

Université de Mila
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Civil et Hydraulique



N°Ref :.....

Projet de Fin d'Etude préparé en vue de l'obtention du diplôme
de MASTER
Spécialité : Hydraulique Urbaine

**Suivit temporelle de la qualité chimique des eaux
souterraines et de surface de la vallée d'oued el nill
(willaya de Jijel), à la base d'une recherche
documentaire.**

Réalisé par :
-Meghzili Khalid

Soutenu devant le jury :

Pr. Koussa Miloud
Pr. Kabour Abdesslem
Dr. Chebbah Lynda

Président
Examineur
Promotrice

Année universitaire : 2025/2026

Dédicace

Alors que mon parcours de Master touche à sa fin, couronnant de longs mois d'efforts, de persévérance et de sacrifices, c'est avec une profonde gratitude et une immense fierté que je parachève aujourd'hui mon mémoire de fin d'études. Mes pensées les plus sincères vont à tous ceux qui, de près ou de loin, ont jalonné ma route et éclairé mon chemin.

Louange à Dieu pour l'accomplissement et la complétude de cette œuvre. À mon cher père, que Dieu le préserve, mon premier repère et mon soutien indéfectible à chaque étape de ma vie, la source de ma fierté et de mon bonheur. À ma tendre mère, que Dieu lui accorde longue vie, dont la bienveillance infinie et les longues nuits de veille ont guidé mes pas. C'est elle qui m'a appris que la réussite est le fruit de la volonté et de la détermination. À mes frères et sœurs, qui m'ont toujours insufflé la force nécessaire pour avancer, constituant mon refuge et mon pilier à chaque fois que le doute s'installait. À tous ceux qui m'ont soutenue, m'ont encouragée ou ont partagé ma joie, ne serait-ce que par une parole bienveillante. Enfin, je dédie ce travail à moi-même, en reconnaissance de la résilience dont j'ai dû faire preuve face à un chemin qui fut loin d'être facile. Je le dédie ensuite à vous tous, ainsi qu'à quiconque m'a insufflé le courage et la force de continuer.

Remerciements

Au seuil de ce travail, je remercie Dieu Tout-Puissant de m'avoir accordé le savoir et la connaissance , et j'adresse mes plus profonds remerciements à mes chers parents. Sans votre soutien, vos prières et vos sacrifices continus, je ne serais pas là aujourd'hui, et ce travail n'aurait jamais vu le jour. Dr.Chebbah Lynda, vous avez été l'une des enseignantes les plus sincères, portant la mission du savoir avec conscience et dévouement. Je vous remercie pour votre encadrement, votre disponibilité et les efforts que vous avez fournis pour la réalisation de ce mémoire. Aux membres du jury de soutenance, le Pr.KabourAbdesselem et le Pr.Koussa Miloud j'exprime mon profond respect et ma haute considération pour avoir accepté d'évaluer ce travail. À tous mes professeurs, qui m'ont fait découvrir les valeurs authentiques du savoir, j'exprime mon profond respect et ma gratitude. Finalement, je remercie chaleureusement toute ma famille, mes amis sans exception, ainsi que tous ceux que ma plume n'a pas mentionnés et que mon cœur n'a pas oubliés, et tous ceux qui m'ont soutenue tout au long de mon parcours.

Sommaire

Liste de figure	IV
Liste des tableaux	IV
Introduction Générale	1
CHAPITRE 1 : Cadre d'étude : présentation de la vallée de Oued El Nill	
Introduction	2
I.1.1. Situation géographique de la wilaya de Jijel	2
I.1.2. Situation de la zone d'étude	3
I .1.2. Contexte physique	4
I.2.1 .Géologielocale du bassin versant d'Oued Nil	4
I.2.1.1Terrain métamorphique	6
I.2.2. Caractéristiques géomorphologiques et relief du bassin versant d'oued Nil	7
I.2.3.Hydrologie	7
I.2.3.1. Régime hydrologique de l'Oued Nil	7
I.2.3.2. Caractéristiques des écoulements	7
I.2.3.3. Caractéristiques hydrologiques des affluents	8
I.2.4. Caractéristiques hydrogéologiques	8
I.2.4.1.Lithologie et hétérogénéité	9
I.2.4.2.Dynamique de la nappe et potentiel hydrogéologique	9
I.2.4.3. Alimentation et recharg	11
I.2.4.4. Potentiel d'exploitation	11
I.3 .Climat	12
I.3.1. Caractéristiques climatiques	12
I.3.1.1 <i>Précipitations :</i>	12
I.3.1.2. La température	14
I.3.2. Relation (précipitations– température)	15
I.3.3.L'évapotranspiration	16
I.3.3.1. Calcul de l'évapotranspiration potentiel (ETP)	16
I.3.3.2.Evapotranspiration réelle (ETR) ou déficit d'écoulement (De)	17
I.4.Contexte humain et socio-économique	19
I.4. 1. Contexte humain et socio-économique	19

I.4.2. <i>Un dualisme économique : entre agriculture et industrie</i>	19
I.4.3. Enjeux et défis du développement	20
Conclusion	20
CHAPITRE 2 : Caractérisation et évolution temporelle de la qualité des eaux de surface d'Oued El Nil	
Introduction	21
II.1. Méthodologie d'analyse des données compilées	21
II.1.1. Localisation des sites de prélèvement des eaux	22
II.2. Les paramètres physiques	22
II.2.1 .La température (T°C)	22
II.2.2.Le potentiel hydrogène (pH)	23
II.2.3.La conductivité électrique (CE)	24
II.3. Les paramètres chimiques « éléments majeurs »	25
II.3.1 .Le Calcium (Ca^{+2})	25
II.3.2. Le Magnésium (Mg^{+2})	26
II.3.3.Les Bicarbonates (HCO_3^-)	27
II.3.4. Le sodium (Na^+)	28
II.3.5 .Le potassium (K^+)	29
II.3.6. Les chlorures (Cl^-)	30
II.3.7 .Sulfate (SO_4^{2-})	31
II.4 .Rapports caractéristiques	32
II.4.1. Le rapport Na/Cl	32
II.5.2 .Le rapport Ca/Mg	33
II.5.3. Le rapport $(\text{Ca}+\text{Mg})/(\text{HCO}_3+\text{SO}_4)$	34
II.6 Classification des eaux « Faciès chimique »	34
II.6.1Diagramme de Piper	34
II.6.2Diagramme de Schoeller-Berkaloff	36
II.7. Discussion	38
Conclusion	40
CHAPITRE 3 : Caractérisation et évolution temporelle de la qualité des eaux souterraines de la plaine alluviale d'Oued El Nil	
Introduction	41
III.1. Localisation des sites de prélèvement des eaux	41

