte du Sodium**

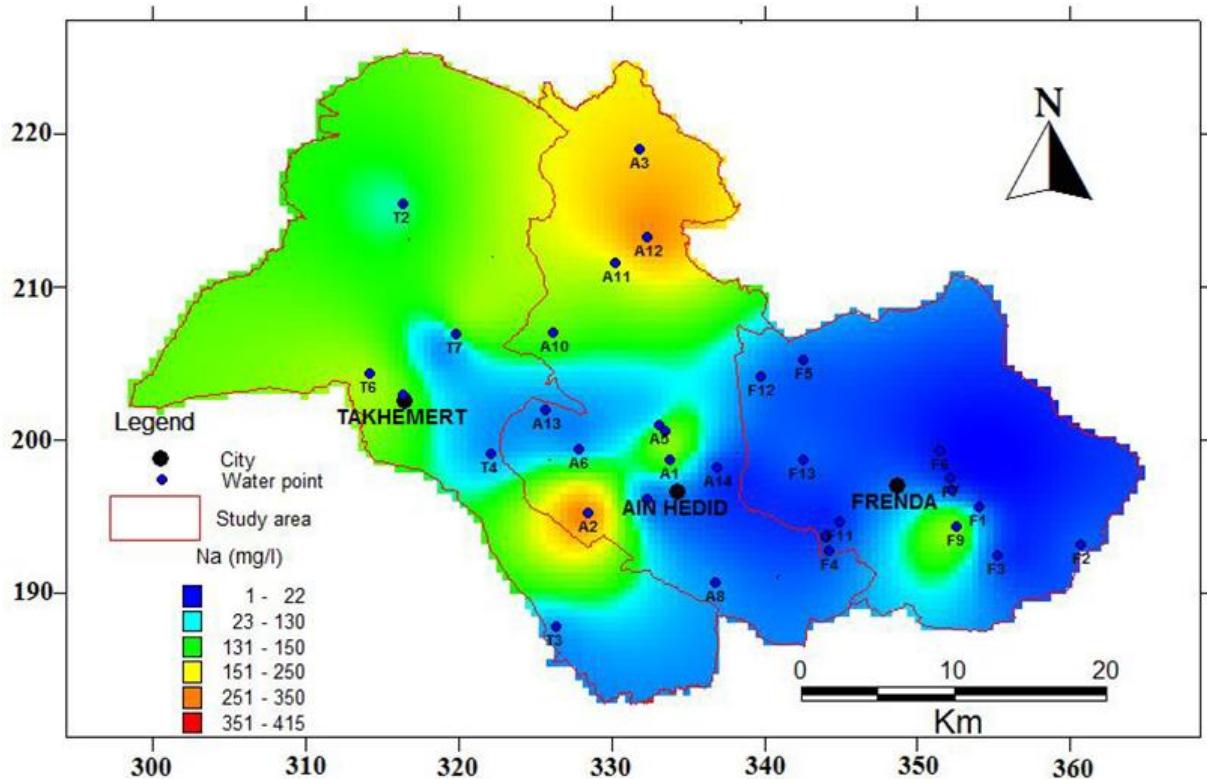


Figure 21: Distribution spatiale du Sodium (Na^+) des sources étudiées

Pour le Sodium, l'observation de la carte de la distribution spatiale du sodium dans les plaines (Figure 21) les concentrations varient de 22 à 350mg/, ces valeurs sont importantes et dépassent les norme OMS dans la partie nord et sud-Ouest du Ain Hadid et pour le reste de la region d'étude les concentrations ne dépassent pas les normes établie par l'OMS , donc l'origine de ces teneurs très importantes est liée principalement à la dissolution des formations Gypseuses au niveau des argiles d'El Faidja.

- **Carte du Potassium**

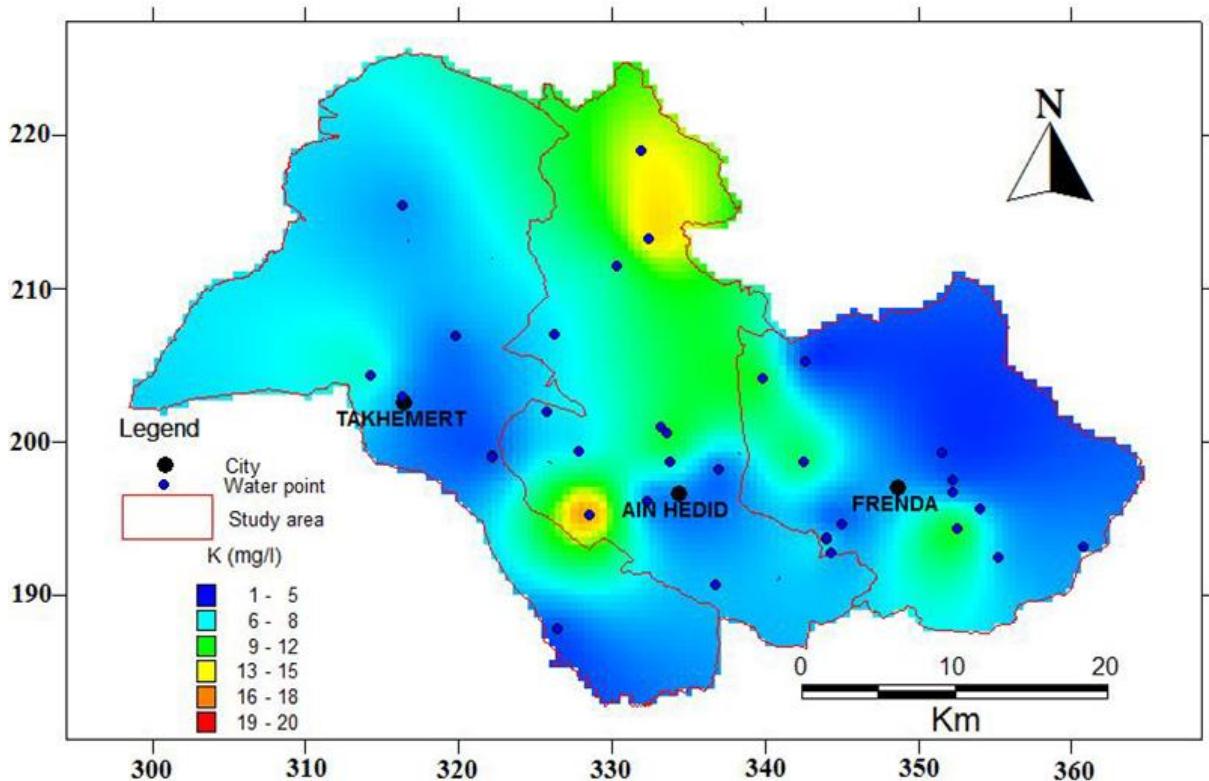


Figure 22: Distribution spatiale du Potassium (K^+) des sources étudiées

Les fortes concentrations en Potassium sont observables dans la zone d'Ain Hedid particulièrement dans sa partie Nord-Ouest et sa partie Sud-Ouest (Figure 22). Cela s'explique par le passage des eaux à travers des formations évaporitiques de l'Oxfordien supérieur, riches en sylvite (KCl). Par ailleurs, le potassium peut également provenir du contact avec les argiles potassiques, telles que les argiles d'El Faidja. En général, dans les autres régions, les teneurs en potassium relativement faibles et ne dépassent pas la valeur établie par l'OMS (12 mg/l).

➤ **Distribution spatiale des anions**

• **Carte du Chlorure**

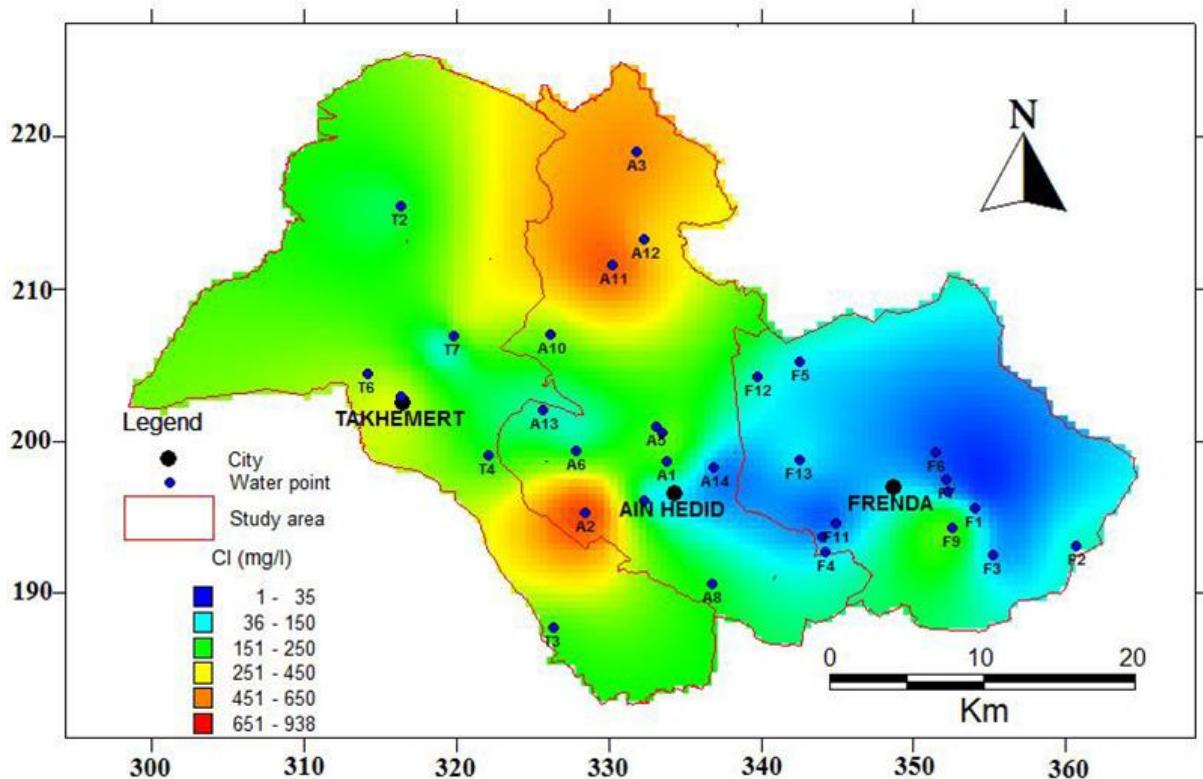


Figure 23. Distribution spatiale du Chlorure (Cl^-) des sources étudiées

Le chlorure est un très bon indicateur de pollution de surface dans les régions éloignées de la mer. Les faibles profondeurs du plan d'eau et la nature lithologique de la couverture de la nappe sont en faveur des teneurs élevées enregistrées. L'analyse de la carte (Fig 23) montre que les teneurs en chlorures dépassent les normes Algérienne fixée qui est de 250 mg/l dans la partie nord-Ouest et sud -ouest de la région d'étude (Ain Hedid et une partie du Takhemert).

- **Carte du Sulfates**

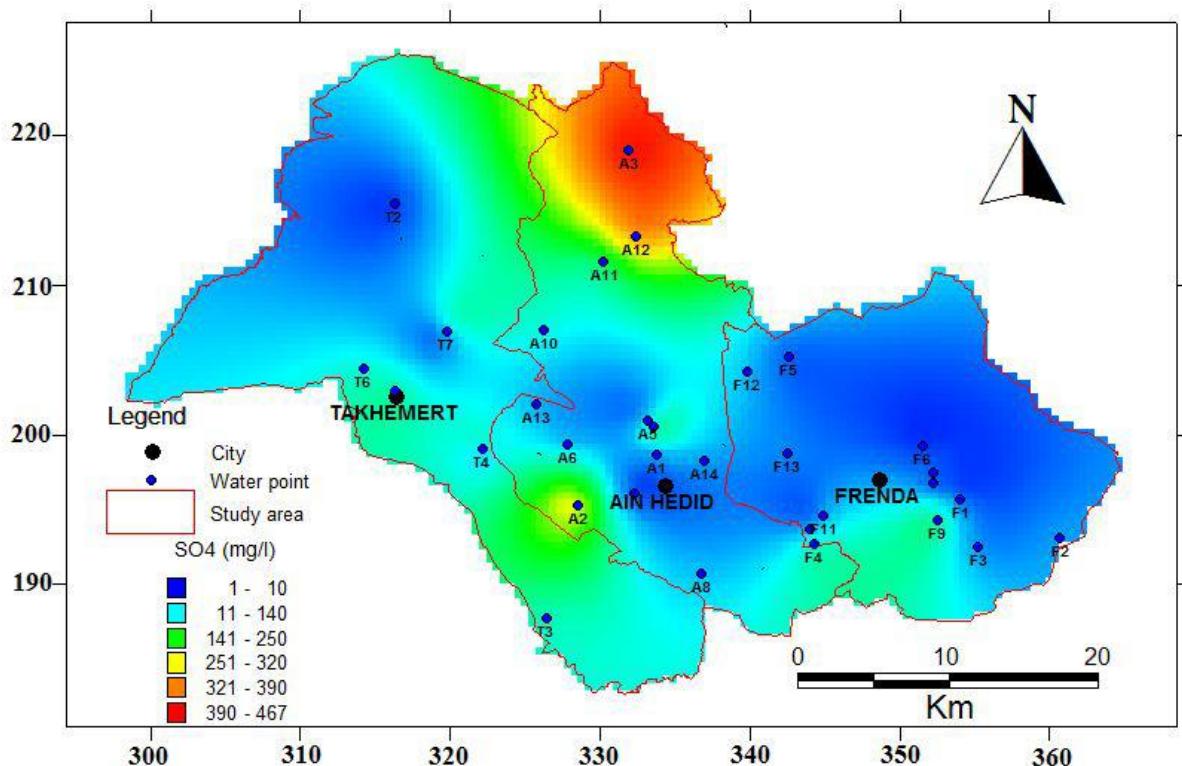


Figure 24: Distribution spatiale du Sulfate (SO₄⁻) des sources étudiées

Les concentrations en sulfates dans les eaux présentent une grande variabilité, déterminée par la solubilité des formations gypseuses et l'utilisation d'engrais chimiques sulfatés, ainsi que par les rejets d'eaux usées et industrielles contenant de l'acide sulfurique (H₂SO₄). D'autre part, elles sont influencées par le lessivage des terrains argileux et marneux. En général, ces concentrations se situent entre 10 et 465 mg/l. Les niveaux les plus élevés sont observés dans la région d'Ain Hérid (à la fois dans sa partie nord et sud-ouest), ainsi que dans une petite partie de la région de Takhemert (Figure 24). Ces concentrations élevées sont attribuables au lessivage des dépôts évaporitiques et à l'impact des apports anthropiques, notamment le lessivage des engrains chimiques.

- **Carte du Bicarbonates**

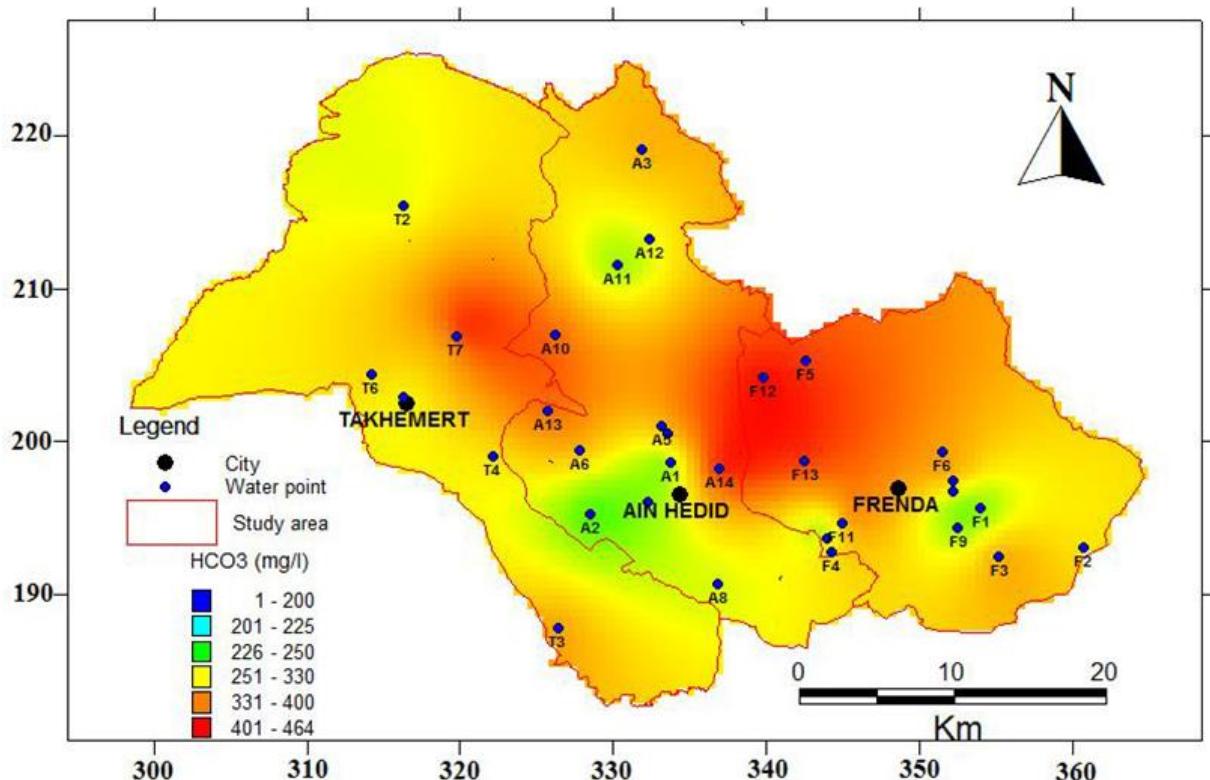


Figure 25: Distribution spatiale du Bicarbonates (HCO_3) des sources étudiées

Les concentrations les plus élevées en bicarbonates se situent dans la partie centrale de la zone d'étude, mais elles sont inférieures aux normes établies par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) pour l'ensemble de la plaine alluviale des oueds El-Abd et El-Taht (Figure 25). Ces teneurs en bicarbonates varient entre 200 et 465 mg/l, ce phénomène de diminution des concentrations s'explique par la dissolution lente de minéraux carbonatés dans la zone d'étude tels que le calcaire.

- Carte du Nitrate

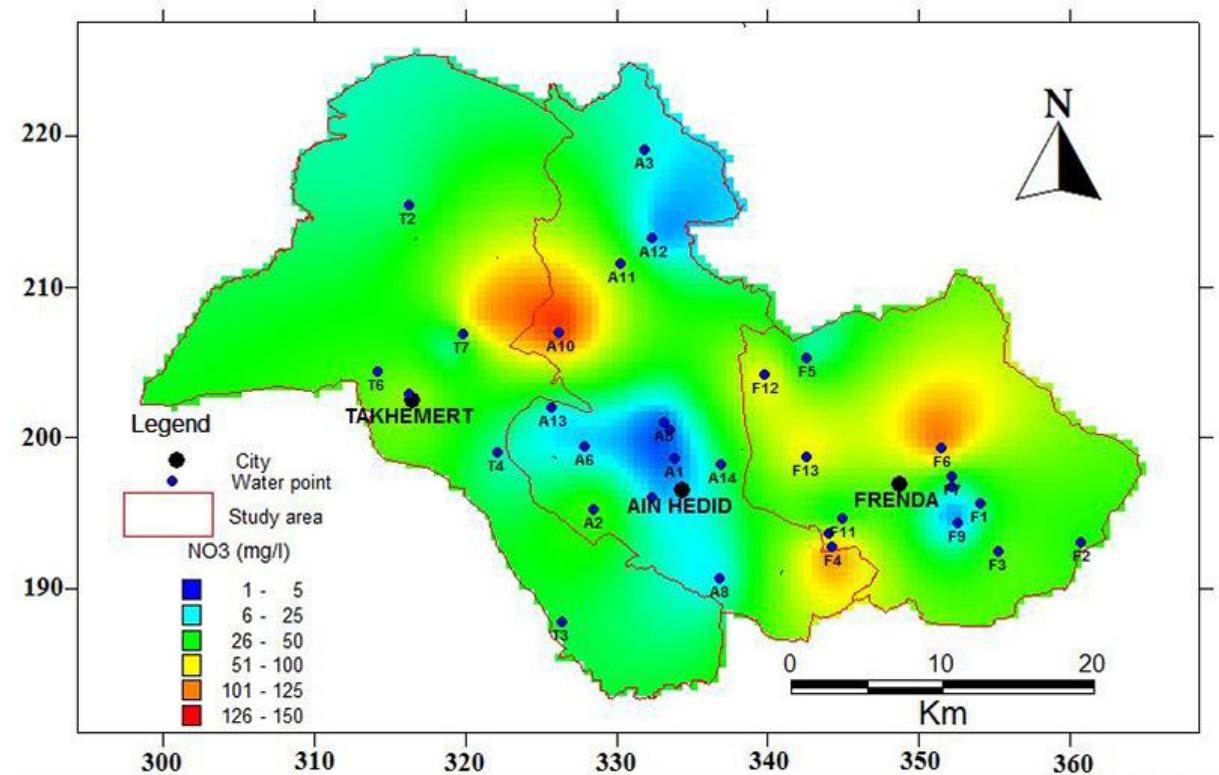


Figure 26: Distribution spatiale du Nitrate (NO₃) des sources étudiées

La carte illustre l'évolution des concentrations en nitrate (Figure 26) révèlent que seulement 36 % des points d'eau dépassent les normes établies par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) fixées à 45 mg/l. Les concentrations les plus élevées sont enregistrées à Ain Hédid avec 152.95 mg/l, à Frenda avec 141.71 mg/l, et dans la région de Takhemert avec 117.87 mg/l. Ceci confirme leur origine principalement anthropique, due en grande partie à l'utilisation d'engrais azotés. Il convient de noter que la zone d'étude est principalement dédiée à l'agriculture. L'élevage, les eaux usées et les décharges peuvent également contribuer à la présence de nitrates dans cette zone. En effet, la nappe des plaines alluviales du bassin versant d'Oued El-Abd et El-Taht est exposée au risque de pollution par les nitrates issus des activités industrielles et agricoles, ainsi que des effluents domestiques souvent déversés sans traitement ni épuration. Ces éléments accroissent le risque de dégradation de la qualité des ressources hydriques. Par conséquent, il est impératif de mener une étude de vulnérabilité de la nappe et de réaliser une carte de vulnérabilité.

➤ Variabilité spatiale des paramètres

La figure (28) illustre les variations spatiales des paramètres physico-chimiques dans les plaines alluviales des oueds El-Abd et El Taht. Cette représentation visuelle permet de comprendre la dispersion spatiale des concentrations en éléments chimiques et offre des indications sur l'origine de la minéralisation des eaux.

On observe que les chlorures présentent une grande variabilité, suivis du sodium, du calcium, du magnésium et du sulfate. Cette hiérarchie peut s'expliquer par diverses sources des éléments chimiques dans les eaux, que ce soit par la dissolution de la roche aquifère (comme le gypse, l'halite et les dolomies), des sources anthropiques (eaux usées et engrais) ou des échanges de bases. Ces ions sont acquis lors du passage des eaux à travers différentes formations telles que l'halite, le gypse et les marnes (Bekkoussa et al 2018). En revanche, la boîte des bicarbonates présente une dispersion plus restreinte, indiquant ainsi une origine principalement liée à la formation carbonatée.

Les statistiques représentées par les diagrammes en boîtes à moustaches (voir figure 27) confirment de manière claire et évidente nos résultats.

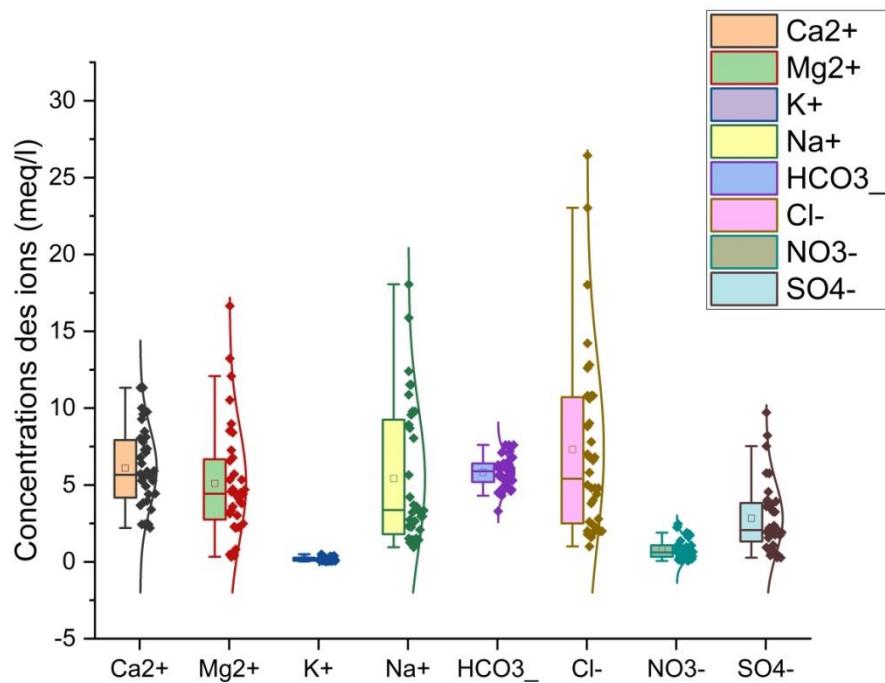


Figure 27 : Boîtes de box des éléments chimiques des des plaines alluviales des oueds El-Abd et El Taht .

➤ Analyse en Composantes Principales (ACP)

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) représente une méthode d'analyse statistique destinée aux données multidimensionnelles. Plusieurs chercheurs en Algérie, spécialisés dans le domaine de l'hydrogéologie, ont utilisé cette méthode pour traiter les données hydrochimiques des nappes (Bekkoussa et al. 2018). En effet, cette technique vise à identifier les relations entre les variables chimiques et à regrouper celles qui présentent des comportements similaires, offrant ainsi un aperçu de l'évolution de la composition chimique des eaux souterraines. Son utilisation en hydrochimie constitue un complément précieux dans l'interprétation et l'analyse des processus hydro-chimiques, comprenant les origines, les flux, la nature du réservoir, etc. Cette approche préalable nous permet d'anticiper les éléments et les sites susceptibles de présenter des niveaux de pollution. Les résultats de l'analyse généreront de nouvelles hypothèses pour élargir et approfondir la compréhension du problème étudié.

➤ Objectifs et aspects théoriques

L'analyse factorielle en composantes principales vise principalement les objectifs suivants :

1. Décrire le profil chimique des eaux souterraines sur une période donnée d'observation.
2. Examiner les interrelations entre un grand nombre de variables.
3. À partir de cette analyse, regrouper ces variables en ensembles restreints appelés facteurs ou composantes.
4. Fournir une première indication concernant les éléments liés à la pollution.
5. Établir une hiérarchie entre ces ensembles de variables, basée principalement sur leur pouvoir explicatif individuel (il convient de noter que cette méthode permet également d'établir une hiérarchie des variables au sein de chaque composante).

Pour l'analyse retenue dans l'interprétation finale par ACP, nous avons sélectionné les variables suivantes : Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , ainsi que la température et le pH. Les principes de cette méthode ont été exposés précédemment. Les données sont composées de 12 variables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- ainsi que la température et le pH analysées sur 36 échantillons, respectivement en juin et en août 2021. Pour mener à bien cette étude, nous avons fait

Etude et modélisation Hydrochimique

usage des logiciels Spss et Origin Pro 2022. Le tableau (10) présente les corrélations entre les variables et les trois facteurs que nous avons pris en compte (F1, F2 et F3).

Valeurs propres

Une valeur propre représente de la variation des individus sur l'axe correspondant. Afin de faciliter leur interprétation, ces valeurs sont exprimées en pourcentage de la totalité des valeurs propres. Dans notre étude, 12 facteurs englobent 100 % de la variance (Tableau 10). Seuls les facteurs F1, F2 et F3 ont été pris en compte, car ils représentent 76,5 % de la variance totale (Figure 28). Par conséquent, nous allons nous concentrer sur ces trois axes pour notre analyse.

Tableau 10: Valeurs propres et pourcentages des axes principaux.

Composent (Axe)	Valeurs propres initiales			Extraction les Semmes des Charges Carrées			Rotation Sommes des Charges Carrées.		
	Valeur propre	% Variance	Pourcentage cumulé (%)	Valeur propre	% Variance	Pourcentage cumulé (%)	Valeur propre	% Variance	Pourcentage cumulé (%)
1	5,897	49,141	49,141	5,897	49,141	49,141	5,640	47,001	47,001
2	1,759	14,657	63,798	1,759	14,657	63,798	1,898	15,816	62,817
3	1,531	12,755	76,553	1,531	12,755	76,553	1,648	13,736	76,553
4	,882	7,352	83,905						
5	,635	5,293	89,199						
6	,493	4,111	93,309						
7	,460	3,836	97,145						
8	,144	1,197	98,342						
9	,130	1,084	99,426						
10	,061	,506	99,932						
11	,007	,057	99,988						
12	,001	,012	100,000						

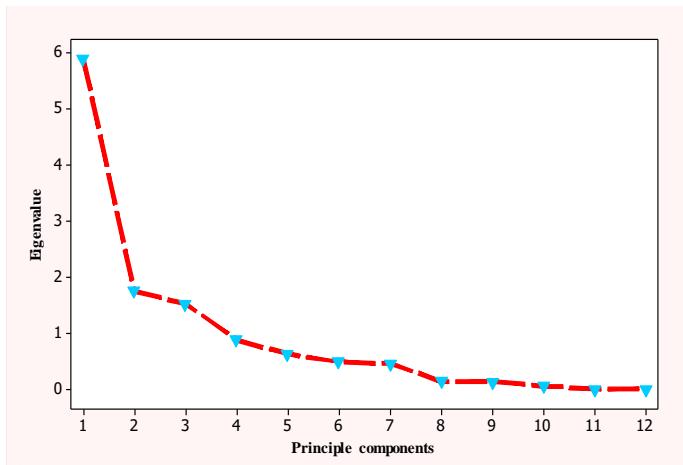


Figure 28: Variabilité cumulée des valeurs propres.

L'analyse en composantes principales effectuée sur l'ensemble des données recueillies en juin et en août (Tableau 10) révèle que seulement trois facteurs sont nécessaires pour expliquer le système. Le premier axe (F1) représente 49,14 % de la variance totale, le deuxième (F2) explique 14,657 %, et le troisième (F3) présente 12,75 %. Ainsi, ces trois axes sont suffisants pour rendre compte de la variance du système.

Analyse de l'espace des variables

La contribution de chaque variable à la formation d'une composante principale se manifeste à travers le coefficient de corrélation avec l'axe considéré. Après normalisation des valeurs, nous avons employé la méthode de rotation varimax proposée par Kaiser. L'objectif était d'identifier les divers regroupements de variables ainsi que ceux qui présentent des oppositions, tout en déterminant les critères qui les définissent ou les distinguent les uns des autres. Le tableau (11) expose les corrélations entre les variables et les trois facteurs considérés (F1, F2 et F3) :

Tableau 11 : Corrélations entre variables et facteurs principaux.