III.2.Les paramètres physiques	41
III.2.1. La température (T°C)	41
III.2.2. Le potentiel hydrogène (pH)	42
III.2.3 .La conductivité électrique (CE)	42
III.3.Les paramètres chimiques « éléments majeurs »	43
III.3.1 Le Calcium (Ca^{+2})	43
III. 3.2. Le Magnésium (Mg^{+2})	43
III.3.3. Les Bicarbonates (HCO_3^-)	44
III.3.4.Les chlorures (Cl^-)	45
III.3.5. Le sodium (Na^+)	45
III.3.6. Le potassium (K^+)	46
III.3.7.Sulfate (SO_4^{2-})	46
III.3.8. Nitrate NO_3^-	47
III.4.Rapports caractéristiques	47
III.4.1. Le rapport Na/Cl	48
III.4.2. Le rapport Ca/Mg	48
III.4.3. Le rapport $(\text{Ca}+\text{Mg})/(\text{HCO}_3+\text{SO}_4)$	49
III.5 .Classification des eaux « Faciès chimique »	50
III.5.1.Diagramme de Piper	50
III.5. 2. Diagramme de Schoeller-Berkaloff	51
III.6 .Discussion	53
Conclusion	55
CHAPITRE 4 : Évaluation de l'aptitude à l'irrigation et synthèse comparative	
Introduction	56
IV.1 .Méthodologie d'évaluation	56
IV.1.1. Risque de salinité	56
IV.1.2. Risque de sodification	56
V.1.3. Diagrammes de classification	57
IV.1.4. Résultats de l'aptitude à l'irrigation	60
IV.3.1. Les eaux de surface	60
IV.3.2.Les eaux souterraines	62
IV.4.Relation entre eaux de surface et eaux souterraines	64
IV.4.1Evolution entre 2015 et 2022	65
IV.5.Schéma conceptuel des interactions	66

IV.5.1 .Sources de Pression (Bloc Orange)	66
IV.5.2.Milieux Aquatiques(Bloc bleu)	66
IV.5.3.Impacts (Bloc rouge)	66
IV.6. Limites et perspectives	67
VI.6.1. Limites des données disponibles 5	67
VI.6.2.Perspectives de recherche	67
Conclusion	68
Conclusion Générale	70
Références bibliographiques	72

Liste des figures

Figure	Titre	Page
Figure I.1	Localisation géographique de la wilaya de Jijel	3
Figure I.2	Présentation de la zone d'étude.	4
Figure I.3	Carte géologiques de bassin versant d'oued Nil d'après la carte de J.M. Vila (1978).	5
Figure I.4	Carte hypsométrique du bassin versant d'oued Nil.	8
Figure I.5	Cartes piézométriques de la plaine alluviale d'Oued Nil.	11
Figure I.6	Carte pluviométrique de la wilaya de Jijel (ANRH, 1993 in Sadoun ,2013).	12
Figure I.7	Variation des précipitations moyennes mensuelles interannuelles à la station d'AchouatTaher(1950-2025).	13
Figure I.8	Variation des précipitations annuelles à la stationAchouat-Taher (1950-2025).	14
Figure I.9	Températures moyennes mensuelles interannuelles à la station d'AchouatTaher (1950- 2025).	15
Figure I.10	Diagramme Ombro-thermique de la station d'Achouat-Taher (1950-2025).	16
Figure I.11	Représentation graphique du bilan hydrologique à la station d'Achouat-Taher (1950-2025)	19
Figure II.1	Carte d'inventaire des stations de prélèvement d'eau de surfaced'Oued El Nil.	22
Figure II.2	Évolution temporelle de la température des eaux de surface d'Oued El Nil.	23
Figure II.3	Évolution temporelle du pH des eaux de surface d'Oued El Nil.	24
Figure II.4	Évolution de la conductivité électrique des eaux de surface d'Oued El Nil.	25
Figure II.5	Evolution temporelle de Ca^{+2} des eaux de surface d'Oued El Nil.	26
Figure II.6	Evolution temporelle de Mg^{+2} des eaux de surface d'Oued El Nil.	27
Figure II.7	Evolution temporelle du HCO_3^- des eaux de surface d'OuedEl Nil.	28
Figure II.8	Evolution temporelle Na^+ des eaux de surface d'OuedEl Nil.	29
Figure II.9	Evolution temporelle K^+ des eaux de surface d'Oued El Nil.	30
Figure II.10	Evolution temporelle du Cl^- des eaux de surface d'Oued El Nil.	31
Figure II.11	Evolution temporelle SO_4^{2+} des eaux de surface d'Oued El Nil.	32
Figure II.12	Rapport ionique rNa/rCl .	33
Figure II.13	Rapport ionique rCa/rMg .	33
Figure II.14	Rapport ionique $\text{r(Ca+Mg)/r(HCO}_3\text{+SO}_4\text{)}$.	34
Figure II.15	Diagramme de Piper des eaux de surface d'Oued El Nil.	36
Figure II.16	Diagramme de Schoeller des eaux de surface d'Oued El Nil.	38

Figure III.1	Carte d'inventaire des stations de prélèvement d'eau souterraine d'Oued El Nil.	41
Figure III.2	Évolution temporelle de la température des eaux de souterraines d'Oued El Nil.	42
Figure III.3	Évolution temporelle de pH des eaux de souterraines d'Oued El Nil.	42
Figure III.4	Évolution temporelle de CE des eaux de souterraines d'Oued El Nil.	43
Figure III.5	Évolution temporelle de Ca^{2+} des eaux de souterraines d'Oued El Nil.	43
Figure III.6	Évolution temporelle de Mg^{2+} des eaux de souterraines d'Oued El Nil.	44
Figure III.7	Évolution temporelle de HCO_3 des eaux de souterraines d'Oued El Nil.	44
Figure III.8	Évolution temporelle de Cl^- des eaux de souterraines d'Oued El Nil.	45
Figure III.9	Évolution temporelle de Na^+ des eaux de souterraines d'Oued El Nil.	46
Figure III.10	Évolution temporelle de K^+ des eaux de souterraines d'Oued El Nil.	46
Figure III.11	Évolution temporelle de SO_4^{2-} des eaux de souterraines d'Oued El Nil.	47
Figure III.12	Évolution temporelle de NO_3^- des eaux de souterraines d'Oued El Nil.	47
Figure III.13	Rapport ionique rNa/rCl .	48
Figure III.14	Rapport ionique rCa/rMg .	49
Figure III.15	Rapport ionique $\text{r(Ca+Mg)/r(HCO}_3+\text{SO}_4)$.	49
Figure III.16	Caractéristiques chimiques des eaux de souterraine de la plaine d'Oued EL Nil.	51
Figure III.17	Diagramme de Schoeller- Berkaloff des eaux de souterraine de l'Oued El Nil.	53
Figure IV.1	Diagramme de Riverside (Richards, 1954).	59
Figure IV.2	Diagramme de Wilcox(Wilcox, 1955).	59
Figure IV.3	Classification des eaux de surface d'Oued El Nil selon le schéma de Riverside.	61
Figure IV.4	Classification des eaux surface selon le diagramme de Wilcox.	62
Figure IV.5	Classification des eaux souterraines de la plaine alluviale d'Oued El Nil selon le diagramme de Riverside.	63
Figure IV.6	Classification des eaux souterraines de la plaine alluviale d'Oued El Nil selon le diagramme de Wilcox.	64
Figure IV.7	<i>Matrice</i> de corrélation entre les paramètres physico-chimiques des eaux de surface et souterraines – Avril 2015.	65
Figure IV.8	<i>Matrice</i> de corrélation entre les paramètres physico-chimiques des eaux de surface et souterraines – Avril 2022.	66
Figure IV.9	<i>Schéma conceptuel des interactions.</i>	67

Liste des tableaux

Tableau	Titre	Page
Tableau I .1	Variation des précipitations moyennes mensuelles interannuelles à la station AchouatTaher(1950-2025).	13
Tableau I .2	Températures moyennes mensuelles interannuelles de la station d'Achouat-Taher (1950-2025).	15
Tableau I .3	Calcul de l'ETP par la formule de Thornthwaite à la station d'AchouatTaher (1950-2025)	17
Tableau I .4	Le bilan hydrologique de la station d'Achouat-Taher(1950-2025).	18
Tableau II.1	Synthèse des tendances évolutives 2015 – 2022.	40
Tableau III .1	Synthèse des tendances évolutives des eaux souterraines (2015 – 2022).	51
Tableau IV.1	Classification des eaux d'irrigation à partir de ses qualités.	58

Résumé :

Ce travail évalue l'évolution temporelle (2015-2022) de la qualité chimique des eaux de surface et souterraines de la plaine alluviale d'Oued El Nil (Jijel, Algérie) à partir de deux campagnes de prélèvement (six stations de surface P1-P6 et six puits F1-F6). L'analyse des paramètres physico-chimiques, des rapports ioniques, des diagrammes de Piper, Schoeller, Richards (SAR/CE) et Wilcox (%Na) révèle une dégradation sévère des eaux de surface (CE multipliée par 2-3, fortes hausses de Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , chute du Mg^{2+} , basculement du faciès bicarbonaté naturel vers un faciès mixte anthropique $\text{Ca}-(\text{HCO}_3-\text{Cl}-\text{SO}_4)$ lié aux engrais et rejets domestiques/industriels) et une évolution plus modérée des eaux souterraines (hausse limitée des mêmes ions, tous conformes aux normes JORA 2011, seul le pH devenant acide à F3. L'aptitude à l'irrigation passe de C2S1 (bonne) à C3S1 (admissible) pour les eaux de surface, les eaux souterraines restant majoritairement C2S1. La comparaison des deux compartiments démontre une contamination univoque de la surface vers la nappe par infiltration à travers les alluvions, l'aquifère jouant un rôle tampon. Une surveillance renforcée, une réduction des intrants agricoles, un traitement des eaux usées et une protection des zones de recharge sont recommandés. Ce travail fournit une base scientifique pour une gestion durable de la ressource en eau dans la région de Jijel.

Mots Clés : Oued EL Nil , eaux souterraines , eaux surface , la qualité physico-chimique de l'eau.

Abstract:

This work assesses the changes over time (2015–2022) in the chemical quality of surface and groundwater in the Oued El Nil alluvial plain (Jijel, Algeria) based on two sampling campaigns (six surface stations P1–P6 and six wells F1–F6). Analysis of physico-chemical parameters, ion ratios, Piper diagrams, Schoeller, Richards (SAR/CE) and Wilcox (%Na) diagrams reveals severe degradation of surface water (CE increased by a factor of 2–3, sharp rises in Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , a drop in Mg^{2+} , a shift from a natural bicarbonate facies to a mixed anthropogenic $\text{Ca}-(\text{HCO}_3^-\text{Cl}-\text{SO}_4)$ linked to fertilizers and domestic/industrial discharges) and a more moderate change in groundwater (limited increases in the same ions, all compliant with JORA 2011 standards, with only the pH becoming acidic at F3). Irrigation suitability changes from C2S1 (good) to C3S1 (acceptable) for surface water, with groundwater remaining predominantly C2S1. A comparison of the two compartments demonstrates clear contamination from the surface to the groundwater table via infiltration through alluvial deposits, with the aquifer acting as a buffer. Enhanced monitoring, a reduction in agricultural inputs, wastewater treatment and protection of recharge areas are recommended. This study provides a scientific basis for the sustainable management of water resources in the Jijel region.

Key words: The Nile Valley, groundwater, surface water, physical and chemical water quality.

تقيم هذه الدراسة التطور الزمني (2015-2022) للجودة الكيميائية للمياه السطحية والجوفية في سهل وادي النيل (جيجل، الجزائر) استناداً إلى حملتي أخذ عينات (ست محطات سطحية P1-P6 وست آبار F1-F6) يكشف تحليل المعلومات الفيزيائية والكيميائية، والنسب الأيونية، ومخططات بيبر، وشولر، وريتشاردز (SAR/CE)، وويلكوكس (%Na) يظهر تدهوراً حاداً في المياه السطحية (تضاعف CE بمقدار 2-3، وارتفاعات كبيرة في Ca^{2+} ، Cl^- ، SO_4^{2-} ، Na^+ ، وانخفاض في Mg^{2+} ، وتحوّل من النمط البيكربونات الطبيعي إلى نمط مختلط من صنع الإنسان $Ca-(HCO_3-Cl-SO_4)$ المرتبط بالأسمدة والنفايات المنزلية/الصناعية) وتطور أكثر اعتدالاً للمياه الجوفية (ارتفاعات محدودة في نفس الأيونات، جميعها متوافقة مع معايير JORA 2011، فقط الرقم الهيدروجيني يصبح حمضياً عند F3) تتغير صلاحية الري من C2S1 جيدة إلى C3S1 مقبولة. C2S1 تُظهر المقارنة بين المكونين تلوثاً واضحاً من المياه السطحية إلى المياه الجوفية عن طريق التسرب عبر الرواسب، حيث يلعب الخزان الجوفي دوراً عازلاً. يُوصى بتعزيز المراقبة، وتقليل المدخلات الزراعية، ومعالجة مياه الصرف الصحي، وحماية مناطق التغذية. يوفر هذا العمل أساساً علمياً للإدارة المستدامة لموارد المياه في منطقة جيجل.

الكلمات المفتاحية: وادي النيل، المياه الجوفية، المياه السطحية، جودة المياه الفيزيائية والكيميائية.

Introduction générale

L'eau douce constitue une ressource fondamentale pour le développement socio-économique, l'équilibre des écosystèmes et la sécurité alimentaire des populations. Dans les régions méditerranéennes, où les pressions anthropiques et les aléas climatiques s'intensifient, la disponibilité d'une eau de qualité pour l'irrigation devient un enjeu stratégique majeur. En Algérie, le secteur agricole, grand consommateur d'eau, est particulièrement dépendant des ressources de surface et souterraines, dont la vulnérabilité croissante face aux pollutions diffuses et aux prélèvements excessifs soulève de sérieuses questions de durabilité.

La plaine alluviale d'Oued El Nil, située dans la wilaya de Jijel (Nord-Est algérien), bénéficie d'un potentiel hydrique exceptionnel (pluviométrie ≈ 1200 mm/an, aquifère alluvial de 80 à 100 m d'épaisseur). Cette ressource stratégique soutient une agriculture intensive et l'alimentation en eau potable, mais elle subit de fortes pressions anthropiques : engrais, chaulage, rejets domestiques non traités, urbanisation rapide et activités industrielles. La vulnérabilité de la nappe est accrue par la forte perméabilité des alluvions et la faible profondeur de la nappe, qui facilitent l'infiltration des polluants. Dans ce contexte, évaluer l'évolution temporelle de la qualité chimique des eaux de surface et souterraines, ainsi que leur aptitude à l'irrigation, est essentiel pour une gestion durable.