Paramètre	Composant		
	F1	F2	F3
T°C	-0.019	0.555	0.555
Ph	-0.064	0.916	-0.160
EC	0.971	-0.169	0.066
TDS	0.975	-0.163	0.063
Ca ⁺²	0.430	-0.690	-0.023
Mg ⁺²	0.641	-0.136	0.318
K ⁺	0.811	0.234	-0.132
Na ⁺	0.937	0.023	-0.149
HCO ₃ ⁻	-0.215	-0.058	0.647
Cl ⁻	0.951	-0.218	-0.040
NO ₃ ⁻	0.024	-0.160	0.843
SO ₄ ⁻²	0.872	-0.033	-0.075

Le tableau (11) présente les valeurs de pondération des facteurs observées pour chaque composante principale. Les coefficients de chaque paramètre indiquent la contribution de la variable correspondante à la composante principale spécifique. Précédemment, d'après Liun et al. Ont classifié les facteurs en fonction de ces valeurs. En effet, les facteurs sont classés comme faibles,

modérés et forts si leurs valeurs de saturation factorielle sont respectivement de 0,30 à 0,50, de 0,50 à 0,75 et > 0,75. Il a été établi que le F1 était positivement corrélé avec la conductivité (0.975), le

Etude et modélisation Hydrochimique

chlorure (0.951), le TDS (0,975), le potassium (0.811) et le SO₄ (0.872), avec une variance de 49,08 %. Cependant, avec une variance de 14,64 %, le pH (0,916) et T° (0.555) a montré un poids négatif dans la synthèse du F2. Le nitrate (0,843) et HCO₃ (0.647) a affiché un poids positif dans le F3 avec une variance de 12.75 %.

Le premier axe regroupe le TDS, la conductivité électrique, les chlorures, le sodium, le sulfate, le potassium et le magnésium. Il reflète ainsi la minéralisation totale des nappes alluviales des deux bassins versants des oueds El-Abd et El-Taht, illustrant un axe de minéralisation évaporitique (comportant l'halite, le gypse, la sylvine). Une corrélation très significative est observée entre le TDS, Cl et Na⁺, qui sont pratiquement confondues. Le calcium est fortement corrélé avec le deuxième facteur (F2), indiquant la dissolution des formations carbonatées (calcaire). Quant à la pollution des eaux, elle est représentée sur le troisième facteur (F3), regroupant les nitrates et les bicarbonates. Cela

réfère deux origines distinctes : les bicarbonates proviennent principalement de la formation carbonatée, tandis que les nitrates ont une origine anthropique (issue des eaux usées et des engrangements).

Selon les résultats de l'analyse ACP (fig 29), on observe trois groupes distincts :

Le groupe (I) rassemble la majorité des paramètres tels que le TDS, la conductivité, Ca, Mg, K, Na, Cl et le SO₄. Ces eaux présentent des niveaux de conductivité et de TDS dépassant les normes établies par l'OMS. De plus, elles se distinguent par une concentration élevée en Ca et Mg.

- Le groupe (II) concerne des eaux polluées avec des concentrations élevées en NO₃ et en bicarbonates (provenant de calcaire et de dolomie).
- Le groupe (III) représente des eaux de nature neutre regroupant le pH et la température.

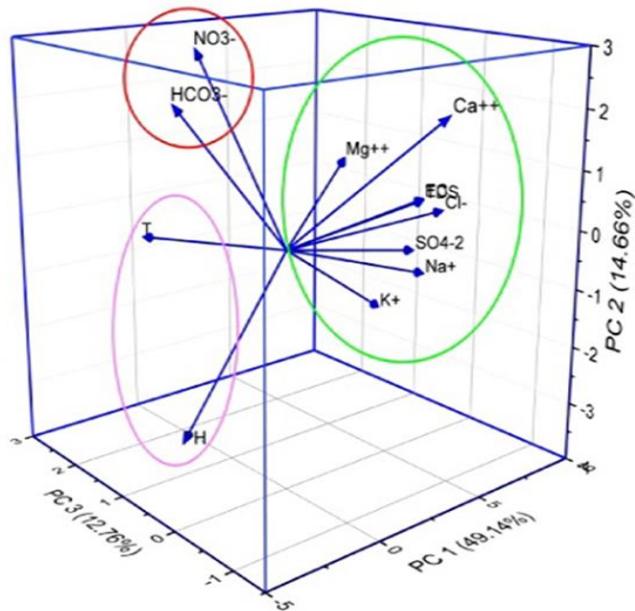


Figure 29: Corrélations des variables (diagramme des composantes dans l'espace)

Analyse de l'espace des individus

A. Étude AFC et CHA

A.1. Étude la dispersion des sources :

La figure (30) suivante représente la répartition des sources sur le plan factoriel qui donne une meilleure information est égale 63. 72%

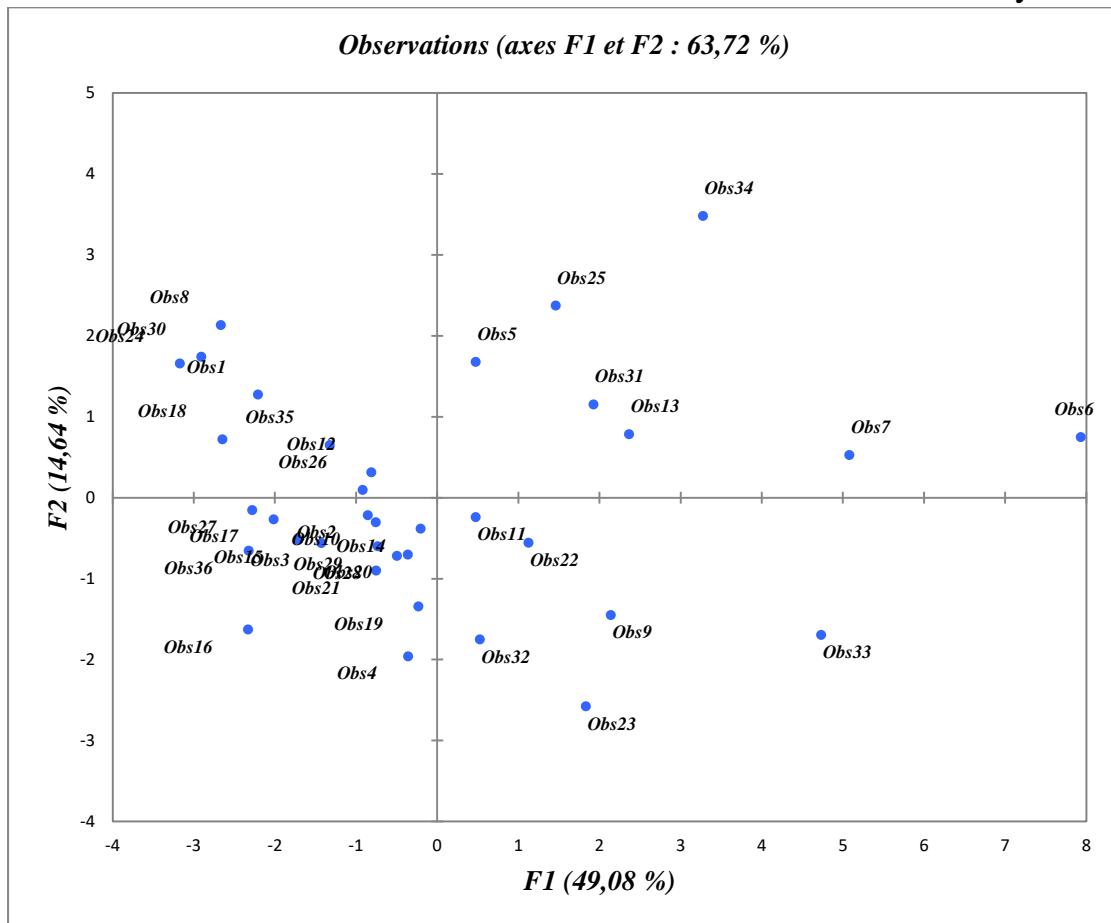


Figure 30: La carte des sources sur le plan factoriel

Pour réaliser le nombre de groupe on a choisi le diagramme de CHA qui a grand valeur de déterminer les groupes et les classes pour accomplir la figure de AFC précédente.

B.2. Étude la dispersion des sources avec les variables :

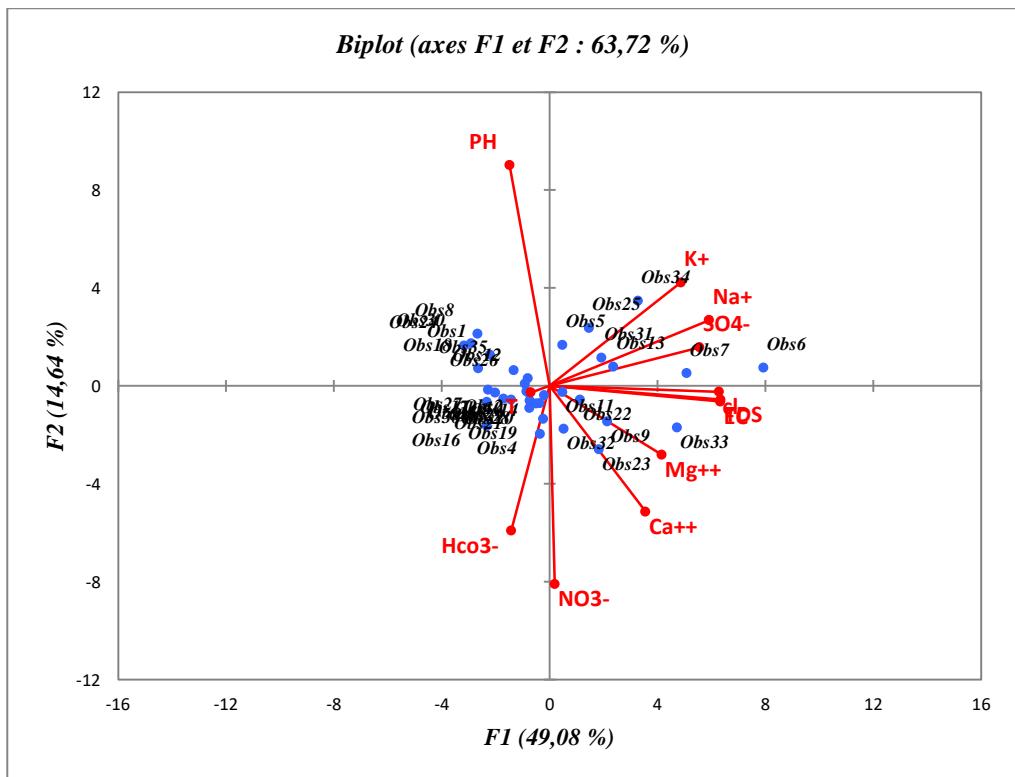


Figure 31 : La dispersion des sources avec les variables sur le plan AFC

L'interprétation de la figure (31) présente que les variables sont proches à la source dans laquelle signifient que la source est très riche et contient à la fois une teneur élevée de l'un ou plusieurs paramètres comme les sources BOUKHACHA et BENWAHCHIA ayant une caractéristique moyenne de la teneur en Ca^{+2} .

Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)

La Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) se révèle être un outil puissant pour l'analyse des données en chimie de l'eau et pour la construction de modèles géochimiques (Yidana et al., 2008 ; Ahoussi et al., 2011). Son principe repose sur la définition d'un critère d'agrégation des classes, basé sur la mesure du degré de ressemblance ou de dissemblance entre les échantillons (Templ et al., 2008). L'objectif fondamental de cette méthode statistique est de regrouper les individus en classes distinctes (Demlei et al., 2007).

Suite à ces diverses analyses, une classification ascendante hiérarchique des données physico-chimiques a été effectuée à partir de 36 échantillons provenant de sources réparties sur la majeure partie de la zone d'étude et de 12 paramètres physico-chimiques. Ces paramètres présentent une corrélation plus significative entre eux.

L'analyse hiérarchique des données chimiques révèle trois regroupements principaux des variables, comme illustré dans la Figure (32)

Le premier groupe englobe les variables suivantes : TDS, EC, Cl-, Na+, Ca2+, Mg2+, SO4 2- et K+. Cette catégorie rassemble les éléments qui jouent un rôle crucial dans la minéralisation de nos eaux, notamment les chlorures qui sont directement liés au TDS. On distingue également une concentration élevée en Ca et Mg dans ce groupe. Le second groupe est composé de HCO3- et NO3-. Ces éléments contribuent de manière moins significative à la minéralisation des eaux souterraines du bassin versant des oueds El-Abd et El-Taht. Le troisième groupe est représenté par le pH et la température, caractérisant des eaux de nature neutre (avec un pH inférieur à 8 conformément aux normes établies par l'OMS).

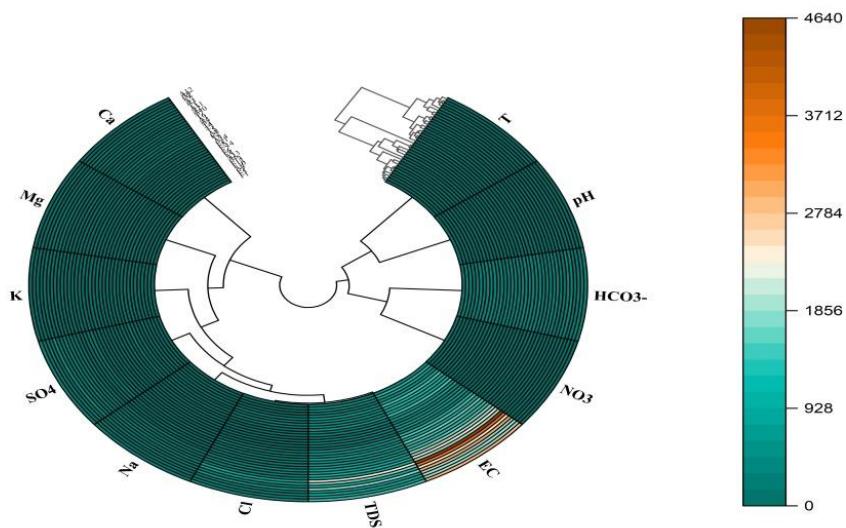


Figure 32 : L'analyse hiérarchique des données chimiques

La classification ascendante hiérarchique établie sur les sources (Figure 33) revête que les eaux présentent la grande diversité des faciès chimiques des eaux, influencée à la fois par leur contexte géologique et leur répartition géographique. On peut distinguer trois grandes familles, chacune comprenant plusieurs sous-familles. Cette observation met en évidence que la composition chimique des eaux est influencée par la direction d'écoulement au sein des formations géologiques traversées.

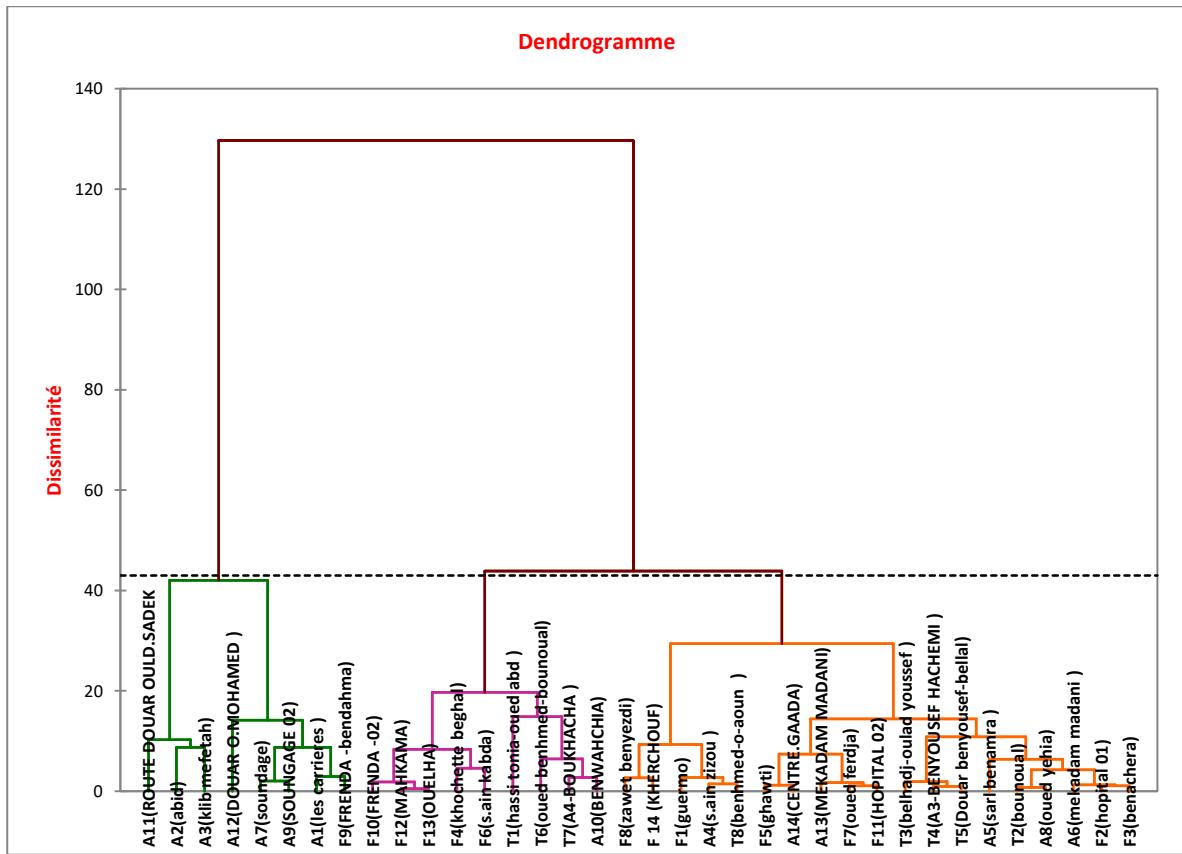


Figure 33 : La carte des sources sur CHA

La méthode (CAH) est l'approche la plus couramment utilisée, ce qui donne les résultats les plus significatifs. La comparaison des résultats entre l'ACP des individus et la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) révèle trois groupes similaires (Tableau 12). Ces constatations démontrent que la minéralisation des eaux souterraines dans le bassin versant des oueds El-Abd et El-Taht, est principalement influencée par les chlorures, le calcium et le magnésium, qui jouent un rôle crucial dans la minéralisation de nos eaux.

Tableau 12 : Comparaison entre (CAH) et l'ACP

Classification des groupes	ACP	CAH
Groupe 1	Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , TDS, EC, Mg^{2+} , Cl^- ,	Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , TDS, EC, Mg^{2+} , Cl^- , Ca^{2+}
Groupe 2	HCO_3^- et NO_3^-	HCO_3^- et NO_3^-
Groupe 3	T° et pH	T° et Ph

7. Détermination des principaux facies hydrochimiques :

□ Classification des eaux selon le diagramme de PIPER :

Le diagramme de PIPER se distingue par sa capacité à présenter plusieurs échantillons sur un même plan. Il se compose de trois éléments : un triangle pour les cations, un triangle pour les anions, et un champ central en forme de diamant (Figure 34). Ce diagramme est utilisé pour analyser les caractéristiques chimiques de l'eau et les échantillons d'eau ayant une composition chimique similaire se regroupent, révélant ainsi les processus chimiques de l'eau (Shelton et al., 2018). Il fournit des informations détaillées sur les faciès hydrochimiques et les types d'eaux souterraines (Moreno-Merino et al., 2021; Ji et al., 2024). En utilisant le diagramme de Piper, il a été démontré que deux faciès chimiques sont présents. Le premier est de type chlorure sulfate calcium et magnésium ($\text{Cl}-\text{SO}_4^{2-}-\text{Ca}-\text{Mg}$) et le second est de type bicarbonate calcium magnésium ($\text{HCO}_3^{2-}-\text{Ca}-\text{Mg}$) (Figure 81). Cela pourrait résulter de la dissolution des dépôts alluvionnaires du Quaternaire, des formations carbonatées, ainsi que des formations évaporitiques. Cette dissolution générée divers éléments chimiques, tels que les chlorures, le calcium, le magnésium et le sodium.

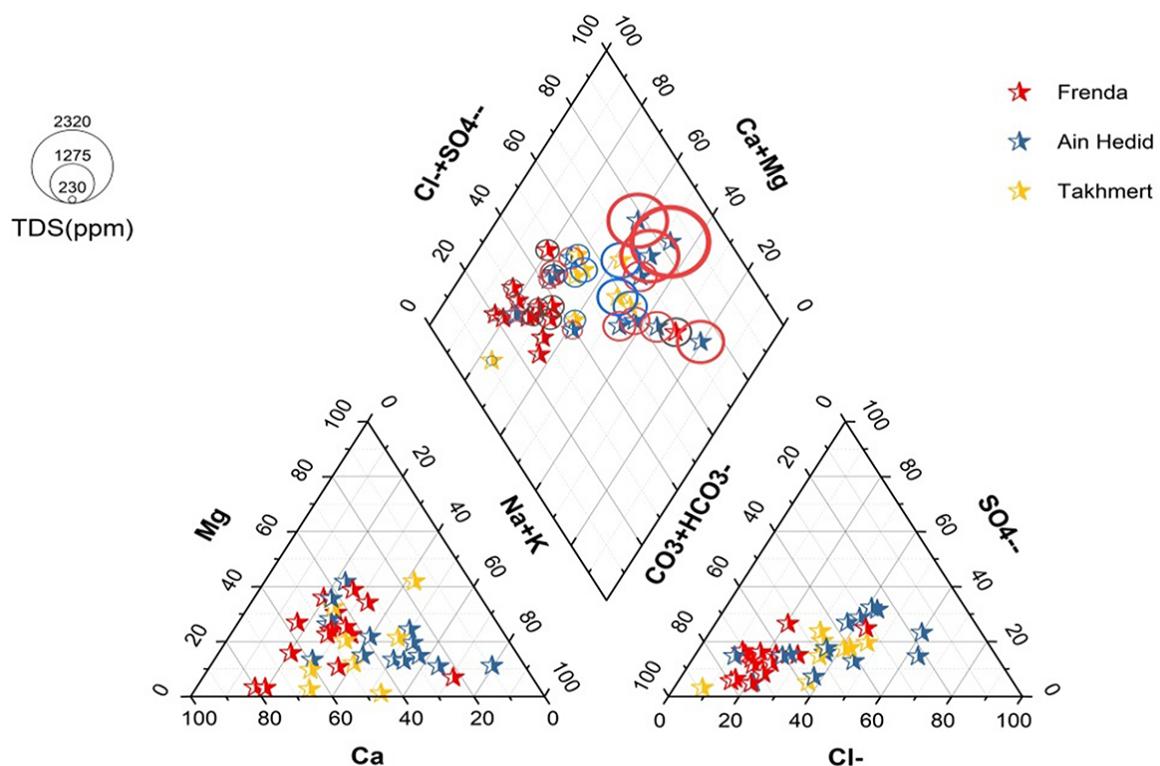
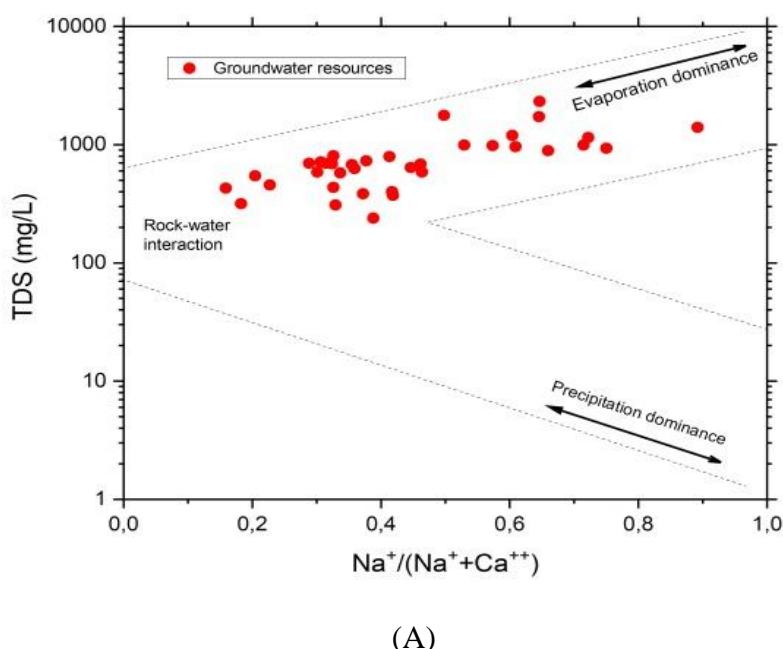


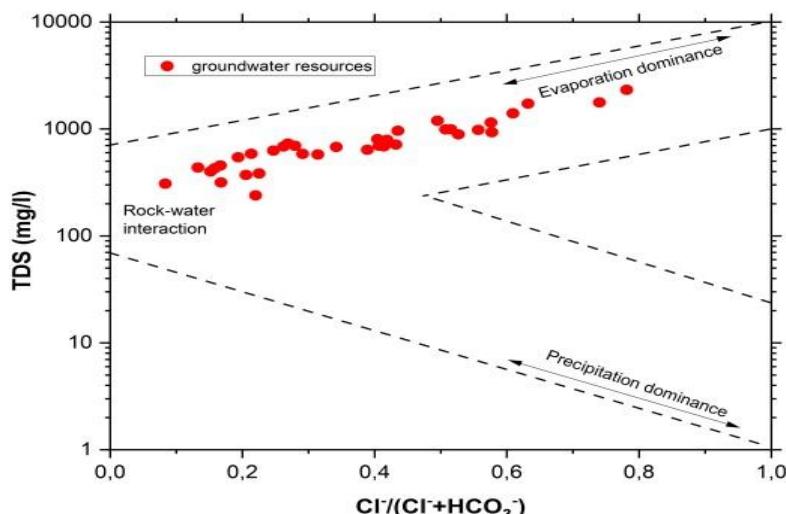
Figure 34 : Diagramme de PIPER

□ Classification des eaux selon le Diagramme de Gibbs:

Le diagramme de Gibbs trace les TDS (résidu sec) par rapport au rapport $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{++})$ et $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$, et fournit les mécanismes qui contrôlent la chimie des eaux telles que: précipitations, altération des roches, évaporation et cristallisation fractionnée.

Le diagramme de Gibbs offre une analyse statistique visant à comprendre les processus qui influent sur les paramètres géochimiques à la base de la minéralisation des eaux souterraines. Les principaux facteurs impliqués dans ce processus sont les précipitations, l'altération des roches et l'évapotranspiration (Teklearegay et al., 2025). Ces diagrammes visent à étudier les mécanismes naturels essentiels qui régulent la chimie de l'eau et à établir la relation entre la composition de l'eau et les caractéristiques lithologiques de l'aquifère dans la région d'étude. Selon la figure (diagramme de Gibbs Fig 36), l'évaporation et l'altération minérale sont les principaux facteurs qui influent sur la composition chimique (Cations (a), Anions (b)) des eaux souterraines étudiées.





(B)

Figure 35: diagramme de Gibbs

La présence d'évaporites dans la plaine alluviale contribue à l'accumulation de la charge saline des eaux. Après l'évaporation des eaux dans les couches proches de la surface du sol (zone non saturée), il se produit une remobilisation de ces sels suite à l'infiltration des eaux efficaces et/ou au retour des eaux d'irrigation. Ce phénomène a été observé dans de nombreuses régions à travers le monde, dont la plaine de Ghriss (Bekkoussa et al., 2013).

- **Classification des eaux selon le diagramme de Schoeler- Berkaloff :**

Le diagramme de Schöeller Berkaloff offre une représentation visuelle des faciès chimiques de plusieurs échantillons d'eau sur un même graphique. Il repose sur une série d'axes verticaux gradués selon des échelles logarithmiques distinctes. Chaque axe est associé à un ion ou à un groupe d'ions spécifique. Les concentrations, exprimées en mg/l, sont reportées le long des axes et reliées entre elles par des droites. Si les concentrations sont identiques, les droites se superposent, tandis que des décalages relatifs entre les droites indiquent des concentrations différentes.

L'examen des figures 1, 2 et 3 (Figure 36) révèle que les eaux souterraines des trois régions étudiées (Frenda, Ain Hidid, Takhemert) présentent deux faciès chimiques distincts.

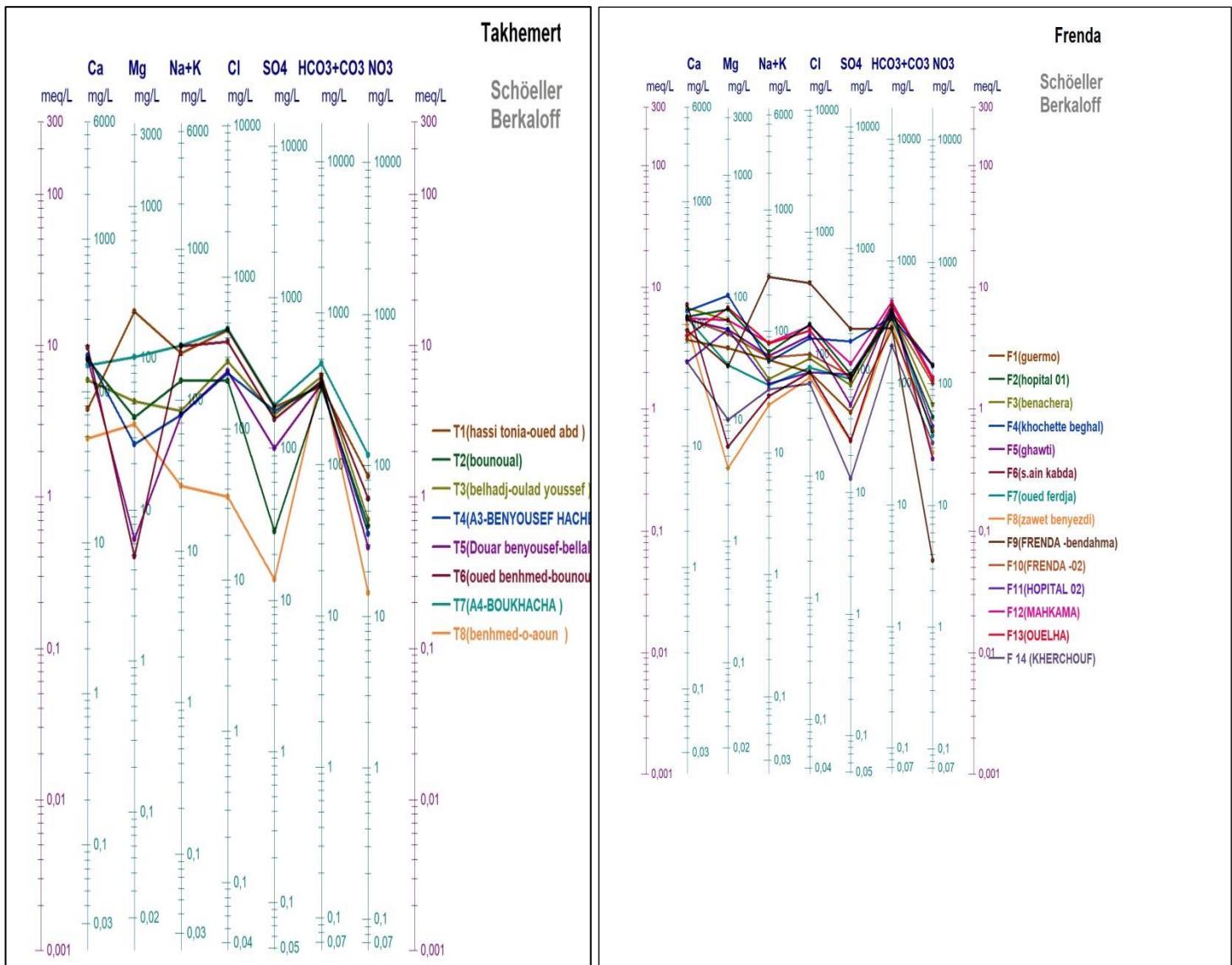
Le premier est le chlorure sulfate calcium et magnésium ($\text{Cl-SO}_4\text{-Ca-Mg}$) et le second est le bicarbonate calcium magnésium ($\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$).