Face à ce constat, la question centrale qui guide ce travail est la suivante : *quelle est l'aptitude à l'irrigation des eaux de surface et souterraines de la plaine alluviale de l'Oued El Nil, et comment cette aptitude a-t-elle évolué temporellement sous l'effet conjugué des processus naturels et des pressions anthropiques ?*

Pour y répondre, nous avons défini les objectifs spécifiques suivants :

- ✓ Caractériser le cadre physique et humain ;
- ✓ Analyser l'évolution temporelle de la qualité physico-chimique ;
- ✓ Étudier l'évolution des eaux souterraines ;
- ✓ Évaluer l'aptitude à l'irrigation ;
- ✓ Identifier les relations entre eaux de surface et eaux souterraines ;
- ✓ Discuter les limites méthodologiques et ouvrir des perspectives.

Le mémoire s'organise en quatre chapitres complémentaires :

- ✓ Le chapitre 1 présente le cadre physique et socio-économique de la vallée d'Oued El Nil ;
- ✓ Le chapitre 2 analyse la dégradation sévère des eaux de surface ;
- ✓ Le chapitre 3 montre une dégradation plus modérée des eaux souterraines ;
- ✓ Le chapitre 4 synthétise l'aptitude à l'irrigation, les interactions surface-nappe et le rôle tampon de l'aquifère.

En fin, Une conclusion générale formule des recommandations pour une gestion durable.

Ce travail apporte une contribution originale à la connaissance hydrochimique d'une zone littorale algérienne et fournit aux gestionnaires des éléments scientifiques pour concilier développement agricole et préservation de la ressource.

CHAPITRE 1 :

Cadre d'étude : Présentation de la vallée d'Oued El Nil

Introduction :

La vallée de l'Oued El Nil, située dans le Nord-Est algérien au sein de la wilaya de Jijel, constitue un territoire d'une importance stratégique tant sur le plan hydrogéologique qu'agroéconomique. Bénéficiant d'une pluviométrie abondante et d'un aquifère alluvial puissant, cette plaine méditerranéenne représente un réservoir de ressources en eau exceptionnel à l'échelle régionale. Cependant, ce patrimoine naturel fait face à des pressions croissantes liées à une démographie galopante, à l'intensification agricole et au développement industriel.

Ce premier chapitre a pour objectif de dresser un cadre d'étude complet et contextualisé de la vallée de l'Oued El Nil. Il s'attachera dans un premier temps à situer géographiquement et administrativement la zone d'étude, avant d'analyser en profondeur son contexte physique à travers ses caractéristiques géologiques, géomorphologiques, hydrologiques et hydrogéologiques. Une attention particulière sera portée aux régimes climatiques et aux bilans hydriques qui conditionnent la disponibilité des ressources. Enfin, l'analyse du contexte humain et socio-économique permettra de comprendre les dynamiques territoriales à l'œuvre et les défis qui en découlent pour la gestion durable de l'eau. Cette mise en perspective multi scalaire posera les fondements nécessaires à la compréhension des enjeux environnementaux et anthropiques qui seront développés dans les chapitres suivants.

I.1 Localisation et délimitation :**I.1.1 Situation géographique de la wilaya de Jijel :**

La wilaya de Jijel, située dans le Nord-Est de l'Algérie, se trouve à environ 360 kilomètres de la capitale, Alger. Cette région est stratégiquement délimitée au Nord par la mer Méditerranée. Ses frontières terrestres incluent la wilaya de Mila au Sud, et la wilaya de Sétif au Sud-Ouest. À l'Est, elle partage une frontière avec la wilaya de Skikda, tandis qu'à l'Ouest, elle est bordée par la wilaya de Béjaïa. S'étendant sur une superficie de 2398 km² (Memoune, 2016).

La wilaya de Jijel est administrativement organisée en 11 daïras et 28 communes (Fig. I.1). Le bassin versant de l'Oued Nil couvre un territoire s'étendant sur plusieurs circonscriptions de la wilaya de Jijel. Le cours d'eau prend sa source dans la région limitrophe de Mila et traverse successivement les communes de : Ouled Asker, Chahna, El KennarNouchfi, Taher et Chekfa. L'embouchure de l'Oued Nil se situe dans la région de Bazoul, où il se déverse dans la mer (CAW.Jijel, 2012).

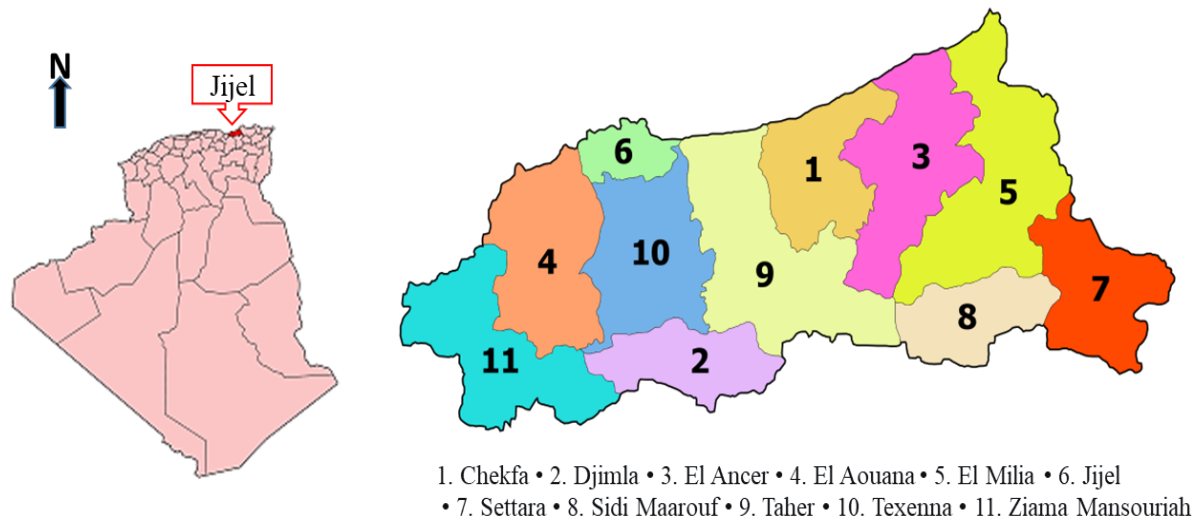


Figure I.1 : Localisation géographique de la wilaya de Jijel ([DZ 18 Districts Numbers Of Jijel Province - Daïras de la wilaya de Jijel — Wikipédia](#))

I.1.2 Situation de la zone d'étude :

Le bassin versant de l'oued Nil s'étend sur une superficie totale de 303,24 km², subdivisée en deux sous-bassins respectifs de 148 km² et 120 km². Ce bassin est drainé principalement par l'oued Nil et ses affluents majeurs, notamment oued Boukraa, Tassift et oued Saayoud (Fig. I.2). Le débit annuel moyen est estimé à 230 millions de mètres cubes (Balli et al., 2009).

Le secteur d'étude correspond à la plaine alluviale de l'oued Nil, intégrée aux bassins côtiers constantinois (03). Il se caractérise par une altitude moyenne de 486,58 m et se situe à environ 20 km du chef-lieu de la wilaya de Jijel. La plaine couvre une superficie d'environ 58 km². Elle est délimitée au Nord par la mer Méditerranée, au Sud par les reliefs montagneux de la Petite Kabylie, et s'étendant d'Est en Ouest entre l'Oued Mencha et l'Oued Kissir.