Dans la région de Frenda, le premier faciès est bicarbonatées- magnésien caractérisé par une dominance de bicarbonates et de calcium ($\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$), avec également une présence de faciès chloruré-sodique. Il est

Etude et modélisation Hydrochimique

important de noter que les niveaux de bicarbonates sont considérablement plus élevés que ceux des autres anions, ce qui explique la prédominance du faciès bicarbonaté.

En revanche, dans les régions d'Ain Hedid et de Takhemert, le deuxième faciès est chlorurée-sodique et magnésienne et calcium (Cl-SO₄-Ca-Mg)., Cela confirme également les résultats obtenus à partir du diagramme de Piper. Cette composition est probablement attribuée à la présence de formations évaporitiques sous les grès et dolomies d'El Faidjaa, ainsi que les calcaires dolomitiques du Jurassique supérieur. Ces eaux s'écoulent à travers les formations alluvionnaires du Pliocène, qui sont de texture fine et présentent une forte minéralisation avec des concentrations significatives de Na⁺ et Cl⁻.



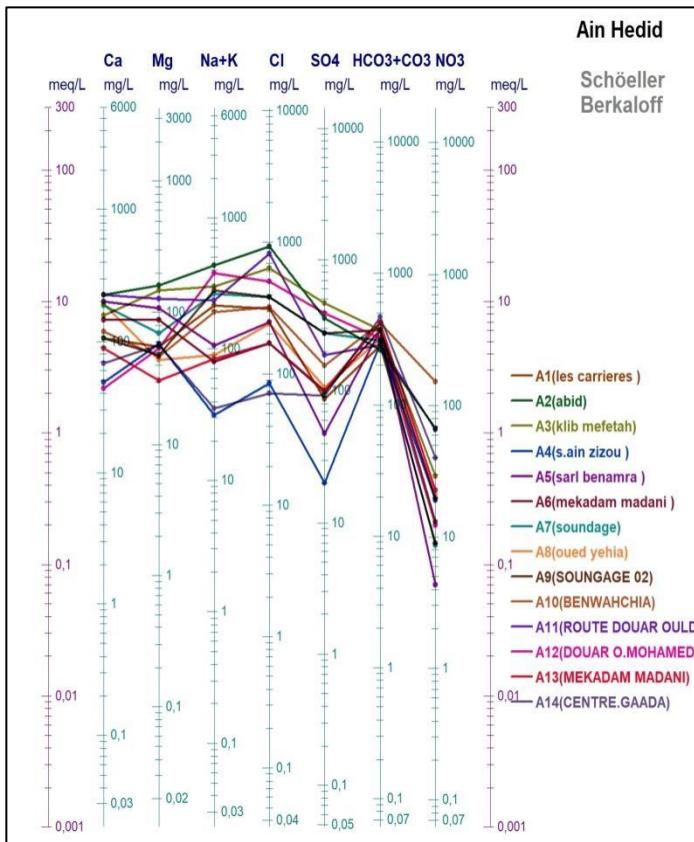


Figure 36 : Classification des eaux selon le diagramme de Schoeler- Berkaloff

- **Classification des eaux selon le Diagramme de Durov:**

Le diagramme de Durov repose sur le pourcentage des ions majeurs en meq/L (Durov, 1950), où les pourcentages des ions positifs et négatifs totalisent toujours 100 %. Les valeurs des cations sont représentées dans le triangle de gauche, tandis que celles des anions sont situées dans le triangle supérieur. Les deux sont ensuite projetés dans le carré du champ principal. Ce diagramme présente l'avantage de visualiser divers processus géochimiques qui pourraient influencer la formation de l'eau. Lloyd et Heathcoat (1985) ont divisé le carré central en neuf secteurs, chacun représentant un processus hydrochimique spécifique.

Le diagramme de Durov peut expliquer trois processus majeurs : le mélange/la dissolution, l'échange ionique et l'échange ionique inverse, notamment lorsque la concentration totale des eaux dépasse 1500 mg/L. Cette méthode a été adoptée pour évaluer les types d'eau en fonction des processus géochimiques qui ont pu influencer la nature des eaux souterraines. Elle permet également de présenter les concentrations totales des cations et des ions, ainsi que du pH et de la TDS.

Etude et modélisation Hydrochimique

Les résultats du diagramme(figure 37). montrent que la plupart des échantillons d'eau présentent une simple dissolution ou un mélange. Résultats corroborent ceux obtenus par le diagramme de Gibbs (figure 35).

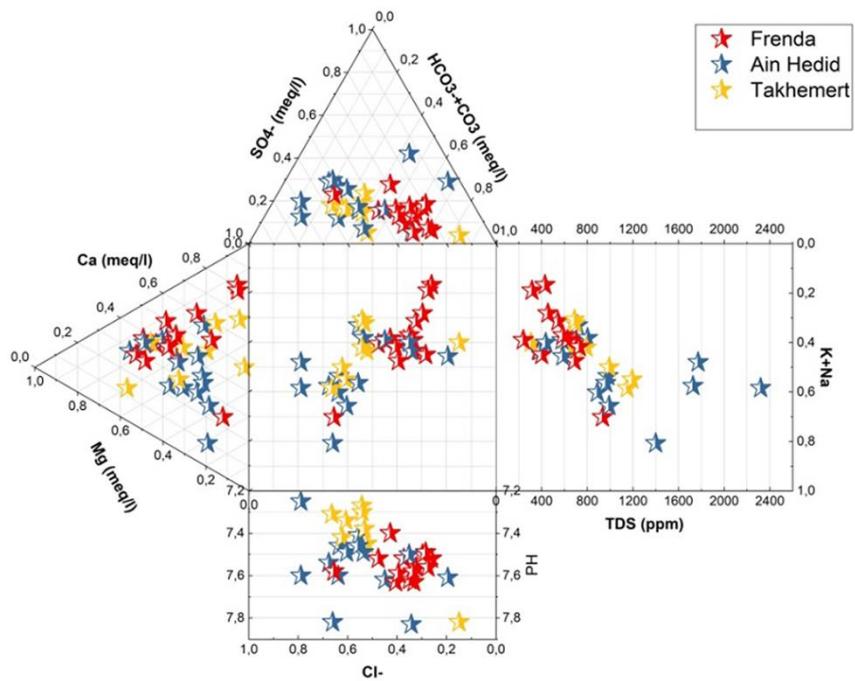


Figure 37. Diagramme de Durov.

7. Diagrammes binaires et processus de minéralisation

• Diagrammes binaires

Les eaux souterraines circulent au sein de la plaine et les nappes alluviale traversant des matériaux très diversifiés tels que des alluvions, des sables, des graviers et des dépôts évaporitiques. Leur cheminement et les différentes couches qu'elles traversent ont une influence sur l'évolution chimique de ces eaux au cours de leur parcours souterrain. Il est crucial de déterminer l'origine de chaque élément afin de comprendre les mécanismes sous-jacents au chimisme de l'eau.

L'analyse des corrélations établies à partir des graphes binaires entre les concentrations des principaux éléments majeurs (SO_4^{2-} , Mg^{2+} , Cl^- , Ca^{2+} , Na^+ , HCO_3^-) a permis d'identifier les divers mécanismes et processus qui contribuent à la minéralisation des eaux échantillonnées. Les ions Ca^{2+} , Mg^{2+} et HCO_3^- sont générés dans les eaux par des processus tels que la dissolution, la précipitation et la dolomitisation des roches carbonatées (Bathurst, 1971).

Les relations entre les concentrations en éléments majeurs dissous sont représentées par les figures 38.

Etude et modélisation Hydrochimique

L'analyse des corrélations entre les principaux cations et anions (fig 38) montre que la minéralisation des eaux souterraines de la région est fortement influencée par la dissolution des évaporites, en particulier le couple $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$ ($R^2 = 0,83$) et $\text{SO}_4^{2-} - \text{Cl}^-$ ($R^2 = 0,79$), traduisant une possible intrusion marine ou l'altération de formations évaporitiques. La corrélation modérée entre Ca^{2+} et Mg^{2+} ($R^2 = 0,56$) indique une contribution de la dissolution des carbonates. La relation entre K^+ et Na^+ ($R^2 = 0,74$) suggère une origine géochimique commune, probablement liée à l'altération de silicates. Ces résultats révèlent que la minéralisation résulte à la fois de processus naturels géologiques et, potentiellement, d'influences anthropiques.

Les diagrammes binaires permettent d'analyser les concentrations en éléments majeurs dissous et de déterminer l'origine de chaque élément, ce qui est crucial pour comprendre le chimisme de l'eau. Les relations entre les concentrations de Ca^{2+} et SO_4^{2-} sont illustrées dans la Figure 39.

Les points situés au-dessus de la droite indiquent un excès important de Ca^{2+} , suggérant que sa source ne provient pas uniquement de la dissolution de la calcite et du gypse. Il confirme ainsi l'hypothèse d'une contribution de Ca^{2+} par échange d'ions avec les argiles du substratum.

Les résultats des diagrammes binaires (Figures B et F) montrent que les concentrations en Ca^{2+} et Mg^{2+} ne sont pas corrélées avec les HCO_3^- , ce qui indique que le calcium et le magnésium évoluent indépendamment des bicarbonates. Cela suggère que la dissolution des roches carbonatées n'est pas la seule source de ces éléments, car ils proviennent également de la dissolution des évaporites.

La Figure C présente la projection de Ca^{2+} en fonction de Mg^{2+} , montrant une répartition stœchiométrique des ions Ca^{2+} et Mg^{2+} . Cela indique la dominance du phénomène de dolomitisation, où les ions Ca^{2+} sont fixés tandis que les ions Mg^{2+} sont libérés.

L'analyse de Mg^{2+} en fonction de SO_4^{2-} (Figure E) révèle un excès de Mg^{2+} par rapport au SO_4^{2-} . Cela suggère une autre source de cet ion, probablement la dissolution de gypse, en plus de la dissolution possible de calcite et dolomites.

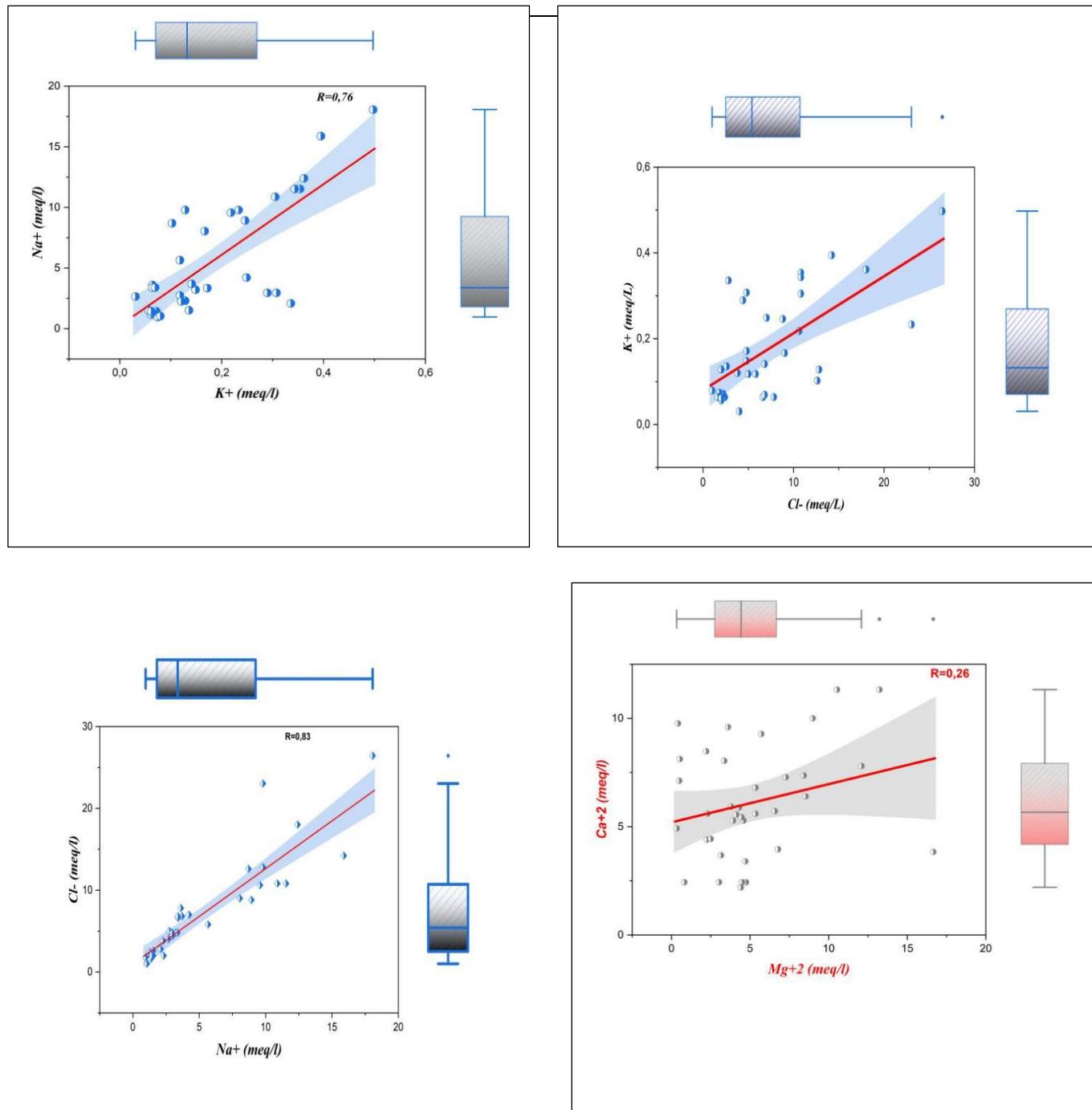
Au cours de ce processus, les roches encaissantes sont les principales sources des matières dissoutes dans l'eau. On appelle échange de base des eaux dures, les eaux souterraines dans lesquelles les alcalino-terreux (Ca^{2+} , Mg^{2+}) ont été échangés par les ions Na^+ (Gupta et al, 2008).

En ce qui concerne la Figure D, il est notable que les eaux souterraines des sources montrent une prédominance de Cl^- par rapport à Na^+ , indiquant une autre origine que la dissolution de l'halite. Il peut également être d'origine anthropique, provenant des rejets domestiques et industriels non traités.

Etude et modélisation Hydrochimique

L'augmentation des teneurs en Cl^- associée aux faibles teneurs en Na^+ est attribuable au phénomène d'échange de base.

D'autres diagrammes ont été utilisés par différents auteurs pour déterminer les processus géochimiques les plus dominants dans les eaux souterraines. Parmi lesquels, l'étude de la relation entre $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ vs $(\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-)$ qui donne une vision plus claire sur les processus d'échange cationiques (Farid et al. 2015).



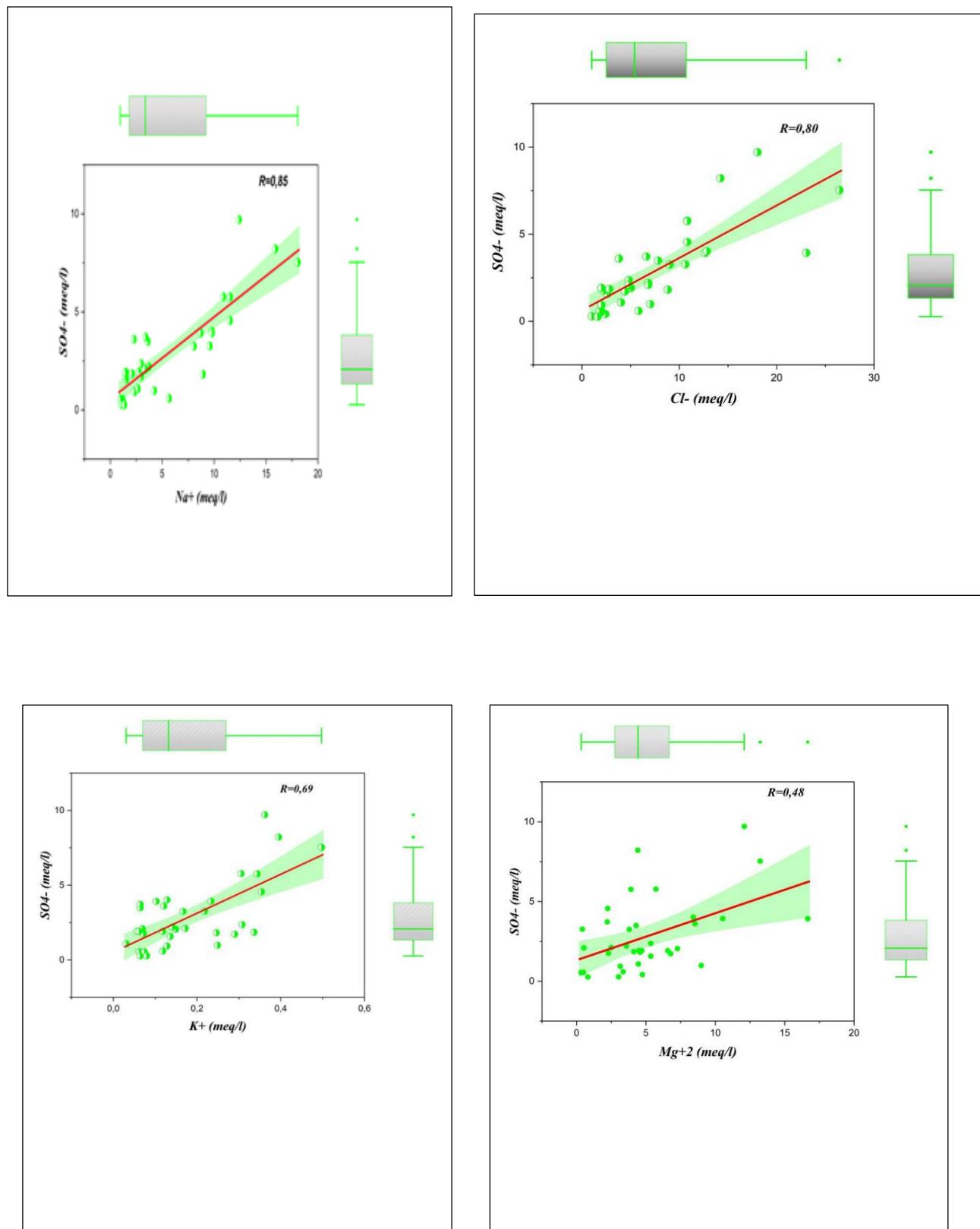


Figure 38 : Diagrammes binaires entre les cations et les anions

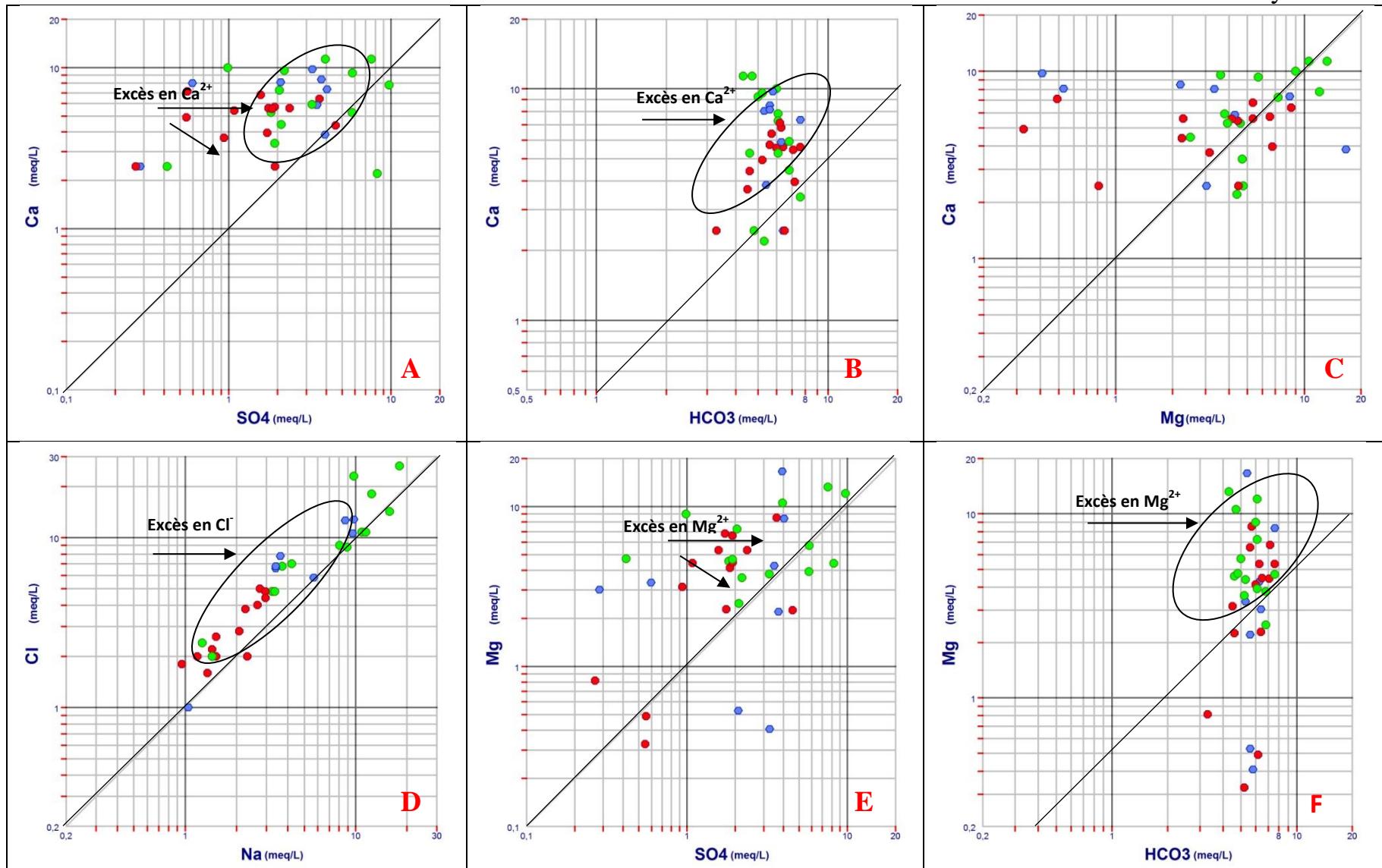


Figure 39 : Relations entre les principaux éléments majeurs. (Frenda : pts rouges, Ain Hedid : pts vertes, Takhemert : pts bleus)

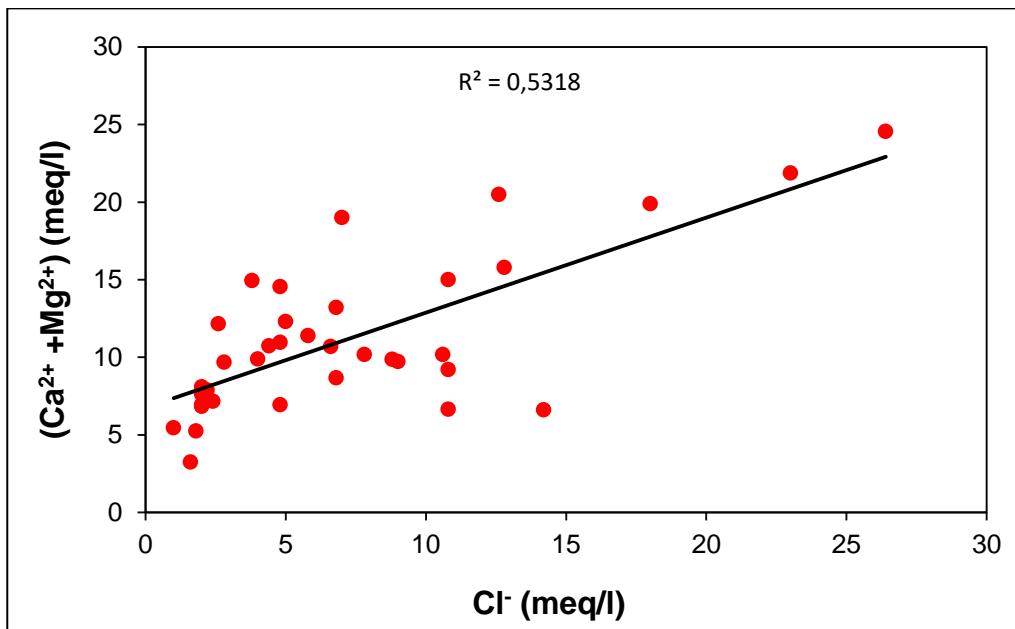


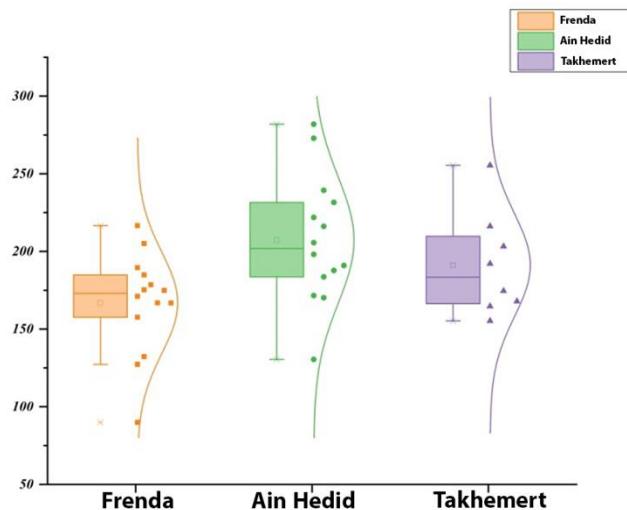
Figure 40. Corrélation entre Cl⁻ et CA²⁺+Mg²⁺

L'Évaluation de la qualité des eaux souterraines en utilisant l'indice de la qualité des eaux dans les plaines alluviales :

La qualité de l'eau est une information essentielle dans la gestion des ressources naturelles (Gan et al., 2022). Elle représente les données des paramètres de l'eau qui sont agrégées pour produire une valeur unique de la qualité de l'eau à partir d'une grande quantité de variables (Fartas et al., 2022). En conjonction avec d'autres références telles que l'étude des faciès hydrogéochimiques et l'évaluation de l'indice de pollution, l'indice de qualité de l'eau demeure l'élément le plus important pour déterminer la qualité de l'eau souterraine à des fins de consommation et d'irrigation (Barbulescu et al., 2020). Ainsi, des normes de qualité de l'eau ont été établies pour évaluer cet indice à l'échelle internationale et régionale.

Tableau 13. Poids des paramètres physico-chimiques (Bekkoussa et al., 2018).

Parametres	Si (Valeur maximale standard de l'OMS)	wi	Wi
	2008		
pH	9	3	0.094
TDS(ppm)	1500	5	0.156
Cl ⁻ (mg/l)	250	4	0.125
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	250	4	0.125
Ca ²⁺ (mg/l)	100	2	0.063
Na ⁺ (mg/l)	150	3	0.094
K ⁺ (mg/l)	12	3	0.094
Mg ²⁺ (mg/l)	150	2	0.063
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	250	1	0.031
NO ₃ ⁻ (mg/l)	50	5	0.156
Total		32	1

**Figure 41. Boite à moustaches de l'indice de la qualité des eaux**

Cinq classes de qualité peuvent être identifiées selon les valeurs de l'indice de qualité de l'eau IQE (Tab 14) (Bekkoussa et al., 2018). Les résultats obtenus dans cette étude sont analysés et interprétés pour fournir une évaluation générale de la qualité globale des eaux examinées, ainsi que de leur variation spatiale et saisonnière.

Etude et modélisation Hydrochimique

Tableau 14: Classification de l'eau selon l'IQE

Classe de IQE	Nombres d'échantillons en(%)		
Excellente qualité (<50)	Non		
Bonne qualité (50 – 100)	1	(2.7)	
Mauvaise qualité (100 – 200)	23	(63.8)	
Très mauvaise qualité (200 – 300)	12	(33.3)	
Eau non potable (>300)	Non		

Selon la boîte à moustaches établie (Figure 41), les valeurs de cet indice pour la région étudiée se situent entre 35,58 (Takhemert) et 166,19 (Ain Hadid). De plus, les résultats montrent que 13,89% des échantillons provenant des plaines alluviales étudiées appartiennent à la catégorie de qualité excellente (Tableau 14). Dans la même catégorie, Frenda et Takhemert sont donc idéales pour une qualité élevée, avec respectivement 60% et 40% (Figure 42). 72,22% des échantillons sont classés dans la catégorie Bonne, tandis que 13,89% sont classés dans la catégorie Médiocre. Heureusement, notre étude a révélé une absence totale des catégories d'eau potable très médiocre et non potable. Selon la cartographie et l'analyse spéciale de l'Indice de Qualité de l'Eau de la région étudiée (Figure 43), il a été démontré que l'ensemble de la région présente une potabilité excellente à bonne, à l'exception de la partie sud-est d'Ain Hedid, qui présente une potabilité médiocre .

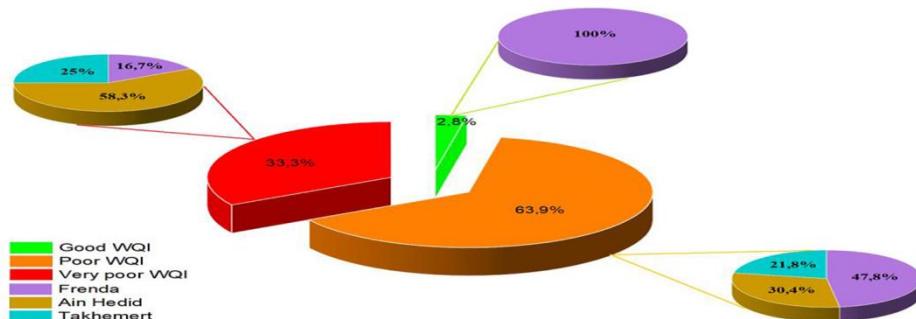


Figure 42. L'indice de qualité de l'eau pour les trois régions étudiées.

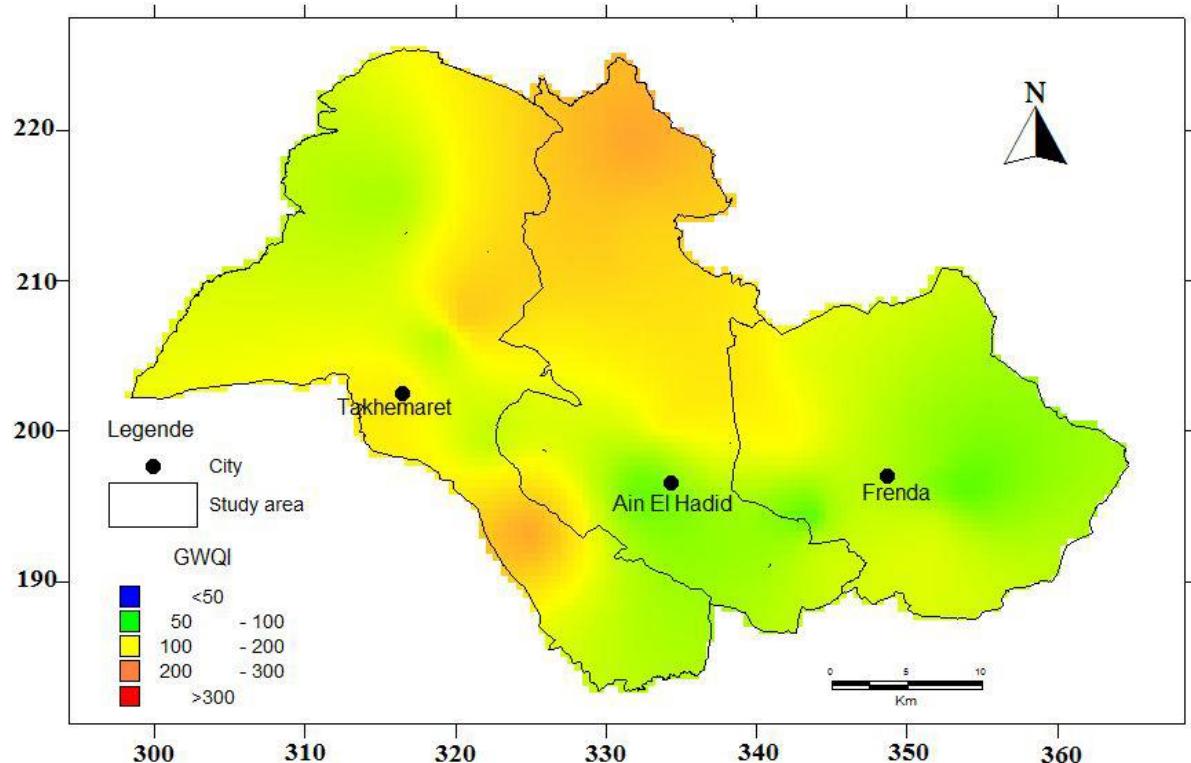


Figure 43. Distribution spatiale de l'indice de qualité de l'eau.

Corrélation entre l'indice de qualité de l'eau et les éléments majeurs

Selon les corrélations étudiées entre l'Indice de Qualité de l'Eau (IQE) et les ions déterminés, l'augmentation des quantités de cations a un impact négatif sur la qualité finale de l'eau. Néanmoins, l'indice évalué diminue avec des valeurs élevées de HCO_3^- . En étudiant la corrélation analytique, l'indice de qualité de l'eau est positivement corrélé avec les ions Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ et Cl^- . Ces résultats sont confirmés par le diagramme de Gibbs, où l'origine de la minéralisation est largement due à l'altération et à la dissolution de la roche source, en particulier les roches carbonatées (dolomie) et les roches évaporitiques (halite et sylvine) [Sharma et al., 2017; Abdelaziz et al., 2020]. Par conséquent, la diminution de l'indice de qualité de l'eau de la zone d'étude dépend fortement de l'augmentation de Na^+ , K^+ et Cl^- (Nguyen et al., 2022; Aljanabi et al., 2021).

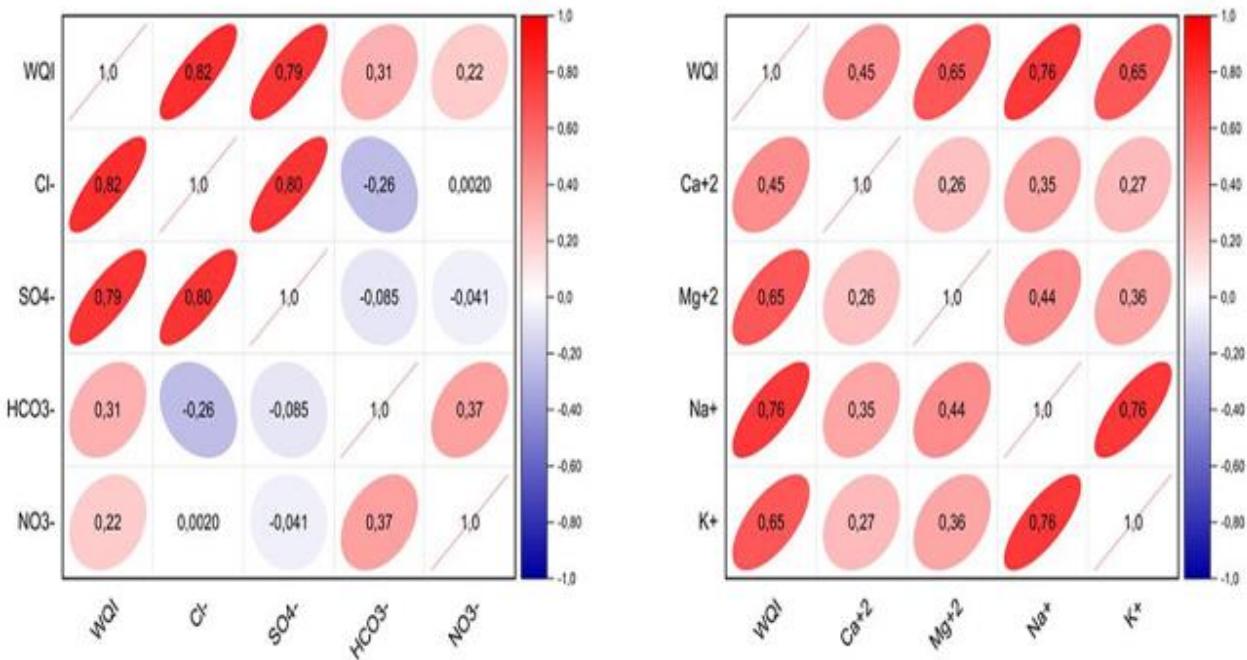


Figure 44. Corrélation entre l'indice de qualité de l'eau et les éléments majeurs

L'Évaluation de la qualité des eaux souterraines en utilisant différent critère dans les plaines alluviales.

➤ *Qualité des eaux d'irrigation*

L'évaluation de la qualité de l'eau destinée à l'irrigation repose sur divers éléments, notamment la composition chimique de l'eau, les types de sol et les pratiques agricoles. Des paramètres tels que la conductivité électrique (CE) pour estimer la concentration totale en sel, le taux d'adsorption de sodium (SAR), le pourcentage de sodium (Na%), le carbonate de sodium résiduel (RSC), l'indice de Kelley, l'indice de perméabilité (PI) et le risque de magnésium (MH) jouent un rôle crucial dans cette évaluation et sont largement utilisés pour déterminer la viabilité de l'eau en vue de l'irrigation.

Ratio d'adsorption de sodium

Le graphique USSL met en relation la conductivité électrique (CE) et le taux d'adsorption de sodium (SAR) pour évaluer la pertinence de l'eau en vue de l'irrigation (Richards, 1954). Sur ce diagramme, les eaux d'irrigation sont classées en fonction de leur niveau de salinité : faible risque (CE = 250 $\mu\text{S cm}^{-1}$), risque modéré (250-750 $\mu\text{S cm}^{-1}$), risque élevé (750-2 250 $\mu\text{S cm}^{-1}$) et risque très élevé (2 250-5 000 $\mu\text{S cm}^{-1}$) (Richards, 1954).

Une forte concentration en sel dans l'eau entraîne la formation d'un sol salin, tandis qu'une concentration élevée en sodium favorise le développement d'un sol alcalin. Le Taux d'Adsorption de

Etude et modélisation Hydrochimique

Sodium (SAR) dans l'eau d'irrigation indique la propension des ions Na à être retenus dans la structure du sol au détriment des ions Ca²⁺ et Mg²⁺, ce qui diminue la capacité du sol à former des agrégats stables. Cela a un impact sur la perméabilité du sol. Le calcul du SAR s'effectue comme suit :

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

Où toutes les valeurs sont exprimées en meq / l.

Sur la base de la valeur SAR, les eaux sont classées en eaux alcalines faibles (SAR 0-10), moyennes (10-18), élevées (18-26) et très élevées (26).

Le graphique USSL (Fig 46) révèle que les échantillons d'eau se répartissent en trois classes. La majorité des échantillons (69,4%) se situent dans la zone à forte salinité et faible alcalinité (C3 - S1), ce qui signifie que cette eau, étant fortement salée, nécessite une gestion spéciale pour contrôler la salinité, en particulier dans les sols à drainage limité.

Certains échantillons (8,3%) appartiennent à la classe (C2 - S1), indiquant une eau de salinité modérée et peu alcaline. Cette catégorie peut être utilisée pour l'irrigation dans la plupart des sols et cultures sans risque de formation de sodium échangeable et de salinité.

Cependant, certains échantillons (8,3% et 5,5% respectivement) tombent dans les catégories (C4 - S1) et (C4 - S2), indiquant une salinité très élevée et une alcalinité modérée. Ces types d'eau ne sont pas appropriés pour l'irrigation.

De plus, quelques échantillons (5,5%) appartiennent à la classe (C3 - S2), indiquant une salinité très élevée et une alcalinité modérée. Enfin, un échantillon (2,7%) appartient à la classe (C4 - S3), ce qui indique une salinité très élevée et une alcalinité extrêmement élevée. Il est important de noter que des niveaux de salinité très élevés peuvent entraîner un stress hydrique pour les cultures, car la concentration élevée de sel dans l'eau d'irrigation oblige les plantes à exercer davantage d'efforts pour extraire l'eau du sol (Zaidi et al., 2015).

➤ Pourcentage de sodium (Na%)

Le pourcentage de sodium (% Na) représente un paramètre fréquemment employé pour évaluer l'aptitude de l'eau à l'irrigation. Il peut être calculé en utilisant la formule suivante :

$$\%Na = \frac{[Na^+] + [K^+]}{[Ca^2+] + [Mg^2+][Na^+] + [K^+]} \times 100$$

Où toutes les concentrations sont en meq / L.

Une concentration ou proportion élevée de sodium(Na) par rapport au calcium(Ca) et au magnésium(Mg) dans les eaux souterraines peut conduire à une diminution de la perméabilité du sol, ce qui a un impact défavorable sur la croissance des plantes (Richards, 1954). Cela peut éventuellement entraîner un sol avec un drainage interne peu efficace.

La teneur en sodium (Na %) dans les eaux souterraines des plaines alluviales des oueds El-Abd et El-Taht varie entre 12% et 71.12%, avec une moyenne de 29.69%. L'analyse selon le diagramme de Wilcox (1955) indique que la majorité des échantillons de cette zone sont répartis en deux catégories : excellente à bonne et bonne à médiocre (fig 47). Trois (03) échantillons se situent dans la zone de la catégorie non appropriée (Mauvaise) (Tableau 15).

Indice de Kelly(KI) :

En 1946, Kelley a introduit un indice (KI) visant à classer l'eau destinée à l'irrigation. Cet indice, défini comme le rapport Na / (Ca + Mg), indique que les eaux présentant un rapport inférieur à -1,0 selon l'indice de Kelley ne sont pas considérées comme appropriées pour l'irrigation. Le rapport de Kelley dans les eaux souterraines de la plaine alluviale des Oueds El-Abd et El-Taht varie entre 0,12 et 2,40, avec une moyenne de 0,49. Tous les échantillons ont un indice de Kelley (KI) inférieur à 1,0, à l'exception de trois (03) échantillons (KI = 1,25, 1,73 et 2,40 respectivement). Ceci indique que l'eau est adaptée à l'irrigation.

Risque de magnésium (Magnesium Hazard : MH)

La concentration en magnésium de l'eau joue un rôle important dans la détermination de la qualité de l'eau destinée à l'irrigation. Le risque de magnésium peut être déterminé en utilisant l'équation suivante :

$$MH = \frac{[Mg2+]}{[Ca2+] + [Mg2+]} \times 100$$

Où toutes les concentrations sont en meq / L.

En règle générale, un risque de magnésium dépassant 50 est considéré comme problématique, rendant les eaux inappropriées pour l'irrigation (Szabolcs et Darab, 1964). Une concentration élevée de

Etude et modélisation Hydrochimique

magnésium dans l'eau peut avoir un impact négatif sur les rendements agricoles à mesure que la salinité des sols augmente (Joshi et al., 2009). Dans la zone étudiée, les valeurs de risque de magnésium varient de 4,01 à 81,05, avec une moyenne de 42,71. Il a été observé que 33,33% des échantillons (soit 12 échantillons) prélevés dans la plaine alluviale des oueds El-Abd et El-Taht présentaient un risque de magnésium supérieur à 50, indiquant qu'ils n'étaient pas adaptés à l'irrigation (tableau 15). Par conséquent, 66,6% des échantillons (soit 24 échantillons) prélevés étaient adaptés à l'irrigation, avec un risque de magnésium inférieur à 50 (Tableau 15).

Tableau 15. Classification de la qualité de l'eau souterraine selon indice 'irrigation'.

Parameters	Range	Water class	Samples	Percentage (%)
Alkalinity hazard (SAR)	<10	Excellent	36	100
	10 – 18	Good	0	0
	18 – 26	Doubtful	0	0
	>26	Unsuitable	0	0
Salinity hazard (EC)	<250	Excellent	0	0
	250 – 750	Good	04	11.11
	750 – 2000	Permissible	26	72.22
	2000 – 3000	Doubtful	03	8.33
	> 3000	Unsuitable	03	8.33
Sodium percentage (Na %)	<20	Excellent	12	33.33
	20 – 40	Good	16	44.44
	40 – 60	Permissible	6	16.66
	60 - 80	Doubtful	2	5.55
	>80	Unsuitable	0	0
Kelly Index (KI)	<1.0	Suitable	33	91.66
	>1.0	Unsuitable	03	8.33
Magnesium Hazard (MH) %	<50	Suitable	24	66.66
	>50	Unsuitable	12	33.33

Du point de vue de l'irrigation, la plupart des puits analysés présentent une qualité acceptable selon les indices évalués tels que le SAR, le %Na et l'Indice de Kelley (Figure 47). Cependant, la présence de niveaux de salinité élevés dans certains puits pourrait restreindre leur utilisation pour l'irrigation.

Etude et modélisation Hydrochimique

L'Indice de Risque de Magnésium (MH) a mis en évidence un risque associé notamment à une concentration élevée en magnésium, concernant plus de 33,3% des puits étudiés.

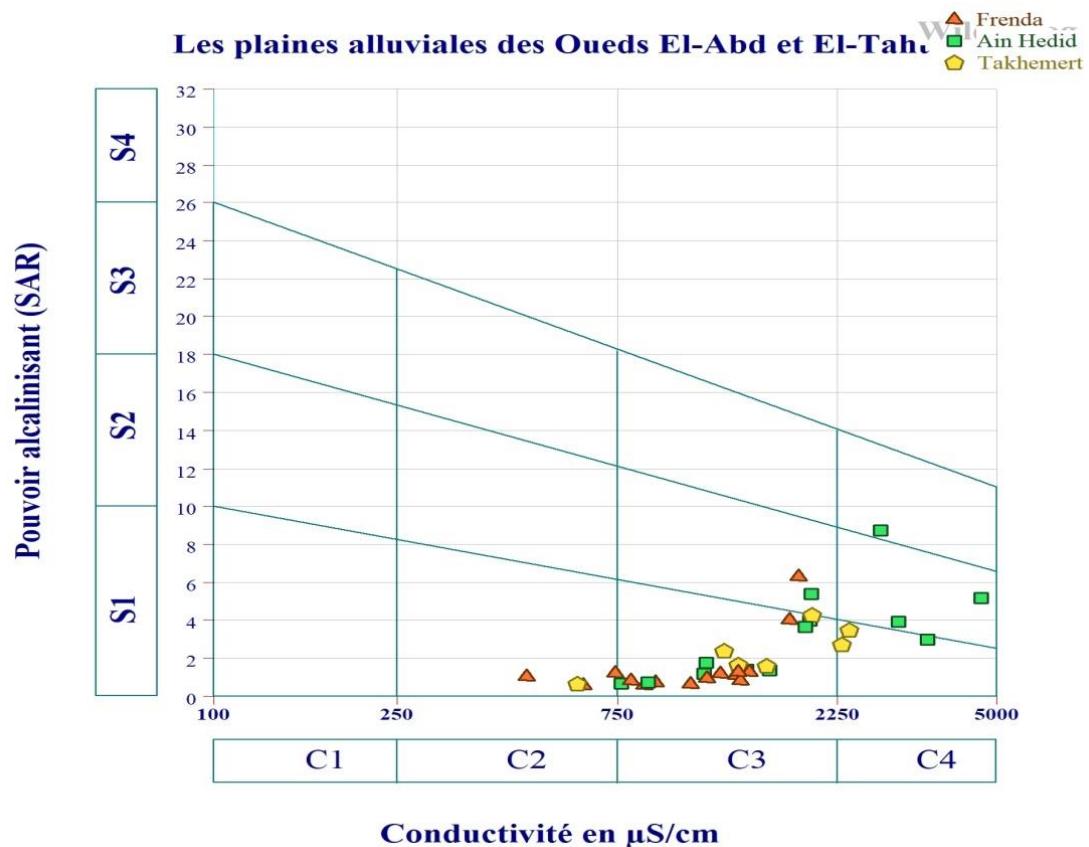


Fig. 45. Classification des eaux selon le diagramme USSL. Les valeurs du SAR (Sodium) sont exprimées en meq/l.

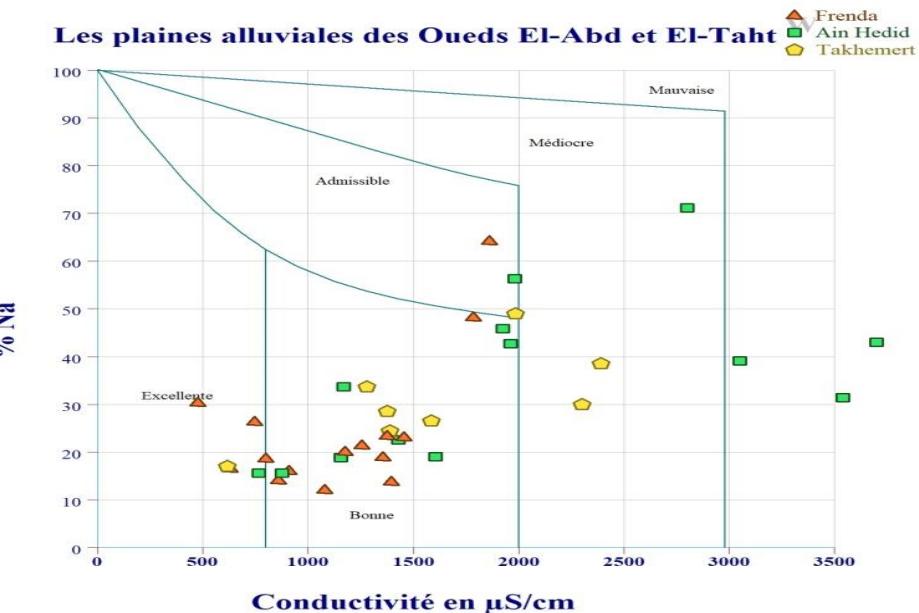
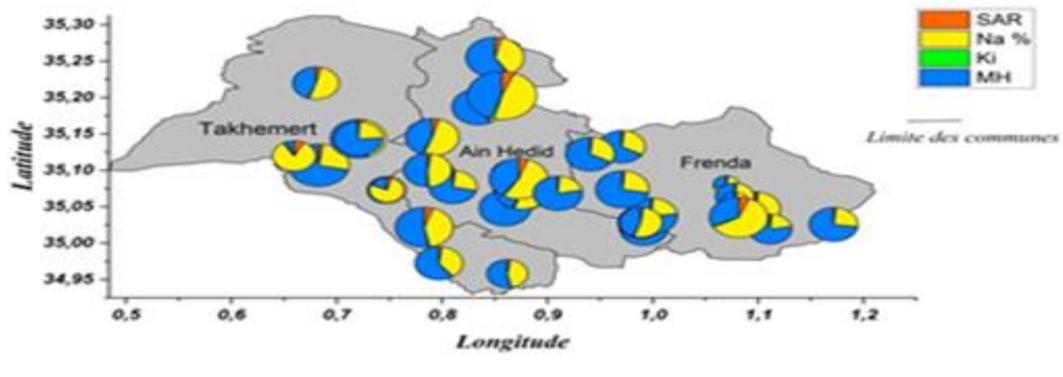


Figure 46: EC ($\mu\text{s}/\text{cm}$) versus %Na.

Les plaines alluviales des oueds El-Abd et El-Taht



Classification de la qualité de l'eau souterraine selon différent critère

Figure 47: Repartition des indices irrigations de la region d'étude

2-Modélisation Hydrochimique:

Indices de saturation des minéraux

L'équilibre ou la saturation d'une solution par rapport à un élément minéral est représenté par l'indice de saturation (IS). Ce dernier a été utilisé pour interpréter l'hydrochimie des eaux souterraines. L'indice de saturation (IS) a été calculé à l'aide du programme PHREEQC (Plummer et al. 1976 ; David et al. 1999 ; David et al. 2013 ; Appelo, 2014), et peut être accessible via la version gratuite du logiciel Diagrammes (Simler, 2009).

Etude et modélisation Hydrochimique

Les indices de saturation (IS) des minéraux sont déterminés en se basant sur les concentrations des ions principaux dans le système. L'indice de saturation d'un minéral est calculé à l'aide de l'équation (31) (Yidana et al., 2008).

Où : PAI est le produit d'activités ioniques.

K_s est le produit de solubilité de la solution à la température de l'échantillon.

Lorsque :

IS < 0, l'eau est sous-saturée par rapport au minéral en question.

IS = 0, signifie l'eau est en équilibre avec le minéral.

IS > 0 signifie une solution sursaturée par rapport à la matière minérale en question.

Plusieurs simulations ont été faites sur des logiciels tels que PHREEQC pour le calcul des indices de saturation des quelques minéraux spécifiques : calcite (CaCO_3), dolomite $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, anhydrite (CaSO_4), gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et halite (NaCl) dans les plaines alluviales des oueds El-Abd et El-Taht.

Les calculs de ces indices révèlent que les minéraux carbonatés (calcite, aragonite et dolomite) affichent des degrés de saturation variés (Figure 49).

Si l'on admet que l'état d'équilibre se fait dans l'intervalle de [-0,5 à +0,5], on peut dire que les calculs d'indice de saturation montrent que la majorité des points d'eau analysés sont dans un état de sursaturation par rapport à la calcite, la dolomite et l'aragonite, à l'exception des points F14, T1, A12, T5, F8 et T6 qui sont à l'état de saturation.

Seul le point F14 présente des eaux saturées en calcite, dolomite et aragonite, ce qui s'explique probablement par son pH relativement faible. En effet, d'après Drever (1988), l'indice de saturation de la calcite varie de +0,05 à +0,75, celui de l'aragonite de -0,1 à +0,61, et celui de la dolomite de -0,1 à +1,63.

Concernant les minéraux évaporitiques comme le gypse, l'anhydrite et l'halite, ils montrent des degrés de saturation plus faibles que les minéraux carbonatés. La totalité des points d'eau analysés sont sous-saturés pour ces minéraux. L'indice de saturation du gypse varie de -2,66 à -1, celui de l'anhydrite de -2,87 à -1,22, et celui de l'halite de -7,65 à -5,8, indiquant une forte sous-saturation.

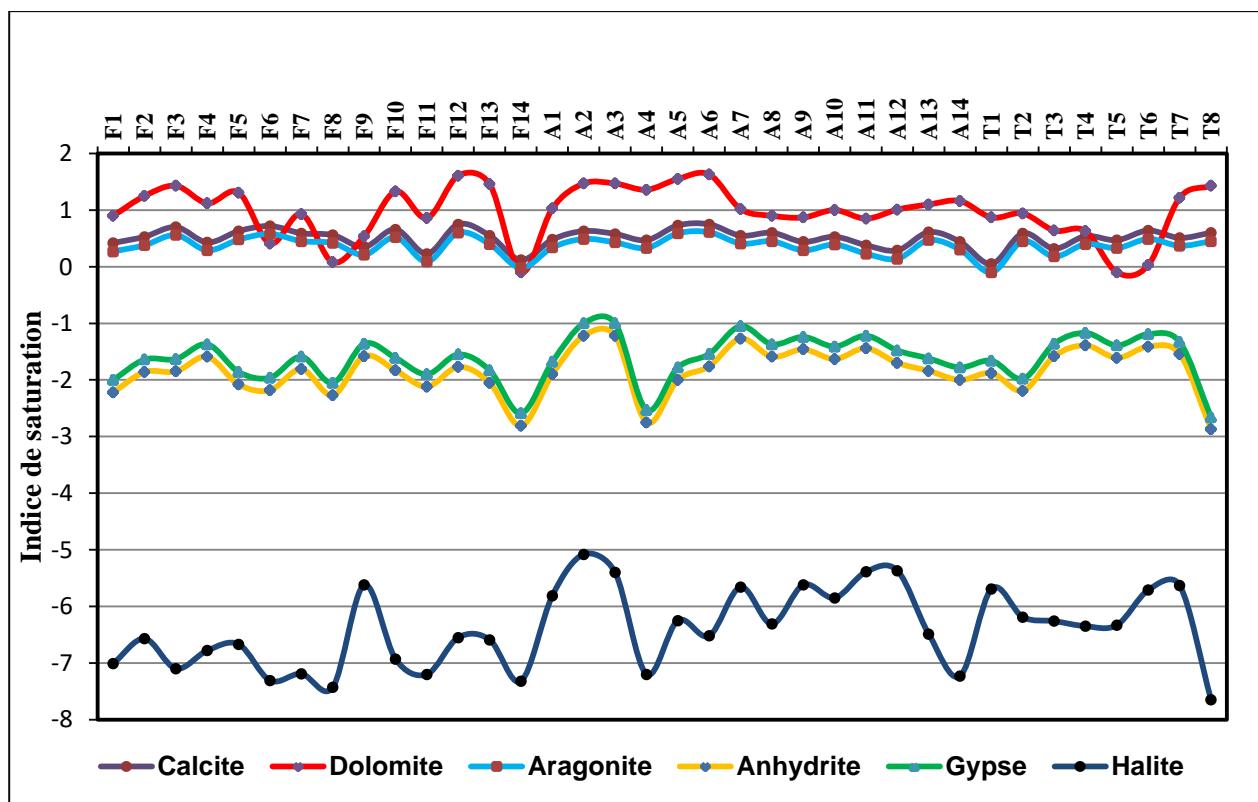
Etude et modélisation Hydrochimique

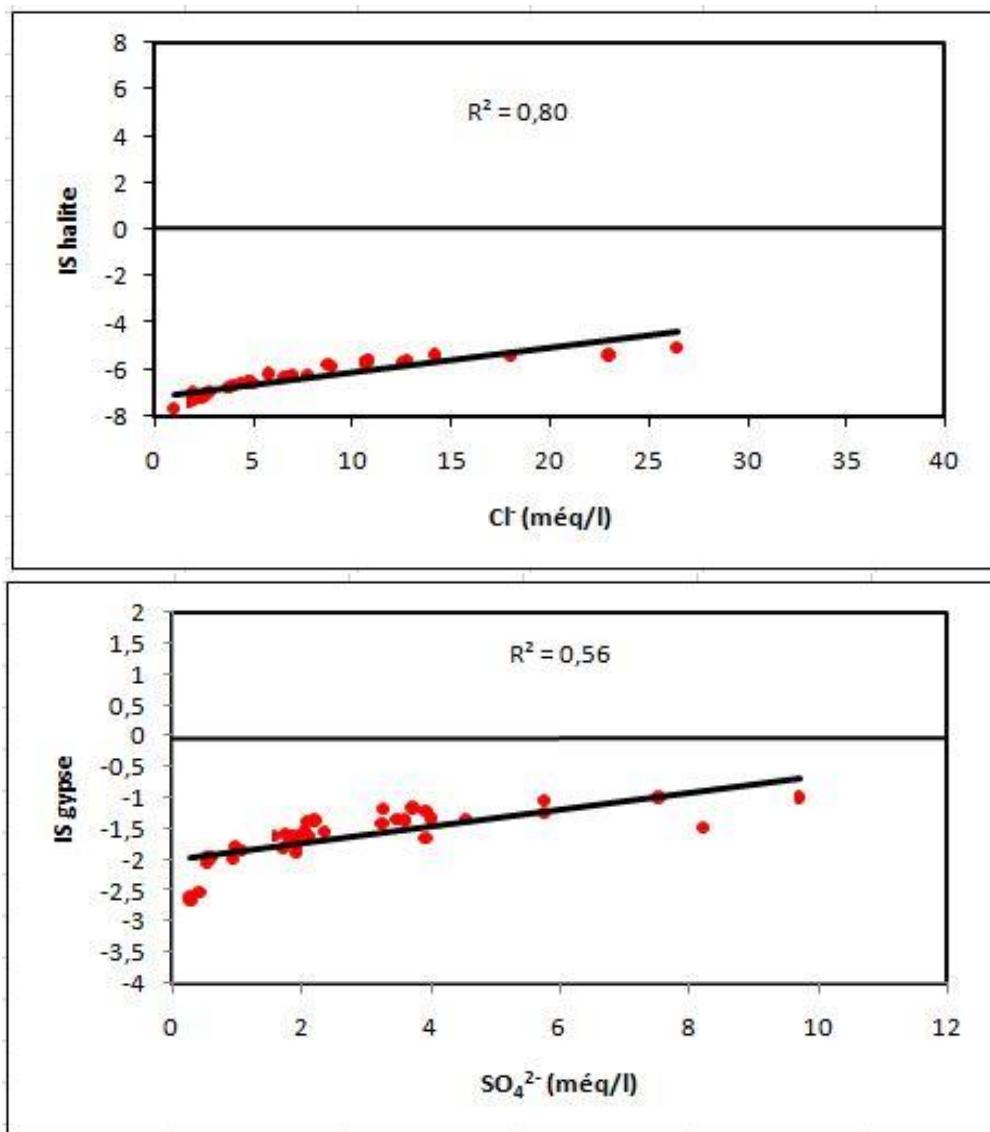
Ces résultats suggèrent que seuls les minéraux carbonatés ont tendance à atteindre un état de sursaturation, tandis que les minéraux évaporitiques restent sous-saturés. Cette sous-saturation continue entraîne une dissolution des minéraux évaporitiques et un enrichissement des eaux. À l'inverse, les minéraux carbonatés sont parfois proches de l'équilibre ou en sursaturation, ce qui favorise leur précipitation sous forme de calcite et dolomite.