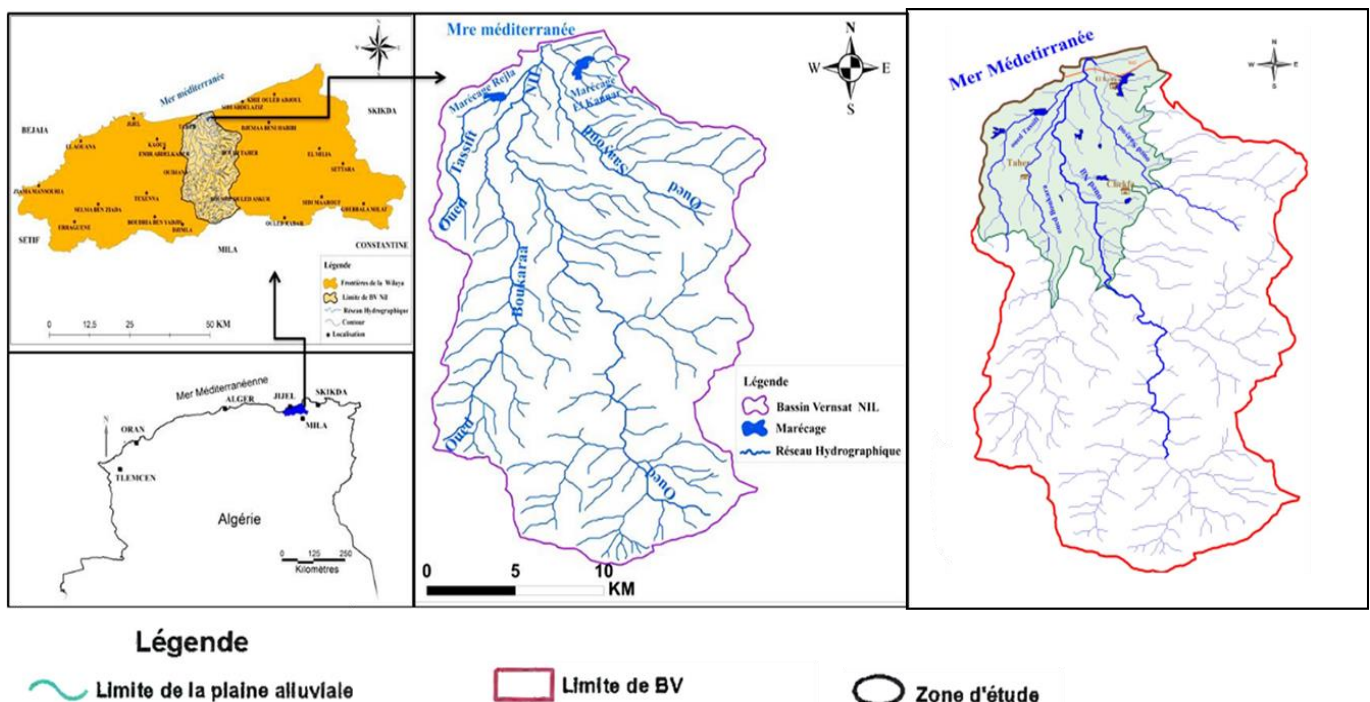


Figure I.2 : Présentation de la zone d'étude.(Memoune, 2016).

I.2. Contexte physique :

I.2.1 .Géologielocale du bassin versant d'Oued Nil :

Le bassin versant d'Oued Nil caractérisé par une dominance des montagnes. Ce bassin est composé de deux unités initiales : la première concerne les roches métamorphiques qui apparaît dans les monts qui entourent la plaine ; telle que les formations du socle du petit kabyle qui domine dans le bassin. Il occupe un espace important à l'amont jusqu'à la partie Nord-Est, et un petit morceau existe à la partie Sud-Ouest, au milieu se trouve les formations Oligo-Miocène kabyle caractérisé par une diversité des formations comme les carbonates, les calcaires et les Olistostrome... etc. Géologie locale du bassin versant d'Oued Nil (Fig.I.3) :

Le bassin versant d'Oued Nil caractérisé par une dominance des montagnes. Ce bassin est composé de deux unités initiales : la première concerne les roches métamorphiques qui apparaît dans les monts qui entourent la plaine ; telle que les formations du socle du petit kabyle qui domine dans le bassin. Il occupe un espace important à l'amont jusqu'à la partie Nord-Est, et un petit morceau existe à la partie Sud-Ouest, au milieu se trouve les formations Oligo-Miocène kabyle caractérisé par une diversité des formations comme les carbonates, les calcaires et les Olistostrome... etc. (Fennour, 2020)

Dans la partie aval du bassin on trouve la deuxième unité qui correspondant aux roches sédimentaires qui occupent la plaine de bassin, elle est formé (Fennour, 2020) :

- 1- Les dépôts alluvionnaires le long des lites des oueds ;
- 2- Les formations du cordon dunaire situé dans la partie Nord au bord de la mer ;
- 3- Les formations du grès et d'argile qui affleurent dans la partie Nord de la plaine ;
- 4- Les dépôts marneux qui séparent Oued Saayoud et Oued Nil et les dépôts détritiques (formation flysch) qui séparent oued Nil, oued Boukraa et oued Tassift ;
- 5- Les dépôts de marne grise qui séparent oued Boukraa et d'oued Tassift (Fig. 3).