L'analyse de figure (48) a montré une corrélation positive entre la calcite, la dolomite et les bicarbonates, ainsi qu'une corrélation positive significative entre la halite, le gypse et les chlorures et sulfates respectivement. Ces résultats indiquent une mise en solution des différents sels minéraux. Le lessivage des minéraux évaporitiques comme le gypse et la halite peut augmenter les concentrations en ions chlorures et sulfates dans l'eau.

On observe également une corrélation positive légèrement significative entre les teneurs en bicarbonates et la présence de calcite ou de dolomite.

En résumé, les résultats mettent en évidence des relations entre la composition chimique de l'eau et la présence de certains minéraux, reflétant les phénomènes de dissolution et précipitation qui affectent sa minéralisation.





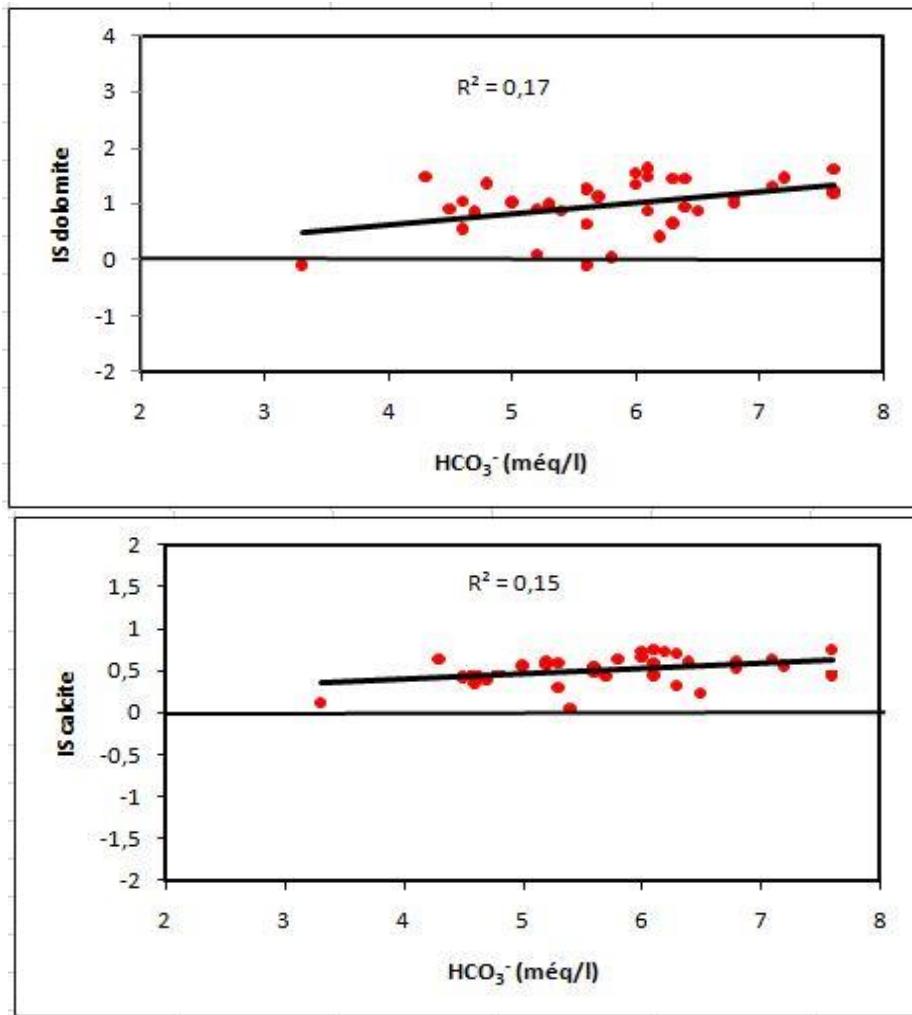


Figure 49: Variation de l'indice de saturation des minéraux des plaines alluviales des Oueds El-Abd et El Taht

8. Les échanges d'ions

L'indice d'échange de base (IEB) permet de mettre en évidence les modifications de la composition chimique de l'eau au cours de son parcours dans le sous-sol.

Dans les systèmes naturels, les anions sont rarement échangés, contrairement aux cations qui s'échangent plus facilement (Merkel et Planer-Friedrich, 2002).

L'IEB exprime les échanges cationiques possibles dans une nappe souterraine (Schoeller, 1977). En effet, la surface de la fraction fine de la matrice d'une nappe peut absorber des cations qui peuvent être substitués à d'autres présents en solution dans l'eau souterraine. Les cations concernés sont : le calcium, le magnésium, le sodium et le potassium. Le sens des échanges cationiques tend à établir un équilibre entre l'eau et la fraction fine. L'indice d'échange de base est donné par la formule suivante :

Etude et modélisation Hydrochimique

Toutes les valeurs sont exprimées en méq/l. Cet indice définit le sens d'échanges ioniques entre l'eau et les terrains encaissants ; si :

- **I E B > 0** → L'encaissant libère le Ca^{2+} , Mg^{2+} et fixe le Sodium et le Potassium ;
 - **I E B = 0** → Il y a un équilibre entre les compositions chimiques de l'eau et l'encaissant ;
 - **I E B < 0** → L'encaissant libère les ions de Na^+ , K^+ et fixe les ions de Ca^{2+} , Mg^{2+} de l'eau.

Dans la zone d'étude, la carte de l'IEB (Figure 50) montre que la plupart des échantillons de la plaine ont un indice positif ($IEB > 0$). Cette dominance des valeurs positives traduit que l'encaissant libère le Ca et le Mg après avoir fixé le Na et le K de l'eau. Aussi, la lecture de la carte montre qu'il y a des échantillons qui présentent un indice à l'état d'équilibre ($IEB = 0$) situés dans la partie nord-ouest de la commune de Takhemrt et quelques points d'eau au niveau de Frenada et Ain Hedid. À l'exception de quelques points d'eau situés dans les communes de Frenda et Ain Hedid, où l'IEB présente des valeurs négatives ($IEB < 0$).

Ce rapport est négatif quand la teneur en sodium et en potassium est élevée, c'est-à-dire que l'eau a été fortement en contact avec des minéraux capables de céder facilement ces cations échangeables (Abderamane, 2012).

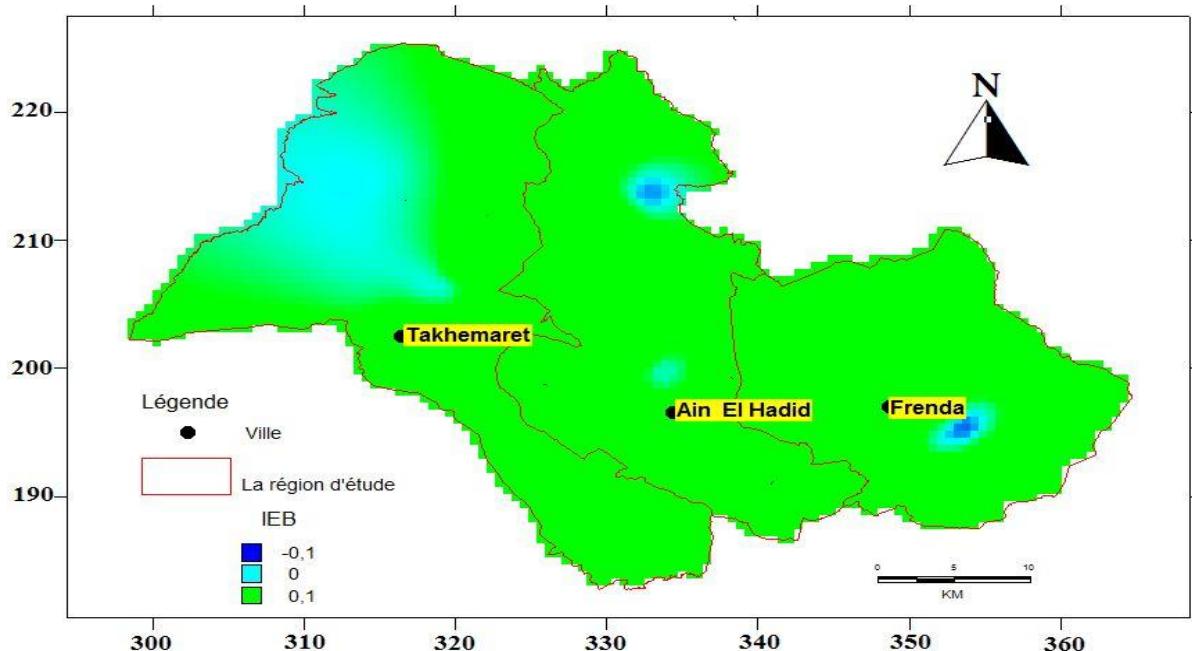


Figure 50: La carte de l'IEB

Relation entre les éléments Ca^{+2} , Mg^{+2} et Cl^-

Ces ions sont issus de deux formations différentes, on a associé l'évolution du rapport de ces ions ($\text{Cl}^-/\text{Ca}^{+2} \text{ Mg}^{+2}$) pour mettre en évidence l'ion dominant à l'origine de cette salinité.

L'interprétation du graphe (Figure 80) montre un enrichissement général des eaux en chlorure. Elle a révélé que la majorité des points d'eau présente un rapport ($\text{Cl}^-/\text{Ca}^{+2} \text{ Mg}^{+2}$) supérieur à 1, indiquant ainsi la dominance des ions Cl^- par rapport à ($\text{Ca}^{+2} \text{ Mg}^{+2}$) ce qui confirme la dominance du faciès chlorure calcique et magnésium.

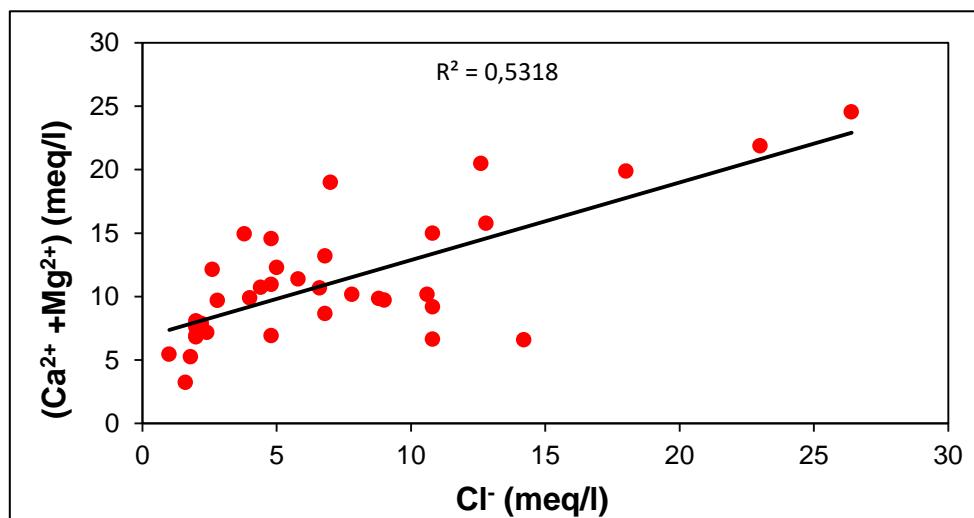


Figure 51 : Rapport entre ($\text{Cl}^-/\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2}$)

Conclusion

Le changement climatique, conjugué à la pression croissante des activités humaines, notamment le rejet des eaux usées et l'usage excessif de pesticides et de produits chimiques, constitue un facteur majeur de dégradation de la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine et à l'irrigation des parcelles agricoles. Dans ce contexte, et face à la rareté croissante de cette ressource vitale, il devient impératif d'engager des actions préliminaires, en commençant par une évaluation rigoureuse de sa qualité, suivie par l'identification des principaux facteurs de dégradation propres à chaque région.

L'étude menée dans la plaine de Tiaret, au nord-ouest de l'Algérie, a permis de dresser un état des lieux détaillé de la qualité physico-chimique des eaux souterraines à travers l'analyse de 36 échantillons prélevés dans trois zones spécifiques. Située en zone semi-aride, cette région se distingue comme l'un des pôles majeurs de l'activité agricole, notamment en ce qui concerne la céréaliculture. L'évaluation basée sur l'indice de qualité de l'eau (IQE) a révélé des disparités importantes dans la qualité des eaux, soulignant une vulnérabilité certaine de la ressource. Seulement 2.7 % des échantillons analysés sont classés comme étant de bonne qualité, tandis que 63.8 % sont considérés comme médiocres et 33.3 % comme de très mauvaise qualité. Ces résultats traduisent un niveau de dégradation préoccupant, en particulier dans certaines zones agricoles à forte activité.

L'étude hydrochimique a mis en évidence trois faciès dominants : bicarbonate-calcique, chlorure-sodique et bicarbonate-magnésien, avec une prédominance des anions HCO_3^- et Cl^- , et des cations Ca^{2+} et Mg^{2+} .

La répartition spatiale des ions a révélé que le calcium est largement présent dans toute la plaine, tandis que le magnésium et le sodium sont davantage concentrés au nord et au sud-ouest d'Ain Hédi, ainsi qu'au centre de Takhemert. Par ailleurs, des concentrations élevées en nitrates ont été détectées dans certaines zones comme le nord-ouest d'Ain Hédi et le centre de Frenda, traduisant une contamination d'origine agricole, probablement due à l'utilisation excessive d'engrais et de pesticides.

L'analyse statistique multivariée a permis d'identifier les facteurs principaux influençant la qualité de l'eau. Le premier facteur est lié à la salinisation, avec des corrélations fortes entre les ions majeurs (Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , K^+), tandis que le second facteur est associé à la température et au pH, suggérant l'influence des conditions climatiques sur les réactions chimiques. Le troisième facteur, quant à lui, met en évidence l'impact des activités agricoles à travers la présence significative des nitrates et des bicarbonates. Les diagrammes de Gibbs et Durov ont confirmé que l'évaporation et l'altération des roches sont les principaux processus géochimiques contrôlant la composition chimique des eaux souterraines dans la région étudiée.

Conclusion

En ce qui concerne l'usage agricole, bien que la majorité des échantillons soient jugés acceptables selon des indices tels que le SAR, le pourcentage de sodium ou l'indice de Kelley, la salinité élevée de certains puits, ainsi que le risque lié à la concentration en magnésium, pourraient nuire à la productivité des sols et à la santé des cultures. Plus de 33 % des puits analysés présentent en effet un risque agronomique lié à un excès de magnésium.

Ces résultats soulignent l'importance cruciale d'une gestion intégrée et durable des ressources en eaux souterraines dans cette région semi-aride fortement dépendante de l'irrigation. Il est impératif de promouvoir des pratiques agricoles durables, de rationaliser l'utilisation des intrants chimiques et de renforcer les politiques de suivi et de protection de la qualité de l'eau. L'adoption de solutions innovantes, telles que la recharge artificielle des nappes, le traitement des eaux usées pour l'irrigation, ou encore le développement de systèmes d'irrigation économes en eau, la réalisation des retenues collinaires, constitue une piste prometteuse pour faire face aux défis croissants liés à la raréfaction de la ressource.

Enfin, cette étude ouvre la voie à de futures recherches, notamment à travers des analyses isotopiques, qui permettront d'affiner la compréhension des mécanismes de recharge et de l'origine des eaux souterraines dans cette région. De telles investigations sont essentielles pour appuyer les décisions politiques et techniques en matière de gestion durable de l'eau, dans le but de préserver cette ressource vitale pour les générations présentes et futures.

La mise en œuvre des recommandations proposées, notamment les investigations isotopiques, permettra d'approfondir la connaissance des mécanismes de fonctionnement de l'aquifère et d'affiner les stratégies de gestion. Ces études sont essentielles pour appuyer les décisions politiques et techniques en matière de gestion durable de l'eau, dans le but de préserver cette ressource vitale pour les générations présentes et futures.

Références bibliographiques

- Abanyie S.K., Apea O.B, Abagale S.A., Amuah E.E.Y. et Sunkari E.D. 2023. Sources and factors influencing groundwater quality and associated health implications: A review. *Emerging Contaminants*, 9(2):100207
- Abdelaziz, S., Gad, M.I., & El Tahan, A. H. M. H. (2020). Groundwater quality index based on PCA: Wadi El-Natrun, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*. 172, 103964. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2020.103964>
- Adimalla, N. (2019). Controlling factors and mechanism of groundwater quality variation in semiarid region of South India: an approach of water quality index (WQI) and health risk assessment (HRA). *Environmental Geochemistry and Health*, 42, 1725–1752. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00374-8>
- Adimalla, N., & Qian, H. (2021). Groundwater chemistry, distribution and potential health risk appraisal of nitrate enriched groundwater: A case study from the semi-urban region of South India. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 207, 111277. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111277>
- Agidi, B. M., Akakuru, O. C., Aigbadon, G. O., Schoeneich, K., Isreal, H., Ofoh., I., Njoku., J., & Esomonu, I. (2022). Water quality index, hydrogeochemical facies and pollution index of groundwater around Middle Benue Trough, Nigeria. *International Journal of Energy and Water Resources*, 8(1), 35-54. <https://doi.org/10.1007/s42108-022-00187-z>
- Aljanabi, Z. Z., Al-Obaidy, A. H. M. J., & Hassan, F. M. (2021). A brief review of water quality indices and their applications. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 779, 012088. [10.1088/1755-1315/779/1/012088](https://doi.org/10.1088/1755-1315/779/1/012088)
- Amadou, S., Seyni, N., & Serigne, F. (2022). Hydrogeochemical characterization of the Samba Dia aquifer (Central West Senegal). *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 38(1), 71-85.
- Amanambu, A.C., Obarein, O.A., Mossa, J., Li, L., Ayeni, S.S., Balogun, O., Oyebamiji, A., Ochege, F.U., 2020. Groundwater system and climate change: present status and future considerations. *J. Hydrol.* 589, 125163. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125163>
- Ameur, M., Hamzaoui-Azaza, F., & Gueddari, M. (2016). Nitrate contamination of Sminja aquifer groundwater in Zaghouan, northeast Tunisia: WQI and GIS assessments. *Desalination and Water Treatment*, 57(50), 23698–23708. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1137495>

Références bibliographiques

- Barakat, A. (2020). Groundwater NO_3 concentration and its potential health effects in Beni Moussa perimeter (Tadla plain, Morocco). *Geoenviron Disasters*, 7, 14. <https://doi.org/10.1186/s40677-020-00149-9>
- Batarseh, M., Imreizeeq, E., Tilev, S., Al Alaween, M., Suleiman, W., Al Remeithi, A. M., Al Tamimi, M. K., & Al Alawneh, M. (2021). Assessment of groundwater quality for irrigation in the arid regions using irrigation water quality index (IWQI) and GIS-Zoning maps: case study from Abu Dhabi Emirate, UAE. *Groundwater for Sustainable Development*, 14, 100611. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100611>
- Bekkoussa, B., Bekkoussa, S., Taupin, J. D., Patris, N., & Azzaz, H. (2017). Mapping of the Groundwater Quality Index of the Ghriss Plain, North-West Algeria. *Water Resources and Climate Change Anthropic and Climatic Impacts on the Variability of Water Resources*, 1-6.
- Bekkoussa, S., Bekkoussa, B., Taupin, J. D., Patris, N., & Meddi, M. (2018). Groundwater hydrochemical characterization and quality assessment in the Ghriss Plain basin, northwest Algeria. *Journal of Water Supply Research and Technology-Aqua*, 67 (5), 458-466. <https://doi.org/10.2166/aqua.2018.013>
- Benadela, L., Bekkoussa, B., & Gaidi, L. (2022). Multivariate analysis and geochemical investigations of groundwater in a semi-arid region, case of superficial aquifer in Ghriss Basin, Northwest Algeria. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 10(3), 233-249. <https://doi.org/10.19637/j.cnki.2305-7068.2022.03.003>
- Bitencourt, E. B., Almeida, K. M., SANTOS, L. M. M., & Júnior, A. P. (2019). Physicochemical and microbiological characterization of the influence of waste on the water quality of the Tocantins River, left bank (MARAB-PA). *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*, 11, 05-26.
- Bolduc, S., Mailhot, A., & Talbot, G. (2024). Estimation of the time of concentration of small watersheds located in Northeastern North America. *Hydrological Sciences Journal*, 69(13), 1765–1776. <https://doi.org/10.1080/02626667.2024.2387155>
- Brown, R. M., McClelland, N. I., Deininger, R. A., & O'Connor, M. F. (1972). A Water Quality Index- Crashing the Psychological Barrier. In: Thomas, W.A. (eds) Indicators of Environmental Quality. *Environmental Science Research*, 1. 173–182. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-2856-8_15
- Brown, R. M., McClelland, N. I., Deininger, R. A., & Tozer, R. G. (1970). A Water Quality Index- Do We Dare? *Water and Sewage Works*, 117, 339-343.

Références bibliographiques

- Calligaris, C., Ghezzi, L., Petrini, R., Lenaz, D., & Zini, L. (2019). Evaporite Dissolution Rate through an on-site Experiment into Piezometric Tubes Applied to the Real Case-Study of Quinis (NE Italy). *Geosciences*, 9(7), 298. <https://doi.org/10.3390/geosciences9070298>
- Chadli, K., & Boufala, M. (2021). Assessment of water quality using Moroccan WQI and multivariate statistics in the Sebou watershed (Morocco). *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 27. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06296-5>
- Chen, C., Hanting, Z., Xinyu, W., Meng, N., Xia, W., Yuzhu, G., Han, W., Ruifeng, T., & Mingcai, H. (2023). Thermodynamic and Kinetic Studies of Dolomite Formation: A Review. *Minerals*, 13 (12), 1479. <https://doi.org/10.3390/min13121479>
- Chen, J., Qian, H., Gao, Y., Wang, H., & Zhang, M. (2020). Insights into hydrological and hydrochemical processes in response to water replenishment for lakes in arid regions. *Journal of Hydrology*. 581, 124386. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124386>
- Cook, B.I., Mankin, J.S., Anchukaitis, K.J., 2018. Climate change and drought: from past to future. *Curr. Clim. Chang. Rep.* 4, 164–179. <https://doi.org/10.1007/s40641-018-0093-2>.
- Cosgrove, S., Jefferson, B., & Jarvis, P. (2019). Pesticide removal from drinking water sources by adsorption: a review. *Environmental Technology Reviews*, 8(1), 1-24. <https://doi.org/10.1080/21622515.2019.1593514>
- Czauner, B., Szijártó, M., Sztanó, O. et al. Re-interpreting renewable and non-renewable water resources in the over-pressured Pannonian Basin. *Sci Rep* 14, 24586 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-76076-8>
- Dao P.U., Heuzard A.G., Le T.X.H., Zhao J., Yin R., Shang C. et Fan C. 2024. The impacts of climate change on groundwater quality: A review. *Science of The Total Environment* . 912, 169241
- Durov, S. A. (1948). Classification of Natural Waters and Graphical Representation of Their Composition. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 59, 87-90.
- El Baba, M., Kayastha, P., Huysmans, M., & De Smedt, F. (2020). Evaluation of the Groundwater Quality Using the Water Quality Index and Geostatistical Analysis in the Dier al-Balah Governorate, Gaza Strip, Palestine. *Water*, 12(1), 262. <https://doi.org/10.3390/w12010262>
- Elmadani, M., Kasmai Kiptulon, E., Klára, S., & Orsolya, M. (2024). Systematic Review of the Impact of Natural Resource Management on Public Health Outcomes: Focus on Water Quality. *Resources*, 13(9), 122. <https://doi.org/10.3390/resources13090122>

Références bibliographiques

- Fanzo, J.; Covic, N.; Dobermann, A.; Henson, S.; Herrero, M.; Pingali, P.; Staal, S. A research vision for food systems in the 2020s: Defying the status quo. *Glob. Food Secur.* **2020**, *26*, 100397.
- Farid, I., Zouari, K., Rigane, A., & Beji, R. (2015). Origin of the Groundwater Salinity and Geochemical Processes in Detrital and Carbonate Aquifers: Case of Chougafiya Basin (Central Tunisia). *Journal of Hydrology*, *530*, 508–532. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.009>
- Fartas, F., Reminib, B., Sekiou, F., & Marouf, N. (2022). The use of PCA and ANN to improve evaluation of the WQIclassic, development of a new index, and prediction of WQI, Coastel Constantinois, northern coast of eastern Algeria. *Water Supply*, *22* (12), 8727–8749. <https://doi.org/10.2166/ws.2022.389>
- Frizzone, J. A., Lima, S. C. R. V., Lacerda, C. F., & Mateos, L. (2021). Socio-Economic Indexes for Water Use in Irrigation in a Representative Basin of the Tropical Semiarid Region. *Water*, *13*(19), 2643. <https://doi.org/10.3390/w13192643>
- Fu, T., Qi, C., Wang, Z., Li, C., Liu, W., Fu, Y., Chen, G., Su, Q., Xu, X., & Yu, H. (2022). Hydrochemical Characteristics and Quality Assessment of Groundwater under the Impact of Seawater Intrusion and Anthropogenic Activity in the Coastal Areas of Zhejiang and Fujian Provinces, China. *Lithosphere*, *18*, 1394857. <https://doi.org/10.2113/2022/1394857>
- Galal Uddin, M. d., Moniruzzaman, M. d., Abdul Quader, M., & Abu Hasan, M. d. (2018). Spatial variability in the distribution of trace metals in groundwater around the Rooppur nuclear power plant in Ishwardi, Bangladesh. *Groundwater for Sustainable Development*, *7*, 220-231. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2018.06.002>
- Galal Uddin, M. d., Nash, S., & Olbert, A. I. (2021). A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality. *Ecological Indicators*, *122*, 107218. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107218>
- Gan, S., Zhang, M., Yu, K., Zhou, Y., & Yan, B. (2022). Groundwater quality assessment using principal component analysis modified water quality index in the Huangbizhuang, Northern China Plain. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, *29*(2), 597–620. <https://doi.org/10.1080/10807039.2022.2154193>
- Gaur, N., Sarkar, A., Dutta, D., Gogoi, B. J., Dubey, R., & Dwivedi, S. K. (2022). Evaluation of water quality index and geochemical characteristics of surfacewater from Tawang India. *Scientific Reports*, *12*(1), 11698. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14760-3>
- Gibbs, R. J. (1970). Mechanisms controlling world water chemistry. *Science*, *170*(3962), 1088–1090.

Références bibliographiques

- Granata F. et Di Nunno F. 2025. Rising threats to groundwater recharge: Adaptive strategies for the Sahel under climate change. *Groundwater for Sustainable Development*.30, 101468
- Grosser, P. F., & Schmalz, B. (2025). Assessing the Impacts of Climate Change on Hydrological Processes in a German Low Mountain Range Basin: Modelling Future Water Availability, Low Flows and Water Temperatures Using SWAT+. *Environments*, 12(5), 151. <https://doi.org/10.3390/environments12050151>
- Guzy A., Piasecki A., Witkowski W.T. 2025. Climate change and shallow aquifers - Unravelling local hydrogeological impacts and groundwater decline-induced subsidence. *Remote Sensing of Environment* 321, 114682
- Hassan, Z. U., Jefferson, A. J., Avellaneda, P. M., & Bhaskar, A. S. (2024). Assessment of hydrological parameter uncertainty versus climate projection spread on urban streamflow and floods. *Journal of Hydrology*, 638, 131546. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131546>
- Hosseininia, M., & Hassanzadeh, R. (2023). Groundwater quality assessment for domestic and agricultural purposes using GIS, hydrochemical facies and water quality indices: case study of Rafsanjan plain, Kerman province, Iran. *Applied Water Science*, 13, 84 <https://doi.org/10.1007/s13201-023-01891-9>
- Jasechko, S., Perrone, D., Befus, K. M., Bayani Cardenas, M., Ferguson, G., Gleeson, T., Luijendijk, E., McDonnell, J. J., Taylor, R. G., Wada, Y., & Kirchner, J. W. (2017). Global aquifers dominated by fossil groundwaters but wells vulnerable to modern contamination. *Nature Geoscience*, 10(6), 425-429. <https://doi.org/10.1038/ngeo2943>
- Ji, D., Ma, J., Xue, J. et al. Identifying groundwater characteristics and controlling factors in Jiaozhou Bay's northern coastal region, China: a combined approach of multivariate statistics, isotope analysis, and field empirical investigations. *Sci Rep* 14, 23856 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75425-x>
- Kelly, W. P. (1963). Use of Saline Irrigation Water. *Soil Science*, 95, 385-391. <https://doi.org/10.1097/00010694-196306000-00003>
- Kenniche, S., Bekkoussa, B., M'nassri, S., Teffahi, M., Taupin, J. d., Patris, N., Zaagane, M., & Majdoub, R. (2022). Hydrochemical characterization, physicochemical and bacteriological quality of groundwater in Sidi Kada Mountains, northwest of Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 15, 1061. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10298-w>
- Khan, M. Y. A., & Elkashouty, M. (2023). Watershed prioritization and hydro-morphometric analysis for the potential development of Tabuk Basin, Saudi Arabia using multivariate statistical analysis and

Références bibliographiques

- coupled RS-GIS approach. Ecological Indicators, 154, 110766.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110766>
- Kom, K. P., Gurugnanam, B., Bairavi, S., & Chidambaram, S. (2023). Sources and geochemistry of high fluoride groundwater in hard rock aquifer of the semi-arid region. A special focus on human health risk assessment. *Total Environment Research Themes*, 5, 100026.
<https://doi.org/10.1016/j.totert.2023.100026>
- Li, Y., & Li, X. (2021). Research on water distribution systems from the past to the future: a bibliometric review. *Environmental Technology Reviews*, 10(1), 161–176.
<https://doi.org/10.1080/21622515.2021.1900404>
- Liun, C. W., Linn, K. H., & Kuon, Y. M. (2003). Application of factor analysis in the assessment of groundwater quality in a black foot disease area in Taiwan. *Science of the Total Environment*, 313(1–3), 77–89. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(02\)00683-6](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00683-6)
- Lloyd, J. W., & Heathcoat, J. A. (1985). *Natural Inorganic Chemistry in Relation to Groundwater*. Clarendon Press, Oxford.
- Mallya, G., Hantush, M., & Govindaraju, R. S. (2018). Composite measures of watershed health from a water quality perspective. *Journal of Environmental Management*, 214, 104–124.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.02.049>
- Mammeri, A., Tiri, A., Belkhiri, L., Salhi, H., Brella, D., Lakouas, E., Tahraoui, H., Amrane, A., & Mouni, L. 2023. Assessment of Surface Water Quality Using Water Quality Index and Discriminant Analysis Method. *Water*, 15(4), 680. <https://doi.org/10.3390/w15040680>
- Maurya, S., Srivastava, P. K., Gupta, M., & Singh, S. (2016). Integrating soil hydraulic parameter and microwave precipitation with morphometric analysis for watershed prioritization. *Water Resources Management*, 30(14), 5385–5405. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1494-4>
- Martínez-Martínez, J., Anna, A., & David, B. (2021). The Role of Calcite Dissolution and Halite Thermal Expansion as Secondary Salt Weathering Mechanisms of Calcite-Bearing Rocks in Marine Environments. *Minerals*, 11(8), 911. <https://doi.org/10.3390/min11080911>
- Masmoudi T., Benakcha M., Abdennour M.A., Bouzekri A., Amrane A., Alcala F.J.2024.Groundwater quality evaluation for drinking and agricultural purposes. A case study in semi-arid region (Zab El-gharbi SE-Algeria).Desalination and Water Treatment.319, 100476

Références bibliographiques

- Mehreen, A., Rafia, M., & Syed Mohammad, H. Z. (2021). Analysis of water quality indices and machine learning techniques for rating water pollution: a case study of Rawal Dam, Pakistan. *Water Science and Technology Water Supply*, 21(4), 3225.3250. <https://doi.org/10.2166/ws.2021.082>
- Miller, V.C., 1953, A Quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee, Tech. Rep. 3 NR 389-402, Columbia University, Department of Geology, ONR, New York, NY, USA, 1953.
- Misaghi, F., Delgosha, F., Razzaghmanesh, M., & Myers, B. (2017). Introducing a water quality index for assessing water for irrigation purposes: A case study of the Ghezel Ozan River. *Science of The Total Environment*, 589, 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.226>
- Moreno-Merino, L., Aguilera, H., González-Jiménez, M., & Díaz-Losada, E. (2021). D-Piper, a modified Piper diagram to represent big sets of hydrochemical analyses. *Environmental Modelling & Software*, 138, 104979. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.104979>
- Moussa L.G., Mohan M., Arachchige P.S.P et al. 2025. Impact of water availability on food security in GCC: Systematic literature review-based policy recommendations for a sustainable future. *Environmental Development*. 54, 101122
- Nageswara Rao, K. Analysis of surface runoff potential in ungauged basin using basin parameters and SCS-CN method. *Appl Water Sci* 10, 47 (2020). <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1129-z>
- Nasir, J., Ashfaq, M., Baig, I. A., Punthakey, J. F., Culas, R., Ali, A., & Hassan, F. u. (2021). Socioeconomic Impact Assessment of Water Resources Conservation and Management to Protect Groundwater in Punjab, Pakistan. *Water*, 13(19), 2672. <https://doi.org/10.3390/w13192672>
- Nayak, A., Matta, G., & Uniyal, D. P. (2022). Hydrochemical characterization of groundwater quality using chemometric analysis and water quality indices in the foothills of Himalayas. *Environment, Development and Sustainability*, 13, 1-32. [10.1007/s10668-022-02661-4](https://doi.org/10.1007/s10668-022-02661-4)
- Nguyen, V. H., Nguyen, V. H., Truong, T. K., Nguyen, H. P., & Nguyen, D. G. C. (2022). A comprehensive procedure to develop water quality index: A case study to the Huong river in Thua Thien Hue province, Central Vietnam. *PLoS ONE*, 17(9), e0274673. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0274673>
- Ouardas, M. (1983). Étude sédimentologique et stratigraphique des grès avec stratification oblique et entrecroisée associés aux phénomènes de chenaux. Thèse doctorat, France. 196P

Références bibliographiques

- Padala R. Shekar, & Mathew, A. (2024). *Morphometric Analysis of Watersheds: A Comprehensive Review of Data Sources, Quality, and Geospatial Techniques*. *Watershed Ecology and the Environment*, 6(6), 13–25. <https://doi.org/10.1016/j.wsee.2023.12.001>
- Park, Y., Park, S.-R., Lee, S.-W., & Lee, J. (2025). Impacts of watershed and meteorological characteristics on stream water quality resilience. *Journal of Hydrology*, 652, 132663. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.132663>
- Rad, S. M., Ray, A. K., & Barghi, S. (2022). Water Pollution and Agriculture Pesticide. *Clean Technologies*, 4(4), 1088-1102. <https://doi.org/10.3390/cleantechol4040066>
- Ragunath, H. M. (1987). *Groundwater*. Wiley Eastern Ltd., New Delhi, 563.
- Rahal, O., Layachi, G., Garrote, L. Sappa, G., Balacco, G., Brahmi, S., & Maria de Filippi, F. (2024). Assessing the Impact of Climate Variability and Human Activity on Groundwater Resources in the Meskiana Plain, Northeast Algeria. *Water Resources*, 51, 1042–1053. <https://doi.org/10.1134/S0097807824603406>
- Rahman, K., Barua, S., & Imran, H. M. (2021). Assessment of water quality and apportionment of pollution sources of an urban lake using multivariate statistical analysis. *Cleaner Engineering and Technology*, 5, 100309. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100309>
- Richards, L. A. (1954). *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils*, Hand Book, 60. U.S. Department of Agriculture, Washington D.C.
- Rodier, J., Legube, B., Merlet, N., & Brunet, R. (2009). Water analysis: natural waters, waste water, sea water. 8th edition. Dunod. Paris, France. 1579p
- Safa, A. (2010). Contribution to the hydrogeological study of the Mina watershed, arid to semi-arid zone (Hautes Plaines Oranaises, north-western Algeria). PhD Thesis. Oran University. Algeria. 207p.
- Santos, E., Carvalho, M., & Martins, S. (2023). Sustainable Water Management: Understanding the Socioeconomic and Cultural Dimensions. *Sustainability*, 15(17), 13074. <https://doi.org/10.3390/su151713074>
- Schumm, S.A., 1956, Evolution of drainage systems and slopes in Badlands at Perth Amboy, New Jersey, *Bulletin of the Geological Society of America*, vol. 67, pp. 597–646
- Sharma, S., Kaur, I., & Nagpal, A. K. (2017). Assessment of arsenic content in soil, rice grains and groundwater and associated health risks in human population from Ropar wetland, India, and its vicinity. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(23), 18836–18848. [10.1007/s11356-017-9401-y](https://doi.org/10.1007/s11356-017-9401-y)

Références bibliographiques

- Shelton, J. L., Engle, M. A., Buccianti, A., & Blondes, M. S. (2018). The isometric log-ratio (ilr)-ion plot: A proposed alternative to the Piper diagram. *Journal of Geochemical Exploration*, 190, 130–141. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.03.003>
- Singh, S., 1992, Quantitative geomorphology of the drainage basin, in Readings on Remote Sensing Applications, T. S. Chouhan and K. N. Joshi, Eds., Scientific Publishers, Jodhpur, India
- Strojexport. 1976. Geophysical study of the alluvial plains of Oueds el Abd and el Taht. 70p.
- Suharyanto, A., Suhartanto, E., & Lesmana, S. B. (2020). Watershed Morphometric Classification Analysis Using Geographic Information System. *GEOMATE Journal*, 19(74), 114–122. Retrieved from <https://geomatejournal.com/geomate/article/view/1856>
- Teklearegay, T., Atlabachew, A., Abebe, A. et al. Comprehensive hydrogeochemical and statistical assessment of groundwater quality for drinking and irrigation in the Demie River catchment, Southern Ethiopia. *Discov Appl Sci* 7, 404 (2025). <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06967-6>
- Vasanthavigar, M., Srinivasamoorthy, K., Vijayaragavan, K., Rajiv Gantri, R., Chidambaram, S., Anandhan, P., Manivannan, R., & Vasudevan, S. (2010). Application of water quality index for groundwater quality assessment: Thirumanimuttar sub-basin, Tamilnadu, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 171, 595-609. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-1302-1>
- Wątor, K., & Zdechlik, R. (2021). Application of water quality indices to the assessment of the effect of geothermal water discharge on river water quality- a case study from the Podhale region (Southern Poland). *Ecological Indicators*, 121, 107098. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107098>
- WHO. (2008). Guidelines for drinking-water quality, World Health Organization, Geneva, Switzerland, 3rd edition,
- Wilcox, L. (1955). Classification and uses of irrigation waters. USDA Circular No. 969, Washington, DC.
- Yahiaoui, S., Meddi, M., Razack, M., Boufekane, A., & Bekkoussa, B. S. (2023). Hydrogeochemical and isotopic assessment for characterizing groundwater quality in the Mitidja plain (northern Algeria). *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 80029–80054. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27952-9>
- Yang D., Yang Y., et Xia J. (2021). Hydrological cycle and water resources in a changing world: A review . *Geography and Sustainability*, 2(2), 115-122. doi:10.1016/j.geosus.2021.05.003
- Zamiche. S., Hamaidi-Chergui, F., & Demiai, A. (2018). Pollution of the quaternary aquifer of Mitidja (Algeria) by nitrates: Origins and impacts on the quality of water for human consumption. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 10(1), 113. [10.4314/jfas.v10i1.8](https://doi.org/10.4314/jfas.v10i1.8)

Références bibliographiques

- Zemour, Y., Mebrouk, N., Mayer, A., Mekebret, I., & Sherif, M. I. (2023). Hydrochemical and geological controls on dissolved radium and radon in northwestern Algeria hydrothermal groundwaters. *Chemosphere*, 313, 137573. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137573>
- Zhao, M., A, G, Liu, Y., Konings, A.G., 2022. Evapotranspiration frequently increases during droughts. *Nat. Clim. Chang.* 12, 1024–1030. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01505-3>.

Groundwater quality assessment using the Water Quality Index coupled with multivariate statistical analysis in the alluvial plains of El- Abd and El-That, Tiaret region, Northwestern Algeria

Valutazione della qualità delle acque sotterranee utilizzando l'Indice di Qualità dell'Acqua combinato con l'analisi statistica multivariata nelle pianure alluvionali di El-Abd e El-That, regione di Tiaret, Algeria nordoccidentale

ARDJANE Tedjeddine Adda^{a,b}  , MEDDAH Boumediene^a, BEKKOUSSA Belkacem Samir^c, ZEMOUR Kamel^b, MAIRIF Mohamed^b

^a Mustapha Stambouli University, Bioconversion Laboratory, Microbiology Engineering and Health Safety, Mascara, Algeria, email: meddah19@yahoo.fr

^b Tissem silt University, Institute of nature and life sciences, Algeria - email: kamel.zemour@univ-tissemilt.dz; Mairif.Mohamed@univ-tissemilt.dz

^c Mustapha Stambouli University, Laboratory of Sciences and Technicals water, Mascara, Algeria - email: b.bekkoussa@univ-mascara.dz

ARTICLE INFO

Ricevuto/Received: 22 January 2025

Accettato/Accepted: 25 May 2025

Pubblicato online/Published online:

30 June 2025

Handling Editor:

Chiara Sbarbati

Citation:

Ardjane, T.A., Meddah, B., Bekkoussa, B.S., Zemour, K., Mairif, M. (2025). Groundwater quality assessment using the Water Quality Index coupled with multivariate statistical analysis in the alluvial plains of El- Abd and El-That, Tiaret region, Northwestern Algeria. *Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater*, 14(2), 73 - 88
<https://doi.org/10.7343/as-2025-852>

Correspondence to:

Ardjane Tedj Eddine Adda 
tedjeddine.ardjane@univ-tissemilt.dz

Keywords:

groundwater, water quality index, major ions, alluvial plains, hydrochemical-physical parameters.

Parole chiave:

acque sotterranee, indice di qualità dell'acqua, ioni principali, pianure alluvionali, parametri idrochimico-fisico.

Copyright: © 2025 by the authors. License Association Acque Sotteranee. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Abstract

Groundwater is considered as the living artery of each region worldwide. It is at the origin of such economic and agronomic development and help therefore to keep the local population in place especially in disadvantaged areas. This study assesses water quality index in the alluvial plains in northwestern region of Algeria. This index provides a value that expresses the overall water quality based on various parameters. Wherefore, field physical measurements coupled with laboratory hydrochemical analysis were used in this integrated study from 36 samples of three regions (Frenda, Ain Hidid and Takhemert). The obtained dominance of anions and cations in particular for HCO_3^- , Cl^- and Ca^{2+} , Mg^{2+} highlighted that the chemical facies of the study area shown three facies. The first is bicarbonate calcium and the second is chloride sodium and the third one is bicarbonate magnesium. The high correlation of TDS (Total Dissolved Solids) with all ions notably Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , Na^+ except HCO_3^- and NO_3^- demonstrate that the mineralization, according to the literature, which is due to the alteration and dissolution of the source rock, in particular the carbonate rocks and the evaporitic rocks is the main factor of this correlation. For water quality index, the results showed that 2.77 % of the samples belong to the good quality category, while 63.88% and 33.33 % for poor and very poor quality respectively. Fortunately, the results of this index demonstrated the complete absence of unsuitable water quality. Nevertheless, given the vital importance of water and for the sustainable development of the region, the need to implement a continuous control of this source remains an urgent practice for the benefit of future generations.

Riassunto

L'acqua sotterranea è considerata l'arteria vitale di ogni regione del mondo. Questa è all'origine dello sviluppo economico e agronomico e contribuisce quindi a trattenere la popolazione locale sul posto, soprattutto nelle aree svantaggiate. Questo studio valuta l'indice di qualità dell'acqua nelle pianure alluvionali della regione nord-occidentale dell'Algeria. Questo indice fornisce un valore che esprime la qualità complessiva dell'acqua sulla base di diversi parametri. Pertanto, in questo studio integrato sono state utilizzate misure fisiche sul campo abbinate ad analisi idrochimiche di laboratorio su 36 campioni di tre regioni (Frenda, Ain Hidid e Takhemert). La dominanza ottenuta di anioni e cationi, in particolare per HCO_3^- , Cl^- e Ca^{2+} , Mg^{2+} , ha evidenziato che la speciazione chimica dell'area di studio presenta tre facies. La prima bicarbonato-calcica, la seconda cloruro-sodica e la terza e bicarbonato-magnesiaca. L'elevata correlazione del TDS (Totale Solidi Disciolti) con tutti gli ioni, in particolare Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , Na^+ eccetto HCO_3^- e NO_3^- , dimostra che la mineralizzazione, anche in accordo con la letteratura, dovuta all'alterazione e alla dissoluzione della roccia madre, in particolare delle rocce carbonatiche e delle rocce evaporitiche, è il fattore determinante di questa correlazione. Per quanto riguarda l'indice di qualità dell'acqua, i risultati hanno mostrato che il 2.77% dei campioni appartiene alla categoria di buona qualità, mentre il 63.88% e il 33.33% appartengono rispettivamente alle categorie di qualità scarsa e molto scarsa. Fortunatamente, i risultati di questo indice hanno dimostrato la totale assenza di acque di qualità inutilizzabile. Tuttavia, data l'importanza vitale dell'acqua e per lo sviluppo sostenibile della regione, la necessità di implementare un controllo continuo di questa fonte rimane una questione urgente anche a beneficio delle generazioni future.

Introduction

Groundwater is the main source that provides drinking water around the world (Jasechko et al., 2017). Also, it has an important resource for irrigation and industrial uses as well as hydropower generation and livestock production (El Baba et al., 2020). Unreliable rainfall frequently and quality water scarcity are serious concerns in many countries, especially in arid and semi-arid regions (Batarseh et al., 2021).

Studies on hydrochemical conditions aim to investigate and expand the knowledge on the hydrochemical pressures and impacts of natural processes and various human activities (Wątor & Zdechlik, 2021). The analysis of hydrochemical properties is intimately related to biological, physical, and chemical data for water quality (Mehreen et al., 2021). There are many natural factors that affect this quality, including hydrological, atmospheric, climatic, topographic and lithological factors (Galal Uddin et al., 2018). Recently, developing countries have serious problems in protecting water quality when attempting to improve water supply and sanitation (Galal Uddin et al., 2021).

Assessing water quality needs an analysis of large number of samples from many areas. The Water Quality Index (WQI) model is one of the tools developed to evaluate this characteristic (Galal Uddin et al., 2021, Misaghi et al., 2017). Many factors are responsible for the deterioration of water quality (Chadli & Boufala, 2021). This alteration can be detrimental to human health (Mehreen et al., 2021). Ameur et al. (2016) pointed up that in Tunisia the water quality is altered due to the nitrate pollution that originates from the excessive use of nitrate fertilizers. Same observations have been recorded in Morocco with a high value of 80.60 mg/L (Barakat, 2020). Therefore, to ensure the high water quality, it is necessary to evaluate it with the appropriate techniques (Li & Li, 2021, Cosgrove et al., 2019).

In Algeria, studies on the quality of groundwater, particularly in the Northwestern zone, have held great importance through numerous studies (Zemour et al., 2023,

Kenniche et al., 2022). Furthermore, this region is characterized by water scarcity and deteriorating water quality primarily due to climate change, particularly periods of intense drought, and secondarily due to human activities (Rahal et al., 2024). This study evaluates the current state of groundwater in the alluvial plains of El-Abd and El-Taht wadis in Tiaret. Given that people in these regions widely use groundwater resources for their own supply and agricultural needs, this study aims to provide a set of the quality of this resource.

The simple and traditional methods used in hydrochemical researches are essentially based only on a quantitative analysis of the physical-chemical parameters of groundwater. To better understand the origin and evolution model of groundwater, our study adopted different methods of analysis including the water quality index (WQI) assessment combined with Piper and Gibbs diagrams. In addition, multivariate statistical methods (PCA and HCA) were applied. Finally, the spatial distribution of the ions is used in this study.

Materials and Methods

This study is carried out in the alluvial plains of El-Abd and El-Taht valley (Fig. 1) which are located in three regions of Tiaret province in Northwestern Algeria (Freida, Ain Hedid and Takhemert). This study has swept an area of 44,630 km² between latitude 35°40' and 34°40' N and between longitudes 0°20' and 1°10' E. The alluvial plains are part of the sub-watershed of El-Abd and El-Taht valley, which belongs to the watershed of Mina valley. The latter belongs to the great basin of the Chellif valley (Fig. 3).

Geology and hydrogeological of the studied area

The geological context of the wadis El-Abd and El-Taht consists of Upper Jurassic formations (Figure 2-1). These geological formations occupy the entire of El-Taht's watershed and half of the El-Abd's watershed (Safa, 2010). Also the Middle Jurassic and Callovo-Oxfordian formations largely predominate the other formations (Strojexport, 1976).

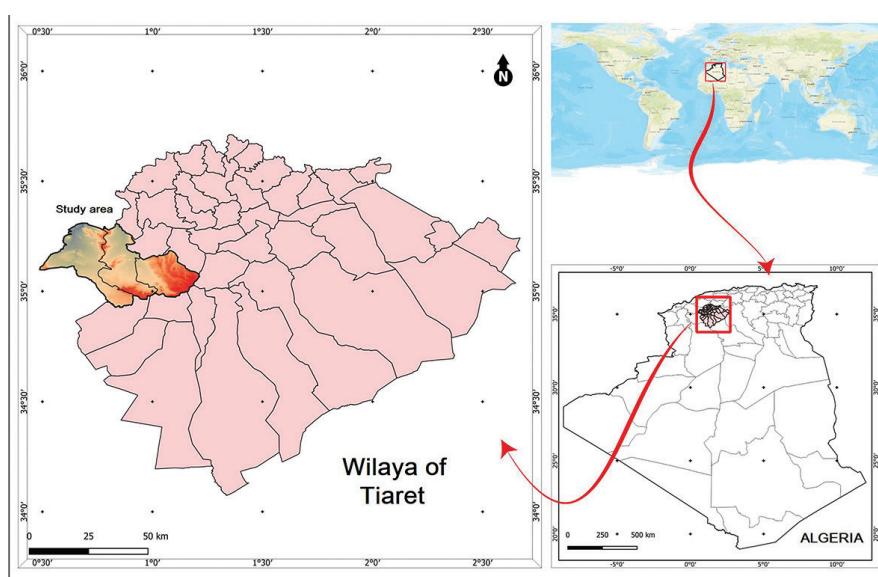


Fig. 1 - Geographic localization of the studied area.
Fig. 1 - Localizzazione geografica dell'area studiata.

1

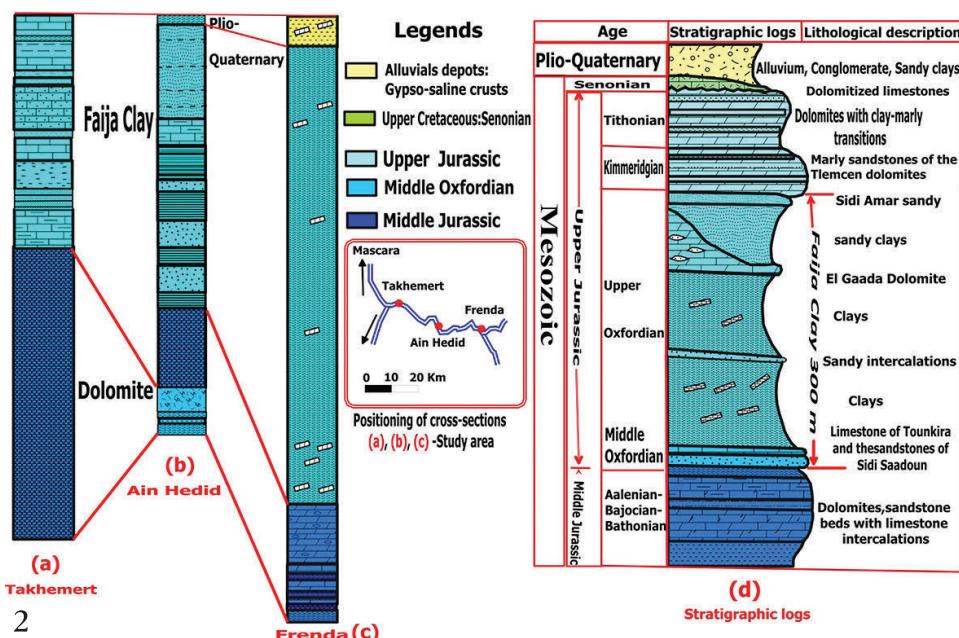
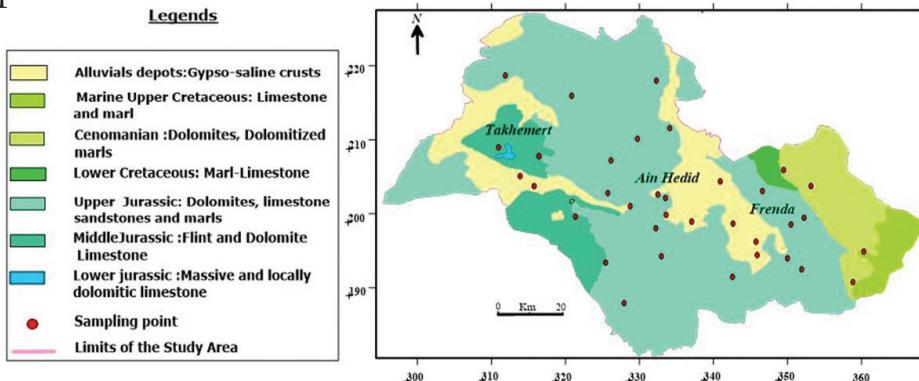


Fig. 2 - Geological map (1) and stratigraphic logs (2) of the study area.

Fig. 2 - Carta geologica (1) e colonne stratigrafiche (2) dell'area di studio.

To better understand the geology of the studied area, the stratigraphic logs located in Frenda, Ain Hedid, and Takhemert (Figs. 2a, 2b, 2c) show the vertical succession of the geological formations, particularly the variation in thickness of the El Gaada dolomites toward the south and southwest of the region. Additionally, Figure 2d highlights the thinning of the Upper Jurassic carbonate formations towards the northwest (Safa, 2010).

According to Figure 2d, two distinct hydrogeological environments are closely associated with the geological framework of the El-Taht watershed, the first one is in the downstream area, detrital formations consisting of clayey-loamy sands, pudding stones, and sandstone clays dominate, while the second one is in the upstream zone, carbonate formations prevail. In contrast, the El-Abd sub-watershed exhibits more significant surface runoff, influenced by the nature of its terrain and lithological structure.

The watersheds of the wadis El -That and wadis El-Abd have a complex hydrographic network, especially pronounced in their upstream regions, where they are fed by numerous karstic sources. In downstream, the density of the

hydrographic network decreases due to the gentle slopes of the clay formations (Fig. 3).

According to Safa (2010), the El-Abd and El-Taht valleys have formed wide plains which are subject to erosion.

The alluvial plains are part of a vast hydrogeological system which is composed of three superimposed reservoirs. Firstly, the Plio-Quaternary formations (Figure 2,d), consist of clayey-loamy sands and massive limestone from the Senonian age, forming the base of a superficial aquifer. The second reservoir is made up of formations from the Portlandian and Kimméridgien periods, consisting of dolomitic formations with intercalations of sandstone and clay, which rest on an Oxfordian clayey substrate, representing a perched aquifer. The third reservoir is located in the fractured bedrock and constitutes the main deep reservoir of the region. It is characterized by the presence of dolomites, limestones, and sandstones from the Aaléno-Bajo-Bathonian age. At the top of this reservoir, there is a layer from the Callovo-Oxfordian age which is characterized by a thin and impermeable clay deposit with intercalations of sandstone and dolomite layers (Safa, 2010).

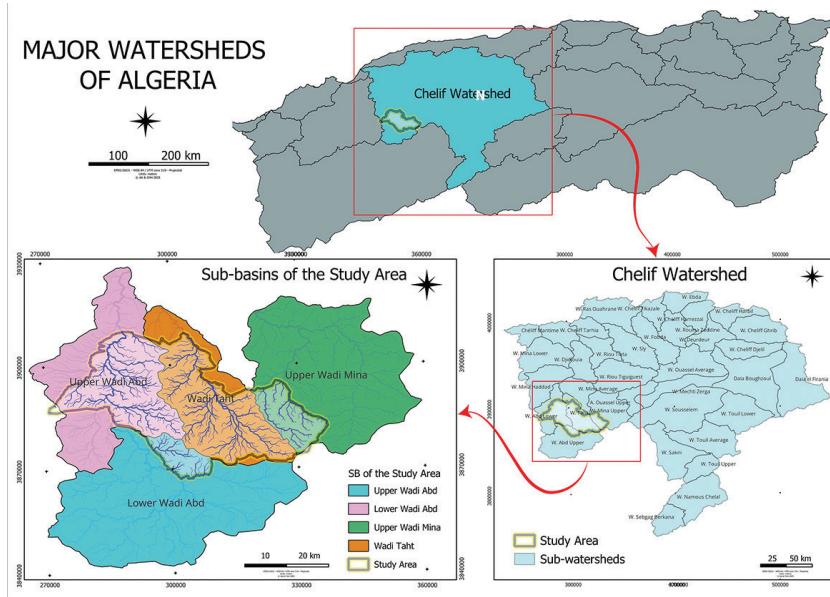


Fig. 3 - Watershed localization of the study area.

Fig. 3 - Localizzazione del bacino idrografico dell'area di studio.

Three superimposed aquifer levels are distinguished (Figure 2d):

1. A superficial aquifer within the Plio-Quaternary formations and Senonian limestone, with medium permeability.
 2. A perched aquifer within the Kimmeridgian formations, resting on impermeable Oxfordian clays.
 3. A deep aquifer within the fractured formations of the Aaléno-Bajo-Bathonian, confined beneath the Callovo-Oxfordian clays.

In order to better understand the hydrogeology of the alluvial plains as well as the dynamics and variations of groundwater in the two aquifers of the studied region, a piezometric map has been developed (Fig. 4).

According to this map, piezometric level varies among the three investigated areas. In Frenda, this level range from 689.5 to 1215.44 meters above sea level. As for Ain Hidid and

Takhemert, the piezometric level varies between 564 and 950 meters above sea level, and between 526.8 and 728 meters above sea level respectively. Moreover, the Figure 5 highlights an information about the topography and elevation of the study area.

The Table 1 indicates additional information by specifying the geographical coordinates, static level and piezometric level of the 36 water points in the study area.

The static level was measured before the sampling of water intended for physico-chemical analyses at the beginning of June 2021. This operation was carried out over three days: the first day in the Frenda region, the second in Ain Hérid, and the third in Takhemert.

Sampling procedures and analytical techniques

A total of 36 samples across the study area (Fig. 5) were collected between June to August (2021). All of them were

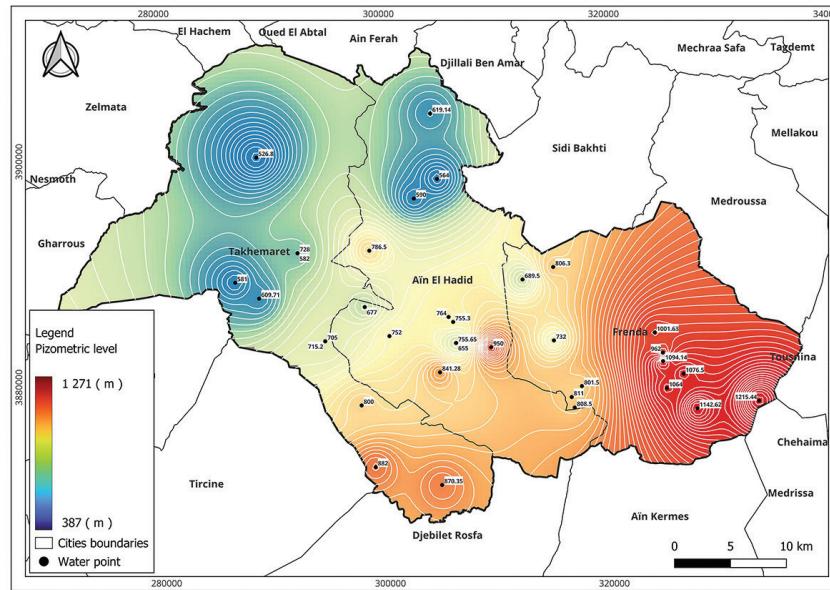


Fig. 4 - Piezometric map of the study area (m asl).

Fig. 4 - Piezometric map of the study area (m asl).

Tab. 1 - Geographic coordinates, static level and piezometric level of the sampling points in the study area.

Tab. 1 - Coordinate geografiche, livello statico e quota piezometrica dei punti di campionamento nell'area di studio.

Water point	Geographic coordinates		Static level (m)	Elevation (m asl)	Piezometric level (m asl)
	X	Y			
F1	1.09798	35.04705	44.5	1121	1076.5
F2	1.17174	35.02548	6.56	1222	1215.44
F3	1.11158	35.01928	44.38	1187	1142.62
F4	0.99155	35.01995	44.5	853	808.5
A1	0.87556	35.07156	32.35	788	755.65
A2	0.78325	35.02164	45	845	800
A3	0.85021	35.25491	8.86	628	619.14
A4	0.85992	35.0481	8.72	850	841.28
T1	0.68299942	35.1070021	26.29	636	609.71
T2	0.68015797	35.2196824	18.2	545	526.8
A5	0.86823	35.09242	34	798	764
A6	0.81044	35.07708	91	843	752
A7	0.87556	35.07156	133	788	655
A8	0.86199	34.95796	66.65	937	870.35
F5	0.97052	35.13237	66.7	873	806.3
F6	1.06979	35.08003	59.37	1061	1001.63
F7	1.0778	35.06391	133	1095	962
F8	1.07798	35.05705	8.86	1103	1094.14
T3	0.79703017	34.9722646	45	927	882
T4	0.74769372	35.0729593	26.8	742	715.2
T5	0.74769481	35.0729142	40	745	705
T6	0.65963236	35.1196789	30	611	581
T7	0.72061761	35.1433479	60	788	728
T8	0.72051008	35.143256	68	650	582
F9	1.08174	35.03548	83	1147	1064
F10	0.98863	35.0283	28	839	811
F11	0.99858	35.0371	48.5	850	801.5
F12	0.94052	35.12237	65.5	755	689.5
F13	0.97121	35.07367	50	782	732
F14	0.98863	35.02839	44.5	839	794.5
A9	0.8727	35.08843	37.7	793	755.3
A10	0.79072	35.14535	34.5	821	786.5
A11	0.83421	35.18703	87	677	590
A12	0.85691	35.20271	81	645	564
A13	0.7863	35.10032	98	775	677
A14	0.90991	35.06826	40	990	950

collected in pre-cleaned polyethylene bottles with high quality. Our sampling method was based on a selection of 36 wells during low flow, taking into account the location of water sources in relation to the lithology of the study area. The samples were taken after pumping for 10 to 15 min until constant conductivity, were kept in coolers (at 4 °C) until physical-chemical laboratory analyses.