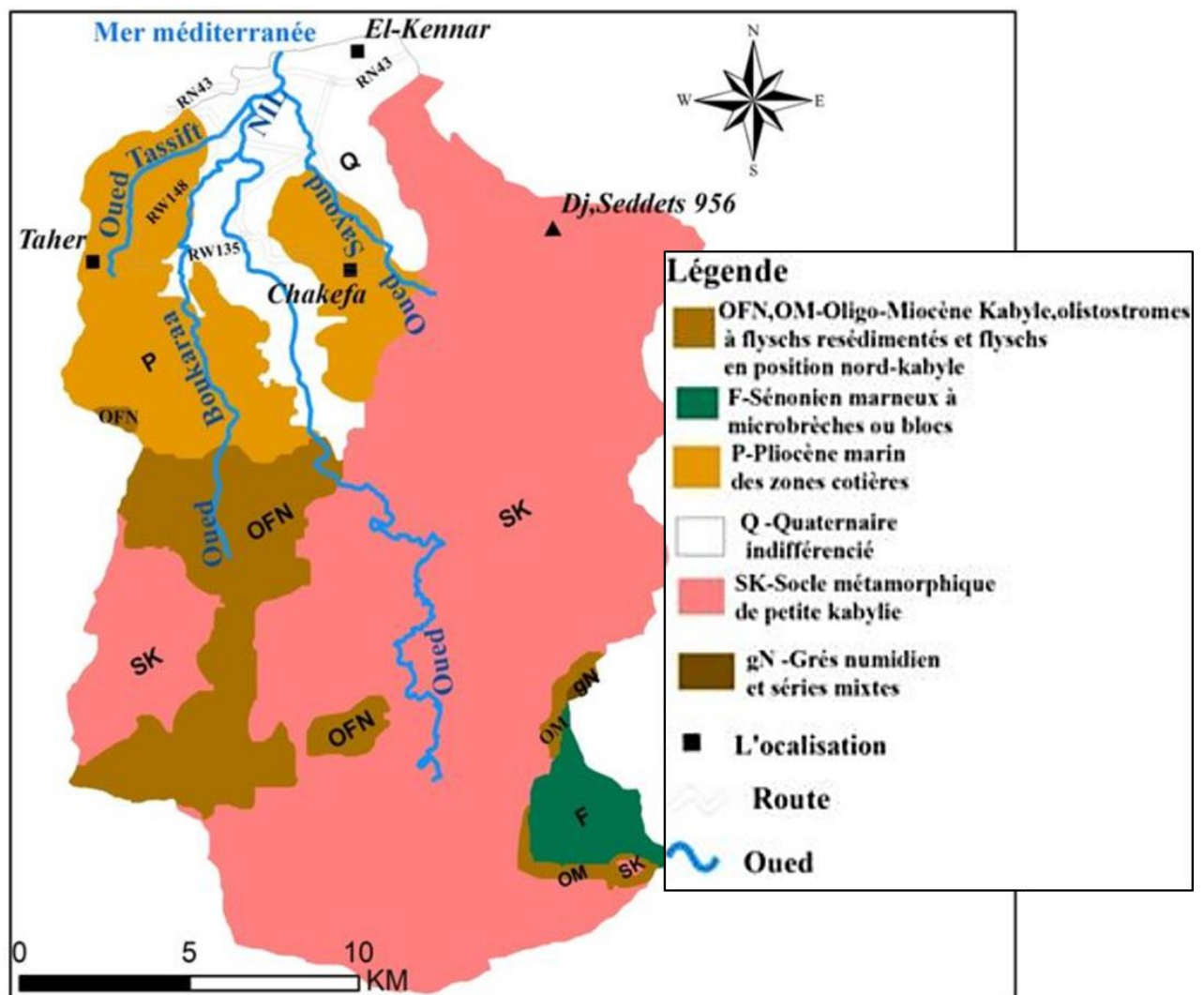


Figure I.3 : Carte géologiques de bassin versant d'Oued Nil d'après la carte de J.M. Vila (1978).
(Fennour, 2020)

a. Litho -stratigraphique du bassin versant d'Oued Nil :

✓ Quaternaire :

❖ **Alluvions Quaternaires** : Ce sont d'anciennes terrasses dans les vallées, leurs couches formées de composants grossiers qui pénètrent simplement. Ils sont exposés à l'Ouest depuis la plaine.

- ❖ **Limons** : Ils ont été trouvés dans les dépressions fermées, l'aspect principal étangs. Ils ont des composants argileux, et parfois sableux, de faible perméabilité, exposée au Nord de la plaine.
- ❖ **Les dernières alluvions** : On les trouve toujours le long des vallées principales, ils sont constitués d'éléments grossiers (gravier, agglomérats et gravier extrêmement perméable).
- ❖ **Dunes anciennes** : situés au Nord de la côte et se compose de sable fin limoneux souvent consolidé de boue tendre.
- ❖ **Dunes actuelles** : Ils sont situés au bord de la mer son composant important est le sable fin par fois consolidé. (Fennour, 2020)
 - ✓ **Tertiaire** :
- ❖ **Paléogène** : Des formations de grès forment le Sud de la plaine, qui sont mauritaniennes (Éocène supérieur - oligocène) faites de grès et numidiennes (Éocène supérieur - oligocène - miocène inférieure). C'est une formation de flysch.
- ❖ **Néogène** : On a deux âges la miocène inférieure (Burdigalien) et miocène moyen (Pontien).
 - **Miocène inférieure (Burdigalien)** : Elle se compose de protubérances dans la partie Ouest de la plaine qui se compose généralement de bavoires gris parfois, sablonneux ou jaunes dus à l'oxydation, il y a aussi des niveaux de débris et de nodules calcaires qui se chevauchent.
 - **Miocène moyen (Pontien)** : Il se distingue dans la vallée de Boukraa du côté Est et Ouest. Ses composants sont d'origine continentale (Dépôts, pierres et boue.)
- ❖ **Miocène marin (Sahélien)** : Elle est généralement formée par des marnes bleues, cette dernière est affleurée au milieu de la plaine et à l'est de la vallée principale (Fennour, 2020).

I.2.1.1 Terrain métamorphique :

- ❖ **Schiste – phyllade** : Sont des argiles aqueuses ou satinées très variées, coupant les veines de quartz laiteux et entre coupé de couches protectrices.
- ❖ **Calcaire (cipolins)** : De couleur blanc, gris ou bleuâtre, parfois micacé et pyriteux s'intercalant en bandes irrégulières ou en amas dans les schistes et les micaschistes.
- ❖ **Micaschistes et schiste micacé** : Ses principaux composants sont le mica noir et blanc.
- ❖ **Schiste granulitisés et gneiss** : L'injection de granulites dans les micaschistes conduit à la formation de gneiss de schiste. (Fennour, 2020)

I.2.2. Caractéristiques géomorphologiques et relief du bassin versant d'Oued Nil :

L'analyse topographique du bassin versant d'Oued Nil (Fig. I.4), nous a permis de distinguer deux unités topographiques qui sont:

- La plaine alluviale d'Oued Nil dans la partie aval du bassin qui est caractérisée par une topographie sub-plane à des pentes relativement faibles, matérialisée par le sens de l'écoulement superficiel. Cette plaine est étagée par différents niveaux de terrasses quaternaires caractérisées par de nombreux petits ravins, ces derniers avec les dépressions fermés ou marécages sont engorgés par les fortes précipitations.
- Les zones montagneuses plus ou moins élevées, qui occupent surtout les bordures du bassin versant dont les principaux sont : Djebel El kelaa (311 m), Sadet (956 m), Touzlant (921 m), Echlala (843 m), Taza mt (851 m) et El Medayene (791 m) (Fig. 4) (Bouakkaz et Zentout, 2020).

I.2.3. Hydrologie :

I.2.3.1. Régime hydrologique de l'Oued Nil :

L'Oued Nil constitue l'un des systèmes hydrographiques les plus importants de la wilaya de Jijel. Son régime hydrologique est de type pluvial méditerranéen, étroitement lié aux précipitations abondantes de la région (environ 1200 mm/an). (Mahdid, 2015)

I.2.3.2. Caractéristiques des écoulements :

Le débit annuel moyen de l'Oued Nil à son embouchure est estimé à environ 230 millions de mètres cubes. Ce volume important en fait un acteur majeur de la mobilisation des ressources en eau de surface dans le Nord-Est algérien. L'écoulement est caractérisé par une forte saisonnalité (Mahmoud, 2020 ; Meybeck, 1983 ; Bourkoua, 2016) :

- Période de hautes eaux (Hiver) : Les débits sont maximaux entre Décembre et Mars, période durant laquelle se produisent des crues rapides et violentes. Ces événements sont favorisés par l'imperméabilité du socle métamorphique en amont et les fortes pentes du bassin versant.
- Période d'étiage (Été) : Les débits diminuent considérablement durant les mois d'été (Juillet à Septembre). Cependant, contrairement à certains oueds temporaires, l'Oued Nil maintient un écoulement de base grâce à la vidange des nappes alluviales de sa plaine.

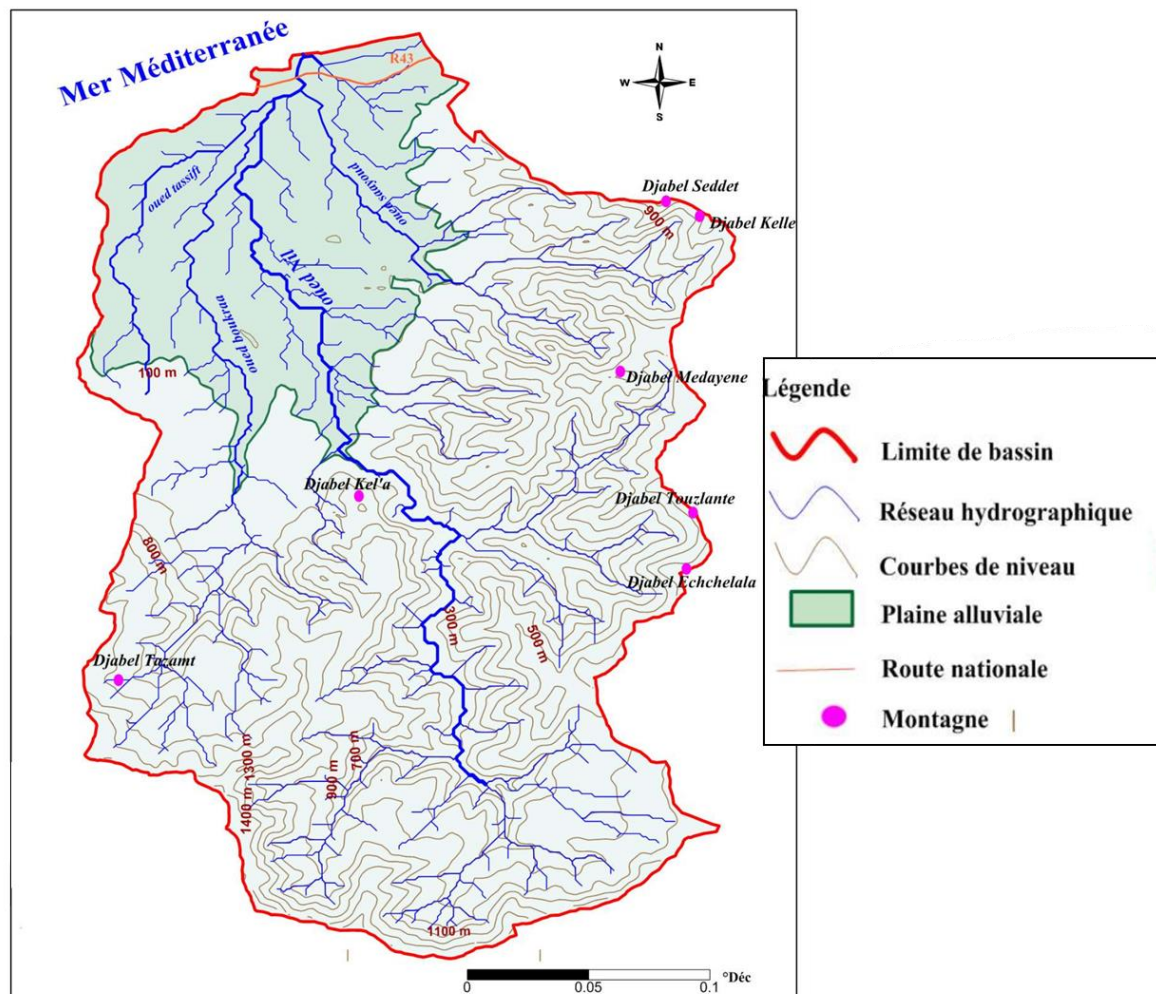


Figure I.4 : Carte hypsométrique du bassin versant d'Oued Nil. (BouakkazetZentout, 2020)

I.2.3.3. Caractéristiques hydrologiques des affluents :

La pente relativement faible, favorisent des écoulements rapides lors des épisodes pluvieux intenses, contribuant ainsi à la dynamique des crues de l'Oued Nil. (Mimoune et Bourkoua, 2016)

- Productivité et apports en eau :

La productivité hydrologique du bassin versant de l'Oued Nil est considérable, composée par (Mimoune et Bourkoua, 2016):

- Le ruissellement, qui correspond à la part des précipitations qui s'écoule en surface, représente environ 34,45% du total des précipitations, soit une lame d'eau de 350,3 mm/an.
- L'infiltration, quant à elle, est estimée à 130,58 mm/an, soit 12,84% des précipitations annuelles.

I.2.4 Caractéristiques hydrogéologiques :

L'hydrogéologie du bassin de l'Oued Nil est dominée par la présence d'un aquifère alluvial Quaternaire. Cet aquifère, constitué des dépôts de sables, graviers et galets, est le principal réservoir d'eau souterraine de la région. L'épaisseur de ces alluvions est variable, augmentant de

l'amont vers l'aval pour atteindre 80 à 100 mètres à la confluence de l'Oued Nil et de l'Oued Boukraa, cette variation d'épaisseur est un facteur clé influençant le volume d'eau stocké et la capacité de l'aquifère à fournir de l'eau (Mimoune et Bourkoua, 2016).

I.2.4.1.Lithologie et hétérogénéité :

La lithologie de l'aquifère est caractérisée par une hétérogénéité spatiale. En amont du bassin, les alluvions sont plus grossières, composées majoritairement de graviers et de galets, ce qui confère une bonne perméabilité. En revanche, en aval, les dépôts deviennent plus fins, avec une prédominance d'éléments argilo-limoneux et sableux, entraînant une perméabilité plus faible. La présence de lentilles argileuses au sein de l'aquifère peut également créer des discontinuités et influencer localement les flux d'eau souterraine (Mimoune et Bourkoua, 2016).

I.2.4.2.Dynamique de la nappe et potentiel hydrogéologique :

- Piézométrie :

Carte piézométrique de la plaine alluviale d'Oued Nil – Avril 2015

En avril 2015, la carte piézométrique de la plaine alluviale d'Oued Nil révèle une bonne correspondance entre les courbes isopièzes et la topographie de la plaine. L'écoulement souterrain principal s'effectue selon une direction générale Sud-Nord, globalement parallèle au lit d'Oued Nil (Fig. I.5).

Les courbes isopièzes présentent un resserrement marqué au niveau des bordures Est, notamment à l'approche du marécage d'El Kennar, traduisant un gradient hydraulique élevé, de l'ordre de 0,93 %. En revanche, dans la partie Nord, l'espacement des courbes augmente, indiquant une diminution du gradient, donc un ralentissement de l'écoulement. Cette variation est liée à un changement de perméabilité : faible à l'Est (zones marneuses), elle devient plus importante au centre (alluvions), puis évolue à nouveau vers le Nord (sables dunaires).

À l'Ouest, près de la commune de Taher, les courbes sont également resserrées, avec un gradient élevé d'environ 0,94 %. Au Sud et Sud-Ouest, on observe une configuration inverse : les courbes sont espacées sur les bordures (faible gradient, environ 0,50 %), puis se resserrent au centre, près de Chekfa (gradient de 0,61 %), avant de s'espacer à nouveau au Nord-Ouest. Cette répartition traduit une hétérogénéité lithologique : formations marneuses en périphérie, alluvions perméables au centre, et sables dunaires sur la frange côtière.