In this study, the quantification of anions and cations is useful for identifying the ionic composition of the water,

which is essential for assessing its mineralization and detecting possible pollution. The Water Quality Index (WQI) aims to provide a global and synthetic assessment of water quality based on several physicochemical parameters. A complementary study to classify water types according to their dominant ionic composition (Piper diagram) and identify the major geochemical processes controlling water composition (Gibbs diagram) will be conducted.

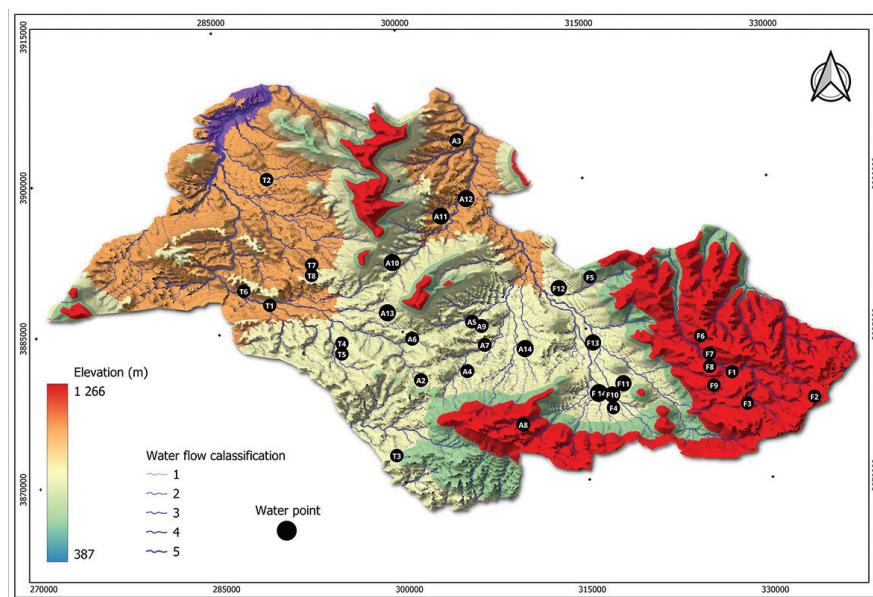


Fig. 5 - Location of water point in the study area.

Fig. 5 - Ubicazione dei punti di campionamento delle acque nell'area di studio.

Consequently, 17 parameters were analyzed in situ¹ and in the laboratory² according to Rodier et al. (2009). ¹Conductivity (EC), (pH), water temperature (T°) and (TDS) were measured using a portable device (HACH SL 1000). The instrument was calibrated using buffer solutions with pH values of 4, 7 and 9, as well as EC values of 147, 1413, and 12.88 μ S/cm, respectively.²The concentration of calcium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), chloride (Cl^-) and bicarbonate (HCO_3^-) was determined by the volumetric method. The EDTA titration analysis was used to examine calcium using Eriochrome Black and Murexide indicators, respectively. The nitrates (NO_3^-) and sulfate (SO_4^{2-}) were measured using a Spectrophotometer (HACH DR2500).

For the sodium and potassium, the concentration was determined using flame photometer (Jenway PFP7). Methyl orange was used with HCl (0.1N) titration to determine the bicarbonate (HCO_3^-). Chloride (Cl^-) was determined by titrating with silver nitrate ($AgNO_3^-$) solution using potassium chromate (K_2CrO_4).

The error ionic balance (EIB) has been assessed in this study to confirm the analytical precision for correct ion measurement. Several studies have established this EIB on a value precision at approximately $\pm 8\%$ (Fu et al., 2022) and $\pm 10\%$ (El Baba et al., 2020). However in our study this error ionic balance is acceptable at $\pm 5\%$ (Adimalla, 2019, Adimalla and Qian, 2021) using following equation:

$$EIB = (\sum \text{Cations} - \sum \text{Anions}) / (\sum \text{Cations} + \sum \text{Anions}) \cdot 100$$

Water quality index (WQI)

In order to properly classify water quality according to international standards as recommended by the WHO (2008), a quality index has been adopted in this study (Vasanthavigar et al., 2010). This index provides the composite influence of individual parameters on the overall quality of water for human consumption.

This index is calculated using the following equation reported by Bekkoussa et al., (2017):

Step 1

$$WQI = \sum SI_i = \sum W_i q_i = \sum \left[\left(\frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right) \cdot \left(\frac{C_i}{S_i} \cdot 100 \right) \right] \quad (1)$$

Where:

C_i : concentration of each parameter,

S_i : limit value of each parameter set by WHO standards,

w_i : the weight of each parameter according to its relative importance in the quality of drinking water (Table 2),

q_i : quality notation for each parameter,

W_i : the relative weight,

SI_i : the sub-index of parameteri.

Tab. 2 - Weight of physico-chemicals parameters (Bekkoussa et al., 2018).

Tab. 2 - Peso dei parametri fisico-chimici (Bekkoussa et al., 2018).

Parameters	Si (WHO standard maximum value) 2008	w_i	W_i
pH	9	3	0.094
TDS(ppm)	1500	5	0.156
Cl^- (mg/L)	250	4	0.125
SO_4^{2-} (mg/L)	250	4	0.125
Ca^{2+} (mg/L)	100	2	0.063
Na^+ (mg/L)	150	3	0.094
K^+ (mg/L)	12	3	0.094
Mg^{2+} (mg/L)	50	2	0.063
HCO_3^- (mg/L)	250	1	0.031
NO_3^- (mg/L)	50	5	0.156
Total		32	1

For a detailed explanation of the applied calculations, a numerical value named relative weight (W_i), specific to each physico-chemical parameter is calculated using following Equation according to Brown (Brown et al., 1970, 1972):

$$W_i = K/S_i \quad (2)$$

Where:

K: proportionality constant and is calculated using the following equation:

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

n: number of parameters

S_i : maximum value of the WHO standard (2008) for surface water of each parameter in mg/L except for pH and TDS (ppm).

Step 2: the sub-index (SI_i) value was calculated by using the expression

$$SI_i = [(C_i - S_o)] / [(S_i - S_o)] \cdot 100 \quad (4)$$

where

S_o = actual values of the parameters in pure water (generally

$S_o = 0$ for most parameters, except for pH).

$$S_{pH} = [(C_{pH} - 7)] / [(8.5 - 7)] \times 100$$

Irrigation index

In this study, a set of parameters such as the sodium adsorption ratio (Richards, 1954), sodium percentage (Wilcox, 1955), Kelly's ratio (Kelly, 1963) and magnesium hazard ratio (Ragunath, 1987) were evaluated to determine the irrigation index of the groundwater in the studied area, using the following equations:

$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}} \quad (a)$$

$$Na\% = \frac{Na + K}{Ca + Mg + Na + K} \cdot 100 \quad (b)$$

Tab. 3 - Groundwater Physicochemical parameters.

Tab. 3 - Parametri fisico-chimici delle acque sotterranee.

$$KI = \frac{Na}{(Ca + Mg)} \quad (c)$$

$$MH = \frac{Na}{(Ca + Mg)} \cdot 100 \quad (d)$$

Statistical analysis

Various statistical techniques including PCA and HCA are used to present our data using SPSS 20 software and OriginoPro 22. PCA is one of the important statistical methods that groups the data based on the inter-correlations between the variables and similarity between study factors. Correlations between water quality variables can mention many significant hydrochemical relationships (Adimalla & Qian, 2021). The box plots have been set up using OriginoPro 22.

Hydrochemical Characteristics of groundwater of the study area

Hydrochemical Composition

All charge-balance errors (EIB) for the three regions are within an acceptable limit of $\pm 5\%$. The groundwater of the study area is characterized by its richness in the chemical elements. The results of the surveyed water chemical and physical parameters are shown in Table 3.

As expected, for all samples the pH values have alkaline properties. Previous studies indicated the alkaline nature of the groundwater in Algeria (El Baba et al., 2020, Zemour et al., 2023).

The Piper diagram (Fig. 6) illustrates three distinct chemical facies: the first facies is HCO_3^- -Ca (27.77%), the second facies is Cl^- -Na (25%), and the third facies is HCO_3^- -Mg (19.44%). This could be explained by the increase in Ca^{2+} and Mg^{2+} concentrations resulting from the dissolution of carbonate formations (calcite and dolomite), as well as the dissolution of evaporitic formations (halite), which leads to a rise

Components	FRENDA			AIN HEDID			TAKHEMERT		
	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean
Na^+ (mg/L)	22	265	61.51	29	415	185	24	225	129.75
Ca^{2+} (mg/L)	48.89	142.68	100.31	44.08	226.8	136.79	48.89	195.59	135.06
Mg^{2+} (mg/L)	3.96	103.66	47.69	30.25	160.704	78.12	4.96	202.36	59.02
K^+ (mg/L)	1.2	13.8	5.99	2.4	19.4	9.43	2.5	8.5	4.11
HCO_3^- (mg/L)	201.3	463.6	358.16	262.3	463.6	345.96	323.3	463.6	366
SO_4^{2-} (mg/L)	12.9	219.11	84.71	20.14	466.75	191.21	13.7	193.07	128.59
Cl^- (mg/L)	56.8	383.4	126.28	71	937.2	377.3	35.5	454.4	284
NO_3^- (mg/L)	3.53	141.71	66.45	4.33	152.95	34.66	14.49	117.87	53.05
$T^{\circ} C^{\circ}$	26	29	27.89	25.3	29.2	27.56	25.5	29.2	27.6
pH	7.4	7.63	7.55	7.25	7.83	7.55	7.27	7.82	7.41
EC (μ S/cm)	477	1860	1097.79	765	4630	2047.7	615	2390	1614.8
TDS (ppm)	239	933	549.5	383	2320	1038.64	308	1194	807.37

in Cl^- and Na^+ concentrations in the water. Moreover, the study area, located 200 km from the sea, suggests the absence of Na^{+2} and Cl^- intrusion into the groundwater.

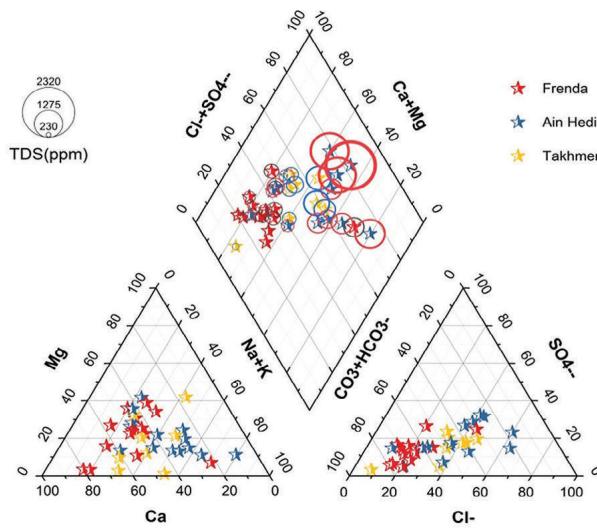


Fig. 6 - Piper diagram.

Fig. 6 - Diagramma di Piper.

Indeed, according to average results, among the measured element Ca^{2+} (6.10 meq/L) and Mg^{2+} (5.10 meq/L) represent the majority cation, while chloride (7.30 meq/L) is the most dominant anion. This could be explained by the dissolution of Ca^{2+} , Mg^{2+} and Cl^- with respect from calcite, dolomite and Halite (Chen et al., 2023; Martínez-Martínez et al., 2021).

This richness in Ca^{2+} is significantly observed in Ain Hedid (226.8 mg/L), a value that exceed the drinking water standard of 75 mg/L (WHO, 2008). Indeed, this same region (Ain Hedid) recorded the highest value of Cl^- (Table 3). In another study carried out in the Ghriss plain basin (Western Algeria), Bekkousa et al. (2017) demonstrated the same findings.

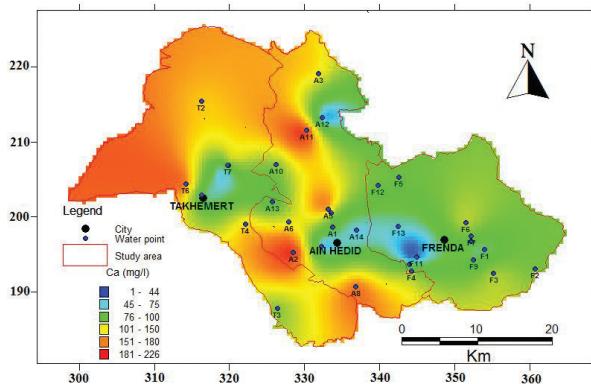
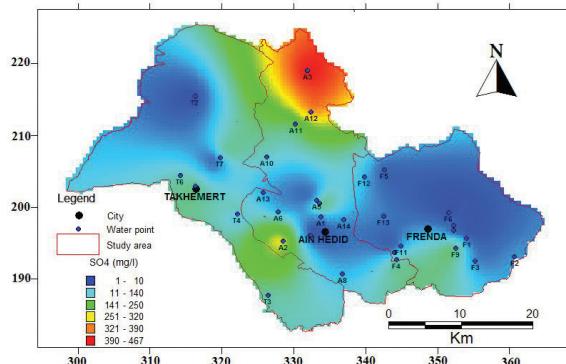
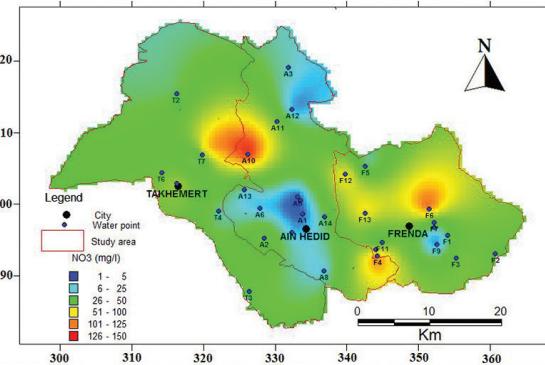
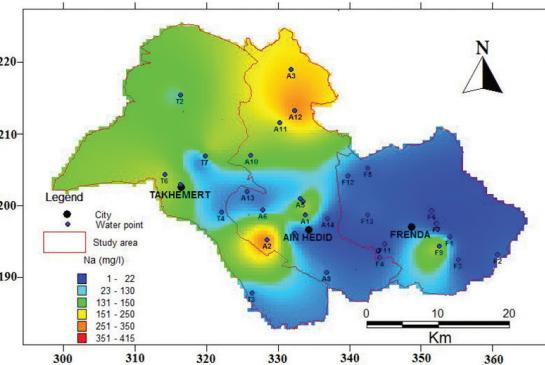
The result showed that the study area has a high NO_3^- and EC value exceeding WHO standards (2008). The use of fertilizers and pesticides in agricultural practice could be the main factor contributing to the increase for NO_3^- levels. Our study externalizes results exceeding those reported by Kenniche et al. (2022) in the Ghriss plain basin (Western Algeria).

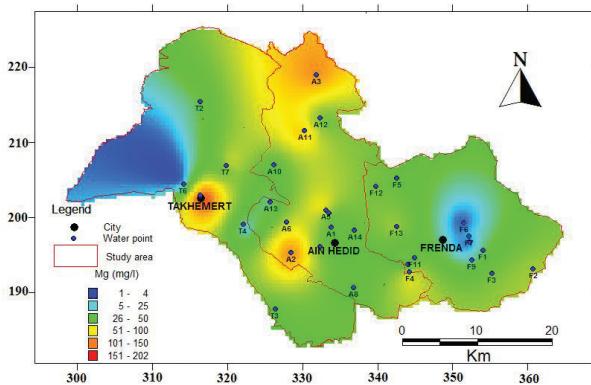
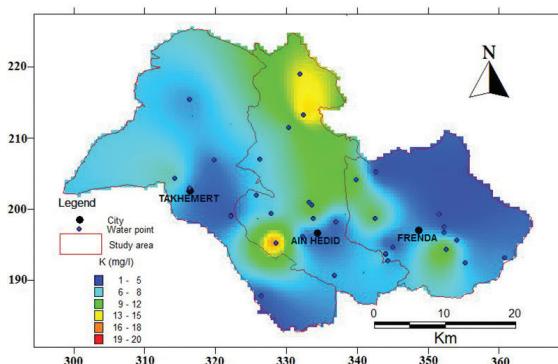
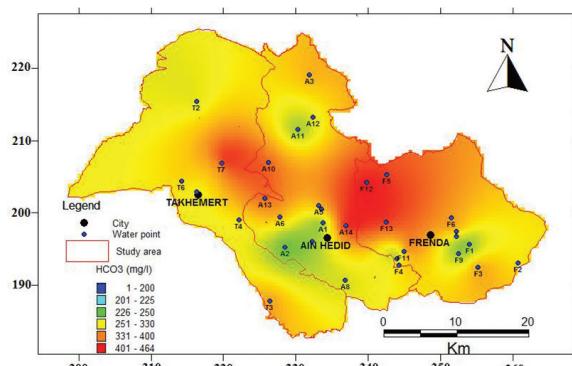
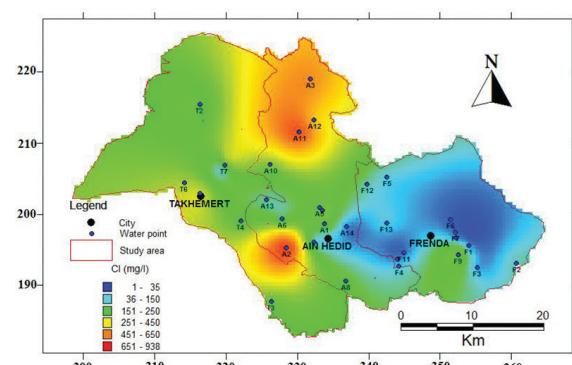
According to the spatial distribution of ions, calcium is distributed over the entire plain with high concentrations and above the standard (WHO, 2008) with a maximum value of 226.8 mg/L. Both of the magnesium and sodium are strongly localized in the north and south west of Ain Hedid and the center of Takhmert (Figs 7e, 7d), with 160.704 (mg/L) 202.36 (mg/L) respectively.

The majority ions, including chloride with a maximum value of 454.4 mg/L, exceeded the WHO standard (2008) and are generally distributed in the Northwestern part of Ain El Hedid. Additionally, high nitrate concentrations are found in the northwestern part of Ain El Hedid (152.95 mg/L) and the center of Frenda (141.71 mg/L) (Fig. 7c).

Fig. 7 - Spatial distribution of the major cations and anions in the study area.

Fig. 7 - Distribuzione spaziale dei principali cationi e anioni nell'area di studio.

Fig. 7a - Spatial distribution of Ca^{2+} in the study area.Fig. 7a - Distribuzione spaziale del Ca^{2+} nell'area di studio.Fig. 7b - Spatial distribution of SO_4^{2-} in the study area.Fig. 7b - Distribuzione spaziale di SO_4^{2-} nell'area di studio.Fig. 7c - Spatial distribution of NO_3^- in the study area.Fig. 7c - Distribuzione spaziale di NO_3^- nell'area di studio.Fig. 7d - Spatial distribution of Na^+ in the study area.Fig. 7d - Distribuzione spaziale di Na^+ nell'area di studio.

Fig. 7e - Spatial distribution of Mg^{2+} in the study area.Fig. 7e - Distribuzione spaziale del Mg^{2+} nell'area di studio.Fig. 7f - Spatial distribution of K^+ in the study area.Fig. 7f - Distribuzione spaziale di K^+ nell'area di studio.Fig. 7g - Spatial distribution of HCO_3^- in the study area.Fig. 7g - Distribuzione spaziale di HCO_3^- nell'area di studio.Fig. 7h - Spatial distribution of Cl^- in the study area.Fig. 7h - Distribuzione spaziale di Cl^- nell'area di studio.

Major ion correlation

Correlation analysis helps assess the relationships between the hydrochemical parameters of groundwater (Cosgrove et al., 2019). Electrical conductivity (EC) shown a strong positive correlation with most ions, except for HCO_3^- and NO_3^- (Fig. 8). The correlations with Cl^- , SO_4^{2-} , and Na^+ are all greater than 0.8. Fu et al. (2022) showed that EC is largely influenced by these ions.

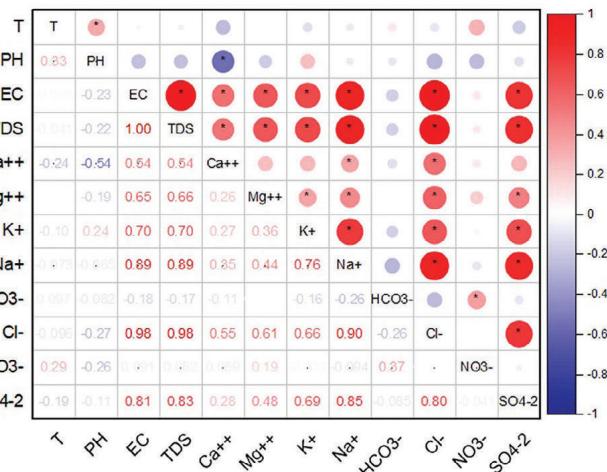


Fig. 8 - Correlation between groundwater hydrochemical parameters of the studied area.

Fig. 8 - Correlazione tra i parametri idrochimici delle acque sotterranee dell'area studiata.

The correlation between pH and other elements is relatively weak, a similar pattern being observed for HCO_3^- and NO_3^- . Our results also indicated a positive correlation between Na^+ and Cl^- , likely due to the dissolution of evaporitic minerals such as halite and gypsum (Calligaris et al., 2019). Additionally, we observed a positive correlation between Na^+ and SO_4^{2-} , which can be attributed to the dissolution of Glauber's salt ($Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$), a common source of both ions. Certain clay minerals, particularly illites, may incorporate sodium and potassium cations in their structure, explaining the positive correlation between Na^+ and K^+ (Kom et al., 2023). We also found a positive correlation between Cl^- and K^+ , linked to the dissolution of evaporitic minerals like sylvite. Furthermore, Cl^- has a strong positive correlation with SO_4^{2-} and Mg^{2+} , likely due to groundwater interacting with geological formations, releasing these ions into the water through natural geochemical processes or human activities.

Evolution of Groundwater Chemistry

Gibbs diagram provides a method for better understanding the processes that affect geochemical parameters underlying groundwater mineralization (Yahiaoui et al., 2023). It is intended to study the essential natural mechanisms controlling water chemistry and also to establish the relationship between the water composition and the lithological characteristics of the aquifer. Precipitation effects, rock weathering, and evaporation are the main factors involved in this diagram (Gibbs, 1970). According to Figure 9, evaporation and mineral

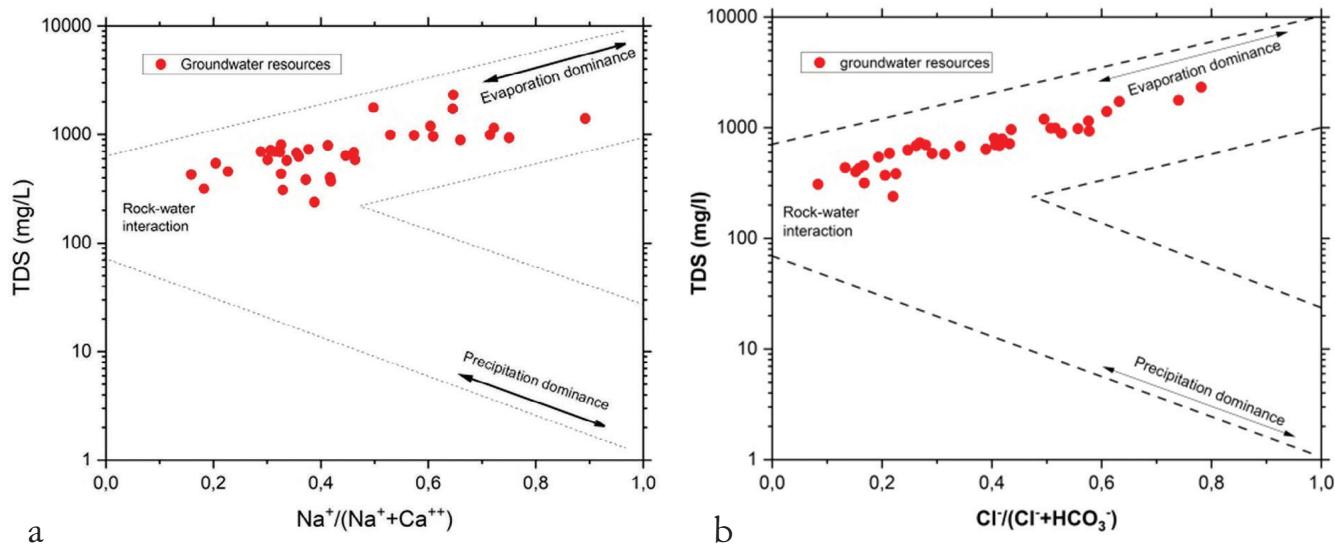


Fig. 9 - Gibbs diagram.

Fig. 9 - Diagramma di Gibbs.

weathering are the main factors affecting the chemical composition of studied groundwater.

Classification of water according to the Durov Diagram

The Durov diagram is based on the percentage of major ions in meq/L (Durov, 1948), where the percentages of total positive and negative ions always add up to 100%. The values of cations are represented in the left triangle, while those of anions are located in the upper triangle. Both are then projected onto the main field square. This diagram has the advantage of visualizing various geochemical processes that could influence water formation. Lloyd and Heathcoat (1985) divided the central square into nine sectors, each representing a specific hydrochemical process.

The Durov diagram (Fig. 10) can explain three major processes: mixing/dissolution, ion exchange, and reverse

ion exchange, especially when the total water concentration exceeds 1500 mg/L. This method was adopted to assess water types based on geochemical processes that may have influenced the nature of groundwater. It also allows presenting total concentrations of cations and ions, as well as pH and TDS.

The diagram results shown that most water samples exhibit simple dissolution or mixing. The results corroborate those obtained by the Gibbs diagram (Fig. 9).

Statistical analysis with PCA (Principal Component Analysis) and (HCA) (Hierarchical Cluster Analysis)

For more characterizing the revealed water parameters, the Principal component analysis (PCA) is adopted by previous studies (Gibbs, 1970; Gaur et al., 2022; Rahman et al., 2021; Adimalla, 2019; Gan et al., 2022). Therefore, the Scree plot has been, generally, using for selecting the principal components

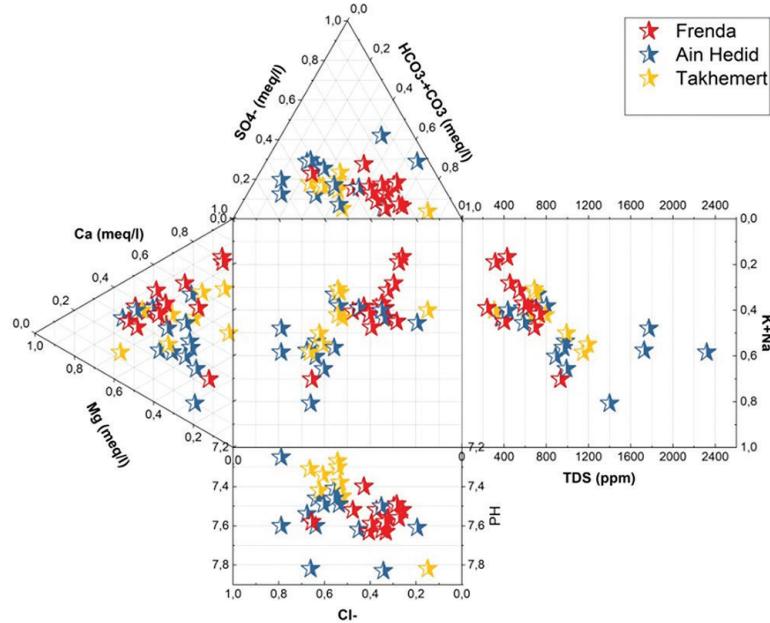


Fig. 10 - Durov Diagrams.

Fig. 10 - Diagrammi di Durov.

(PCs) (Fartas et al., 2022). Figure 11 highlighted that the first three components have the highest contribution to explain the variance of 49.14%, 14.66% and 12.755%. Hence, they accounted for 76.553% of the variability within the data.

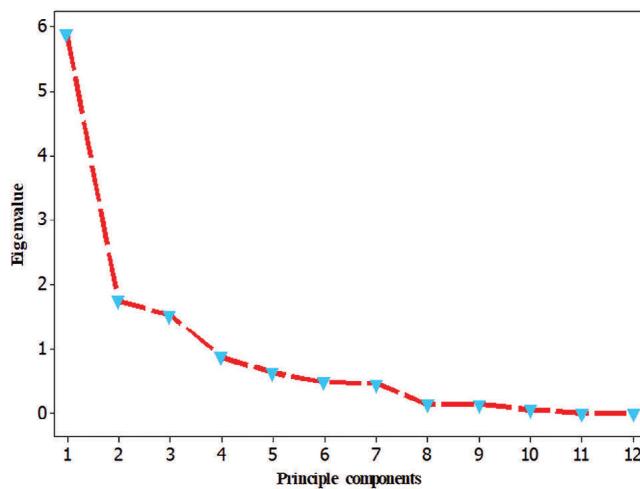


Fig. 11 - Principle component analysis (PCA) screen plot of studied parameters.

Fig. 11 - Diagramma dell'analisi delle componenti principali (PCA) dei parametri studiati.

Table 4 shows the factor weights values of observed factors related to each principal component. The coefficients of each parameter indicated the contribution of the corresponding variable to the specific principal component. Previously, Liun et al. (2003) have given the classification of PCs according to these values. Indeed the PCs are classed as weak, moderate, and strong if their factor loading values are 0.30–0.50, 0.50–0.75, and > 0.75 respectively.

Tab. 4 - Principal component loadings of the PCA.

Tab. 4 - Carichi delle componenti principali della PCA.

	PC1	PC2	PC3
T°C	-0.019	0.555	0.555
pH	-0.064	0.916	-0.160
EC	0.971	-0.169	0.066
TDS	0.975	-0.163	0.063
Ca ²⁺	0.430	-0.690	-0.023
Mg ²⁺	0.641	-0.136	0.318
K ⁺	0.811	0.234	-0.132
Na ⁺	0.937	0.023	-0.149
HCO ₃ ⁻	-0.215	-0.058	0.647
Cl ⁻	0.951	-0.218	-0.040
NO ₃ ⁻	0.024	-0.160	0.843
SO ₄ ²⁻	0.872	-0.033	-0.075

It was determined that the PC1 was connected with a positive weight with, conductivity (0.971), sodium (0.937), chloride (0.951), potassium (0.811), and SO₄²⁻ (0.872) with 49.14 per cent variation. This group of variables associated with PC1 indicates that salinization is the main factor influencing mineralization. Thus, the increase in salinity is primarily linked to the dissolution of minerals and the weathering of

evaporitic rocks (Benadela et al., 2022). The second factor PC2, representing 14.66% of the total variance, is strongly correlated with pH (0.916) and T°C (0.555), suggesting that the increase in temperature influences the rate of chemical reactions, potentially leading to a rise in the pH of the waters (BITENCOURT et al., 2019). However, Nitrate (0.843) and HCO₃⁻ (0.647) had positive weight in PC3, with a 12.76% of variance (Fig. 12). These elements are the main indicators of contamination related to agricultural activities (Bekkoussa et al., 2018).

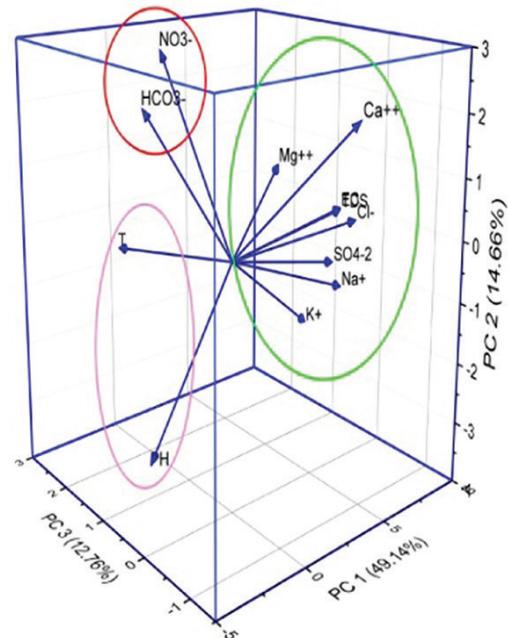


Fig. 12 - Component diagram (PCA).

Fig. 12 - Diagramma delle componenti (PCA).

The HCA method is the most approach which uses squared Euclidean distance that gives the most meaningful findings (Sharma et al., 2017). Cluster analysis using Ward's method and squared Euclidean distance (Fig. 13) validated the results of the Piper diagram (Amadou et al., 2022). The water sources are grouped into three main categories:

Cluster (A) (22.22% of sources): Primarily controls the salinity of groundwater, with a major influence from Na⁺ and Cl⁻ resulting from the dissolution of evaporitic formations (halite).

Cluster (B) (25% of sources): Includes HCO₃⁻, Ca²⁺, and Mg²⁺, highlighting the role of the dissolution of carbonate rocks (limestone, dolomite) and evaporitic minerals (gypsum) in groundwater chemistry.

Cluster (C): Dominated by the dissolution of dolomite [CaMg(CO₃)₂], representing the majority of sources in the region (52.77% of sources)

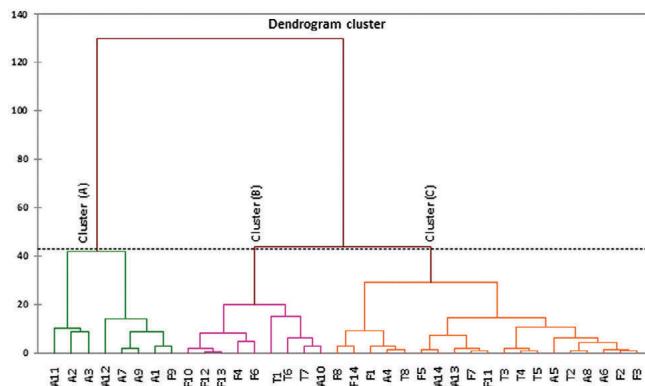


Fig. 13 - Classification of the studied parameters and sources according to HCA.

Fig. 13 - Classificazione dei parametri e delle fonti studiati secondo la HCA.

Water quality index (WQI)

Water quality is main information in nature resources management (Abdelaziz et al., 2020). It presents the water parameter datas that aggregate to produce a single value of the water quality from the huge amount of variable (Nguyen et al., 2022). With other parameters such as hydrogeochemical facies study and pollution index evaluation, the water quality index remains the most important to determine the groundwater quality for drinking and irrigation (Aljanabi et al., 2021). So, water quality standards have been established to evaluate this index on international and regional scale.

According to the established Box plot (Fig. 14), the values of WQI are between 89.8 (Frenda) and 281.8 (Ain Hedid).

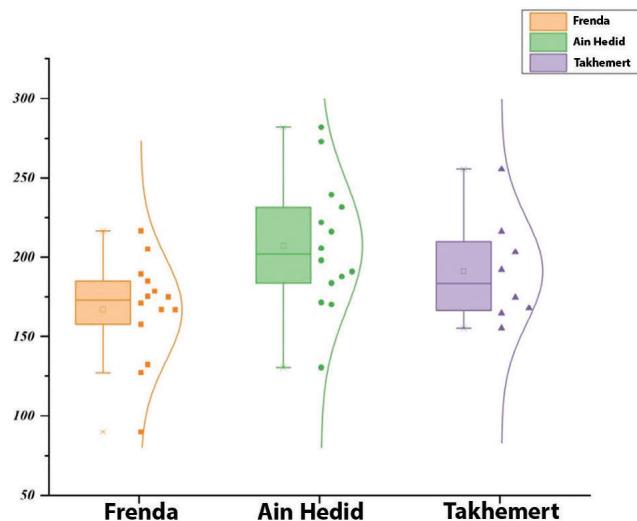


Fig. 14 - Box plot of WQI.

Fig. 14 - Box plot del WQI.

Additionally, the results showed that 2.7% of the samples from the studied alluvial plains belong to the good quality category (Table 5). While 63.8 % and 33.3% of the samples are classified in the poor and very Poor category respectively (Figure 15). Fortunately, our study disclosed a total absence of the very mediocre and unsafe drinking water categories.

Tab. 5 - Water classification according to WQI (Nayak et al., 2022, Bekkoussa et al., 2018).

Tab. 5 - Classificazione delle acque secondo il WQI (Nayak et al., 2022, Bekkoussa et al., 2018).

Index Classes WQI	Sample numbers and (%)	
Excellent (<50)	None	
Good (50 – 100)	1	(2.7)
Poor (100 – 200)	23	(63.8)
Very poor (200 – 300)	12	(33.3)
Unsafe drinking water (>300)	None	

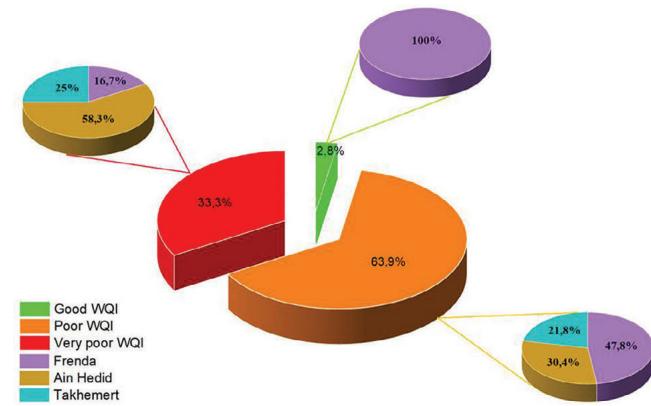


Fig. 15 - Water quality index for the three studied regions.

Fig. 15 - Indice di qualità dell'acqua per le tre regioni studiate.

According to the mapping and the special analysis of the WQI of the study region (Fig. 16), it has been shown that the whole region has poor to very poor potability, except the part of Frenda, with good potability (Agidi et al., 2022).

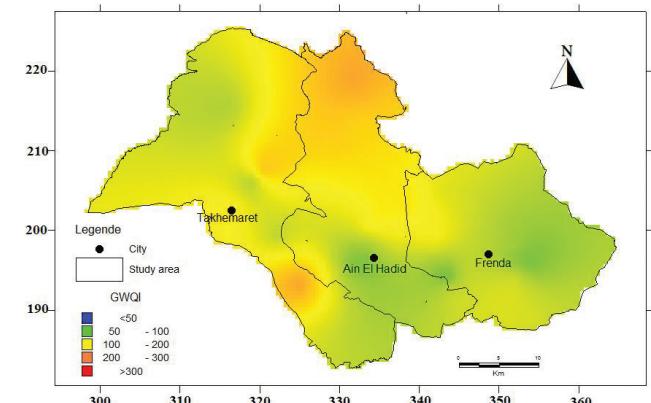


Fig. 16 - Map of the water quality index.

Fig. 16 - Mappa dell'indice di qualità dell'acqua.

Correlation between the water quality index and the major elements

According to the studied correlations between WQI and the determined ions, the increase in the amounts of the cations affects negatively the final water quality. Nevertheless, the evaluated index decreases with high values of HCO_3^- . Upon studying the analysis correlation (Fig. 17), the water quality index is positively correlated with Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , and Cl^- , SO_4^{2-} ions (Zamiche et al., 2018). Results confirmed by the

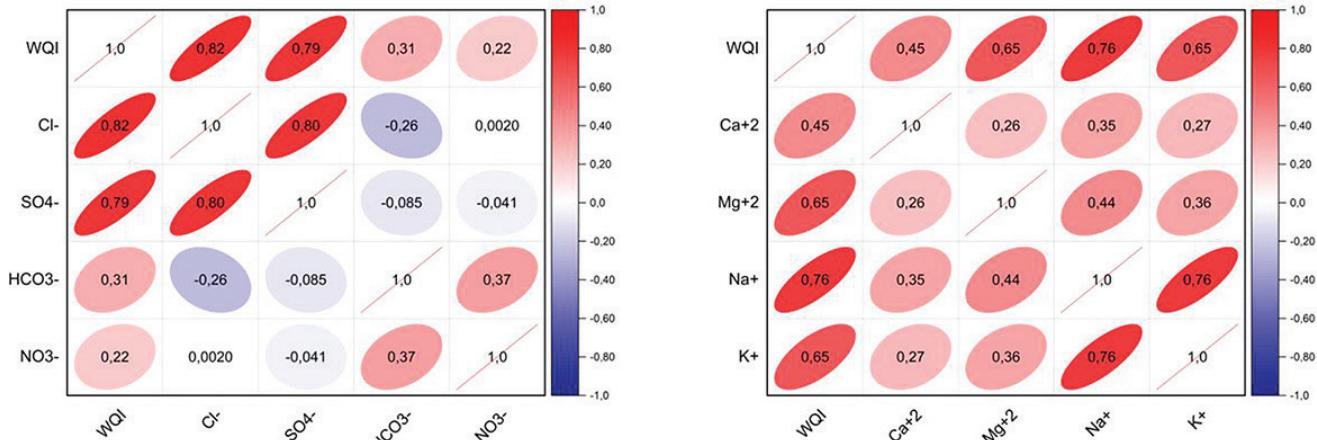


Fig. 17 - Correlation between the water quality index and the major ions.

Fig. 17 - Correlazione tra l'indice di qualità dell'acqua e gli ioni principali.

Gibbs diagram (Fig. 9) where the origin of the mineralization is largely due to the alteration and dissolution of the source rock, in particular the carbonate rocks (dolomite) and the evaporitic rocks (halite and sylvine) (Zamiche et al., 2018). Therefore the decrease in the water quality index of the study area is highly dependent on the increase in Na^+ , K^+ and Cl^- , SO_4^{2-} (Mammeri et al., 2023; Hosseini & Hassanzadeh, 2023).

Tab. 6 - Classification of groundwater quality according to irrigation index.

Tab. 6 - Classificazione della qualità delle acque sotterranee in base all'indice di irrigazione.

Parameters	Range	Water class	Samples	Index percentage (%)
Alkalinity hazard (SAR)	<10	Excellent	36	100
	10 – 18	Good	0	0
	18 – 26	Doubtful	0	0
	>26	Unsuitable	0	0
Salinity hazard (EC)	<250	Excellent	0	0
	250 – 750	Good	04	11.11
	750 – 2000	Permissible	26	72.22
	2000 – 3000	Doubtful	03	8.33
	>3000	Unsuitable	03	8.33
Sodium percentage (Na %)	<20	Excellent	12	33.33
	20 – 40	Good	16	44.44
	40 – 60	Permissible	6	16.66
	60 – 80	Doubtful	2	5.55
	>80	Unsuitable	0	0
Kelly Index (KI)	<1.0	Suitable	33	91.66
	>1.0	Unsuitable	03	8.33
Magnesium Hazard (MH) %	<50	Suitable	24	66.66
	>50	Unsuitable	12	33.33

Evaluation of Groundwater Suitability for Irrigation

From the irrigation standpoint, most of the analyzed wells present an acceptable quality according to the evaluated indices such as SAR, %Na and Kelley's Index. However, the presence of high salinity levels in some wells could restrict their use for irrigation. The Magnesium Hazard Index (MH) highlighted a risk associated in particular with a high concentration of magnesium, concerning more than 33.3% of the studied wells (Table 6).

Conclusion

In this study, water quality index (WQI) has been assessed to characterize the suitability of groundwater of 36 samples throughout three regions in the plain of Tiaret (Northwestern Algeria). According to this study, the pH values of all the samples have alkaline properties. Indeed, Piper diagram shown three chemical facies. The first is bicarbonate calcium ($\text{HCO}_3\text{-Ca}$) and the second is chloride Sodium (Cl-Na) and the third one is bicarbonate magnesium ($\text{HCO}_3\text{-Mg}$). According to WHO (2008), HCO_3^- and Cl^- are the dominant anions, while Ca^{2+} and Mg^{2+} represent the majority cations.

The spatial distribution of ions reveals that calcium is widely present throughout the plain, while magnesium and sodium are mainly concentrated in the north and southwest of Ain Hchedid, as well as at the center of Takhemert. Cl^- and sulphate are primarily found in the northwestern part of Ain Hchedid. Furthermore, this region and the center of Frenda, are characterized by high nitrate concentrations.

The results indicated that electrical conductivity (EC) and TDS are strongly correlated with most ions, except HCO_3^- and NO_3^- , while pH exhibited a weaker correlation with the other elements. A positive correlation was also found between Na^+ and the anions Cl^- , SO_4^{2-} and K^+ . Additionally, a positive correlation is observed between Cl^- and K^+ , SO_4^{2-} and Mg^{2+} .

Gibbs diagram confirmed that evaporation and mineral weathering are the main factors affecting the chemical composition of studied groundwater. Indeed, The Durov diagram revealed that most water samples exhibited simple dissolution or mixing.

According to the statistical analysis, most of the parameters (EC, Na^+ , Cl^- , K^+ , and SO_4^{2-}) are associated with PC1, indicating that mineralization process is mainly caused by salinization. The second factor, PC2, is strongly correlated with pH and T°C , suggesting that temperature increases may influence the rate of chemical reactions, potentially raising the pH of the water. The final factor, PC3, is correlated with nitrate and bicarbonate, which are key indicators of contamination linked to agricultural activities. The HCA method revealed three clusters upon analysis.

The results of the WQI showed that 2.7%, 63.8 % and 33.3% of the samples belong to the good quality category, poor and very poor category respectively. Most of the analyzed wells meet acceptable groundwater quality standards for irrigation, based on indices such as SAR, Na%, and Kelley's Index. However, high salinity levels in some wells may limit their use for irrigation. The Magnesium Hazard Index (MH) identified a risk, particularly due to high magnesium concentrations, affecting more than 33.3% of the studied wells. Therefore, this study recommends that the groundwater in this region be preserved and protected to ensure sustainable development. Moreover and as perspective, a future research will focus on isotopic analyses to enhance understanding of groundwater origin and recharge mechanisms in this area.

Competing interest

The authors declare no competing interest.

Acknowledgments

We would like to thank ZEMOUR Hafidh and CHERIER Hamid (Algeria) for their contribution in this work.

Author contributions

ATEA, MB, BBS, ZK and MM carried out laboratory work and analysed data. ATEA, MB and BBS advised about the laboratory technique and conducted manuscript proofreading before submission. All authors read and approved the final version of the manuscript.

Funding source

The authors declare no funding source

Additional information

DOI: <https://doi.org/10.7343/as-2025-852>

Reprint and permission information are available writing to acquesotterrane@anipapozzi.it

Publisher's note Associazione Acque Sotterranee remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

REFERENCES

- Abdelaziz, S., Gad, M.I., & El Tahan, A. H. M. H. (2020). Groundwater quality index based on PCA: Wadi El-Natrun, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 172, 103964. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2020.103964>
- Adimalla, N., & Qian, H. (2021). Groundwater chemistry, distribution and potential health risk appraisal of nitrate enriched groundwater: A case study from the semi-urban region of South India. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 207, 111277. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111277>
- Adimalla, N. (2019). Controlling factors and mechanism of groundwater quality variation in semiarid region of South India: an approach of water quality index (WQI) and health risk assessment (HRA). *Environmental Geochemistry and Health*, 42, 1725–1752. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00374-8>
- Agidi, B. M., Akakuru, O. C., Aigbadon, G. O., Schoeneich, K., Isreal, H., Ofoh, I., Njoku, J., & Esomoni, I. (2022). Water quality index, hydrogeochemical facies and pollution index of groundwater around Middle Benue Trough, Nigeria. *International Journal of Energy and Water Resources*, 8(1), 35-54. <https://doi.org/10.1007/s42108-022-00187-z>
- Aljanabi, Z. Z., Al-Obaidy, A. H. M. J., & Hassan, F. M. (2021). A brief review of water quality indices and their applications. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 779, 012088. [10.1088/1755-1315/779/1/012088](https://doi.org/10.1088/1755-1315/779/1/012088)
- Amadou, S., Seyni, N., & Serigne, F. (2022). Hydrogeochemical characterization of the Samba Dia aquifer (Central West Senegal). *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 38(1), 71-85.
- Ameur, M., Hamzaoui-Azaza, F., & Gueddari, M. (2016). Nitrate contamination of Sminja aquifer groundwater in Zaghouan, northeast Tunisia: WQI and GIS assessments. *Desalination and Water Treatment*, 57(50), 23698–23708. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1137495>
- Barakat, A. (2020). Groundwater NO_3^- concentration and its potential health effects in Beni Moussa perimeter (Tadla plain, Morocco). *Geoenviron Disasters*, 7, 14. <https://doi.org/10.1186/s40677-020-00149-9>
- Batarseh, M., Imreizeeq, E., Tilev, S., Al Alaween, M., Suleiman, W., Al Remeithi, A. M., Al Tamimi, M. K., & Al Alawne, M. (2021). Assessment of groundwater quality for irrigation in the arid regions using irrigation water quality index (IWQI) and GIS-Zoning maps: case study from Abu Dhabi Emirate, UAE. *Groundwater for Sustainable Development*, 14, 100611. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100611>

- Bekkoussa, B., Bekkoussa, S., Taupin, J. D., Patris, N., & Azzaz, H. (2017). Mapping of the Groundwater Quality Index of the Ghriss Plain, North-West Algeria. *Water Resources and Climate Change Anthropic and Climatic Impacts on the Variability of Water Resources*, 1-6.
- Bekkoussa, S., Bekkoussa, B., Taupin, J. D., Patris, N., & Meddi, M. (2018). Groundwater hydrochemical characterization and quality assessment in the Ghriss Plain basin, northwest Algeria. *Journal of Water Supply Research and Technology-Aqua*, 67 (5), 458-466. <https://doi.org/10.2166/aqua.2018.013>
- Benadela, L., Bekkoussa, B., & Gaidi, L. (2022). Multivariate analysis and geochemical investigations of groundwater in a semi-arid region, case of superficial aquifer in Ghriss Basin, Northwest Algeria. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 10(3), 233-249. <https://doi.org/10.19637/j.cnki.2305-7068.2022.03.003>
- Bitencourt, E. B., Almeida, K. M., Santos, L. M. M., & Júnior, A. P. (2019). Physicochemical and microbiological characterization of the influence of waste on the water quality of the Tocantins River, left bank (MARAB-PA). *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*, 11, 05-26.
- Brown, R. M., McClelland, N. I., Deininger, R. A., & O'Connor, M. F. (1972). A Water Quality Index-Crashing the Psychological Barrier. In: Thomas, W.A. (eds) *Indicators of Environmental Quality*. *Environmental Science Research*, 1. 173–182. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-2856-8_15
- Brown, R. M., McClelland, N. I., Deininger, R. A., & Tozer, R. G. (1970). A Water Quality Index- Do We Dare? *Water and Sewage Works*, 117, 339-343.
- Calligaris, C., Ghezzi, L., Petrini, R., Lenaz, D., & Zini, L. (2019). Evaporite Dissolution Rate through an on-site Experiment into Piezometric Tubes Applied to the Real Case-Study of Quinis (NE Italy). *Geosciences*, 9(7), 298. <https://doi.org/10.3390/geosciences9070298>
- Chadli, K., & Boufala, M. (2021). Assessment of water quality using Moroccan WQI and multivariate statistics in the Sebou watershed (Morocco). *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 27. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06296-5>
- Chen, C., Hanting, Z., Xinyu, W., Meng, N., Xia, W., Yuzhu, G., Han, W., Ruifeng, T., & Mingcai, H. (2023). Thermodynamic and Kinetic Studies of Dolomite Formation: A Review. *Minerals*, 13 (12), 1479. <https://doi.org/10.3390/min13121479>
- Chen, J., Qian, H., Gao, Y., Wang, H., & Zhang, M. (2020). Insights into hydrological and hydrochemical processes in response to water replenishment for lakes in arid regions. *Journal of Hydrology*, 581, 124386. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124386>
- Cosgrove, S., Jefferson, B., & Jarvis, P. (2019). Pesticide removal from drinking water sources by adsorption: a review. *Environmental Technology Reviews*, 8(1), 1-24. <https://doi.org/10.1080/21622515.2019.1593514>
- Durov, S. A. (1948). Classification of Natural Waters and Graphical Representation of Their Composition. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 59, 87-90.
- El Baba, M., Kayastha, P., Huysmans, M., & De Smedt, F. (2020). Evaluation of the Groundwater Quality Using the Water Quality Index and Geostatistical Analysis in the Dier al-Balah Governorate, Gaza Strip, Palestine. *Water*, 12(1), 262. <https://doi.org/10.3390/w12010262>
- Fartas, F., Reminib, B., Sekiou, F., & Marouf, N. (2022). The use of PCA and ANN to improve evaluation of the WQIclassic, development of a new index, and prediction of WQI, Coastel Constantinois, northern coast of eastern Algeria. *Water Supply*, 22 (12), 8727-8749. <https://doi.org/10.2166/ws.2022.389>
- Fu, T., Qi, C., Wang, Z., Li, C., Liu, W., Fu, Y., Chen, G., Su, Q., Xu, X., & Yu, H. (2022). Hydrochemical Characteristics and Quality Assessment of Groundwater under the Impact of Seawater Intrusion and Anthropogenic Activity in the Coastal Areas of Zhejiang and Fujian Provinces, China. *Lithosphere*, 18, 1394857. <https://doi.org/10.2113/2022/1394857>
- Galal Uddin, M. d., Moniruzzaman, M. d., Abdul Quader, M., & Abu Hasan, M. d. (2018). Spatial variability in the distribution of trace metals in groundwater around the Rooppur nuclear power plant in Ishwardi, Bangladesh. *Groundwater for Sustainable Development*, 7, 220-231. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2018.06.002>
- Galal Uddin, M. d., Nash, S., & Olbert, A. I. (2021). A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality. *Ecological Indicators*, 122, 107218. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107218>
- Gan, S., Zhang, M., Yu, K., Zhou, Y., & Yan, B. (2022). Groundwater quality assessment using principal component analysis modified water quality index in the Huangbizhuang, Northern China Plain. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 29(2), 597–620. <https://doi.org/10.1080/10807039.2022.2154193>
- Gaur, N., Sarkar, A., Dutta, D., Gogoi, B. J., Dubey, R., & Dwivedi, S. K. (2022). Evaluation of water quality index and geochemical characteristics of surfacewater from Tawang India. *Scientific Reports*, 12(1), 11698. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14760-3>
- Gibbs, R. J. (1970). Mechanisms controlling world water chemistry. *Science*, 170(3962), 1088–1090.
- Hosseiniinia, M., & Hassanzadeh, R. (2023). Groundwater quality assessment for domestic and agricultural purposes using GIS, hydrochemical facies and water quality indices: case study of Rafsanjan plain, Kerman province, Iran. *Applied Water Science*, 13, 84 <https://doi.org/10.1007/s13201-023-01891-9>
- Jasechko, S., Perrone, D., Befus, K. M., Bayani Cardenas, M., Ferguson, G., Gleeson, T., Luijendijk, E., McDonnell, J. J., Taylor, R. G., Wada, Y., & Kirchner, J. W. (2017). Global aquifers dominated by fossil groundwaters but wells vulnerable to modern contamination. *Nature Geoscience*, 10(6), 425-429. <https://doi.org/10.1038/ngeo2943>
- Kelly, W. P. (1963). Use of Saline Irrigation Water. *Soil Science*, 95, 385-391. <https://doi.org/10.1097/00010694-196306000-00003>
- Kenniche, S., Bekkoussa, B., M'nassri, S., Teffahi, M., Taupin, J. d., Patris, N., Zaagane, M., & Majdoub, R. (2022). Hydrochemical characterization, physicochemical and bacteriological quality of groundwater in Sidi Kada Mountains, northwest of Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 15, 1061. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10298-w>
- Kom, K. P., Gurugnanam, B., Bairavi, S., & Chidambaram, S. (2023). Sources and geochemistry of high fluoride groundwater in hard rock aquifer of the semi-arid region. A special focus on human health risk assessment. *Total Environment Research Themes*, 5, 100026. <https://doi.org/10.1016/j.totert.2023.100026>
- Li, Y., & Li, X. (2021). Research on water distribution systems from the past to the future: a bibliometric review. *Environmental Technology Reviews*, 10(1), 161–176. <https://doi.org/10.1080/21622515.2021.1900404>
- Liun, C. W., Linn, K. H., & Kuon, Y. M. (2003). Application of factor analysis in the assessment of groundwater quality in a black foot disease area in Taiwan. *Science of the Total Environment*, 313(1–3), 77–89. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(02\)00683-6](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00683-6)
- Lloyd, J. W., & Heathcoat, J. A. (1985). *Natural Inorganic Chemistry in Relation to Groundwater*. Clarendon Press, Oxford.
- Mammeri, A., Tiri, A., Belkhiri, L., Salhi, H., Brella, D., Lakouas, E., Tahraoui, H., Amrane, A., & Mouni, L. (2023). Assessment of Surface Water Quality Using Water Quality Index and Discriminant Analysis Method. *Water*, 15(4), 680. <https://doi.org/10.3390/w15040680>
- Martínez-Martínez, J., Anna, A., & David, B. (2021). The Role of Calcite Dissolution and Halite Thermal Expansion as Secondary Salt Weathering Mechanisms of Calcite-Bearing Rocks in Marine Environments. *Minerals*, 11(8), 911. <https://doi.org/10.3390/min11080911>
- Mehreen, A., Rafia, M., & Syed Mohammad, H. Z. (2021). Analysis of water quality indices and machine learning techniques for rating water pollution: a case study of Rawal Dam, Pakistan. *Water Science and Technology Water Supply*, 21(4), 3225.3250. <https://doi.org/10.2166/ws.2021.082>

- Misaghi, F., Delgosha, F., Razzaghmanesh, M., & Myers, B. (2017). Introducing a water quality index for assessing water for irrigation purposes: A case study of the Ghezel Ozan River. *Science of The Total Environment*, 589, 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.226>
- Nayak, A., Matta, G., & Uniyal, D. P. (2022). Hydrochemical characterization of groundwater quality using chemometric analysis and water quality indices in the foothills of Himalayas. *Environment, Development and Sustainability*, 13, 1-32. 10.1007/s10668-022-02661-4
- Nguyen, V. H., Nguyen, V. H., Truong, T. K., Nguyen, H. P., & Nguyen, D. G. C. (2022). A comprehensive procedure to develop water quality index: A case study to the Huong river in Thua Thien Hue province, Central Vietnam. *PLoS ONE*, 17(9), e0274673. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0274673>
- Ragunath, H. M. (1987). *Groundwater*. Wiley Eastern Ltd., New Delhi, 563.
- Rahal, O., Layachi, G., Garrote, L., Sappa, G., Balacco, G., Brahmi, S., & Maria de Filippi, F. (2024). Assessing the Impact of Climate Variability and Human Activity on Groundwater Resources in the Meskiana Plain, Northeast Algeria. *Water Resources*, 51, 1042–1053. <https://doi.org/10.1134/S0097807824603406>
- Rahman, K., Barua, S., & Imran, H. M. (2021). Assessment of water quality and apportionment of pollution sources of an urban lake using multivariate statistical analysis. *Cleaner Engineering and Technology*, 5, 100309. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100309>
- Richards, L. A. (1954). *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils*, Hand Book, 60. U.S. Department of Agriculture, Washington D.C.
- Rodier, J., Legube, B., Merlet, N., & Brunet, R. (2009). *Water analysis: natural waters, waste water, sea water*. 8th edition. Dunod. Paris, France. 1579p
- Safa, A. (2010). Contribution to the hydrogeological study of the Mina watershed, arid to semi-arid zone (Hautes Plaines Oranaises, north-western Algeria). PhD Thesis. Oran University. Algeria. 207p.
- Sharma, S., Kaur, I., & Nagpal, A. K. (2017). Assessment of arsenic content in soil, rice grains and groundwater and associated health risks in human population from Ropar wetland, India, and its vicinity. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(23), 18836–18848. 10.1007/s11356-017-9401-y
- Strojexport (1976). Geophysical study of the alluvial plains of Oueds el Abd and el Taht. 70p.
- Vasanthavigar, M., Srinivasamoorthy, K., Vijayaragavan, K., Rajiv Gantri, R., Chidambaram, S., Anandhan, P., Manivannan, R., & Vasudevan, S. (2010). Application of water quality index for groundwater quality assessment: Thirumanimuttar sub-basin, Tamilnadu, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 171, 595-609. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-1302-1>
- Wątor, K., & Zdechlik, R. (2021). Application of water quality indices to the assessment of the effect of geothermal water discharge on river water quality- a case study from the Podhale region (Southern Poland). *Ecological Indicators*, 121, 107098. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107098>
- WHO. (2008). *Guidelines for drinking-water quality*, World Health Organization, Geneva, Switzerland, 3rd edition,
- Wilcox, L. (1955). Classification and uses of irrigation waters. USDA Circular No. 969, Washington, DC.
- Yahiaoui, S., Meddi, M., Razack, M., Boufekane, A., & Bekkoussa, B. S. (2023). Hydrogeochemical and isotopic assessment for characterizing groundwater quality in the Mitidja plain (northern Algeria). *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 80029–80054. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27952-9>
- Zamiche, S., Hamaidi-Chergui, F., & Demiai, A. (2018). Pollution of the quaternary aquifer of Mitidja (Algeria) by nitrates: Origins and impacts on the quality of water for human consumption. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 10(1), 113. 10.4314/jfas.v10i1.8
- Zemour, Y., Mebrouk, N., Mayer, A., Mekebret, I., & Sherif, M. I. (2023). Hydrochemical and geological controls on dissolved radium and radon in northwestern Algeria hydrothermal groundwaters. *Chemosphere*, 313, 137573. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137573>