Carte piézométrique de la plaine alluviale d'Oued Nil – Avril 2022

En avril 2022, l'analyse de la carte piézométrique met en évidence un écoulement souterrain selon deux directions principales : Sud-Nord (S-N) et Sud-Est–Nord-Ouest (SE-NW). L'examen détaillé permet de distinguer plusieurs zones hydrogéologiques aux comportements contrastés (Fig. I.5) :

- **Zone Nord-Est** : elle constitue une zone d'alimentation de la nappe, avec un écoulement dirigé du Sud-Est vers le Nord-Ouest. Le marécage d'El Kennar joue un rôle clé : il reçoit des apports hydriques en provenance de l'Est et restitue une partie de ces eaux à la nappe à l'Ouest.
- **Zone Nord-Ouest** : ici, l'écoulement suit également une direction SE-NW. La nappe est alimentée par Oued Nil, tandis que le marécage Redjla reçoit des apports du Sud et contribue à l'alimentation de la nappe vers le Nord.
- **Zone Sud** : l'alimentation de la plaine provient principalement des reliefs montagneux situés au Sud. En retour, la nappe alimente les oueds Boukräa et Nil, dont l'écoulement de surface suit une direction S-N.

La comparaison des deux campagnes piézométriques fait apparaître plusieurs évolutions significatives :

- En 2015, l'écoulement était principalement uni-directionnel (S-N), avec une forte influence de la topographie et de la lithologie sur la répartition des gradients. Les variations de perméabilité étaient clairement identifiées à travers le resserrement ou l'espacement des courbes isopièzes.
- En 2022, on observe une complexification du schéma d'écoulement, avec l'apparition d'une seconde direction dominante (SE-NW). Cette évolution suggère une reconfiguration des zones d'alimentation et de drainage, probablement liée à des changements dans les apports hydriques (naturels ou anthropiques) ou à une évolution des échanges nappe/rivière/marécages.
- Le rôle des marécages (El Kennar et Redjla) est plus explicite en 2022, avec une fonction d'interface hydrogéologique entre les apports latéraux et la nappe. En 2015, leur influence était moins clairement distinguée.

Donc, entre 2015 et 2022, le système hydrogéologique de la plaine d'Oued Nil a montré une évolution vers une plus grande complexité des écoulements, avec une diversification des directions et une meilleure caractérisation des échanges entre la nappe, les oueds et les zones humides. Ces changements pourraient être attribués à des variations des conditions hydrologiques

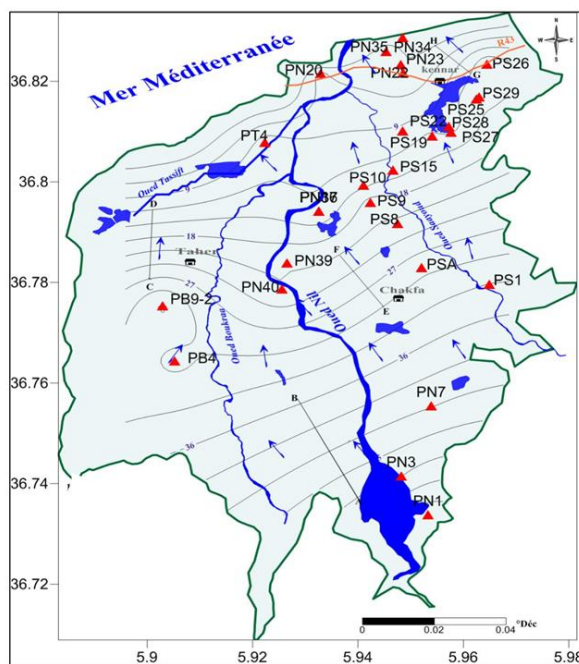
naturelles (régime des précipitations, crues) ou à des interventions anthropiques (pompages, aménagements). Une analyse plus approfondie, intégrant des données quantitatives (niveaux piézométriques, débits, pluviométrie), permettrait de mieux comprendre les facteurs à l'origine de cette évolution.

I.2.4.3 Alimentation et recharge :

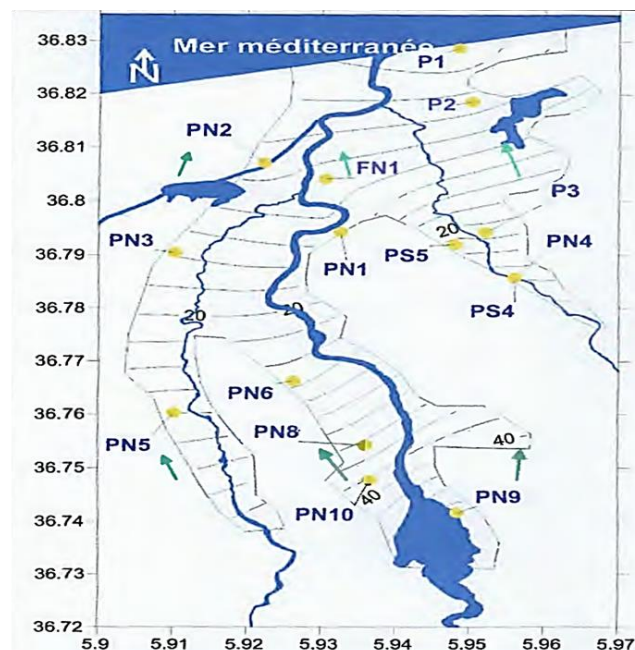
La nappe est principalement alimentée par l'infiltration des précipitations, qui sont abondantes dans la région, ainsi que par les apports des oueds (Oued Nil, Oued Boukraa, Oued Saayoud) et le ruissellement provenant des massifs montagneux environnants. La présence de zones marécageuses, comme celle d'El Kennar, indique également des interactions complexes entre les eaux de surface et les eaux souterraines (Mimoune et Bourkhoua, 2016).

I.2.4.4 Potentiel d'exploitation :

Le bassin de l'Oued Nil présente un potentiel hydrogéologique important, avec une abondance de ressources en eaux superficielles et souterraines. L'aquifère alluvial est intensivement exploité pour l'alimentation en eau potable des populations et pour l'irrigation des terres agricoles, notamment pour les cultures sous serre. (Mimoune et Bourkhoua, 2016)



Avril 2015 (Mimoun et Bourakoua, 2016)



Avril 2022 (Boussif et Bouatrous, 2022)

Figure I.5 : Cartes piézométriques de la plaine alluviale d'Oued Nil.

I.3.Climat :

Le climat de la wilaya de Jijel est de type méditerranéen. Il est caractérisé par :

- Une période froide à humide qui s'étend du mois de Novembre jusqu'au mois d'Avril. Elle est caractérisée par une forte précipitation avec des températures faibles qui peuvent atteindre jusqu'à 9°C au mois de Janvier ;
- Une période chaude et sèche qui s'étend du mois de Mai jusqu'au mois d'Octobre. Elle est caractérisée par de faibles précipitations avec une élévation dans les températures. (Berkane, 2011 ; BouazizeetDjehinet, 2020)

La pluviométrie de la wilaya est caractérisée par des valeurs croissantes avec l'altitude (Fig. I.6). Elle est élevée sur les monts de Texenna avec plus de 1200 mm/an, alors qu'au niveau des plaines les valeurs variant de 900 à 1000 mm/an (Berkane, 2011 ; BouazizeetDjehinet, 2020).

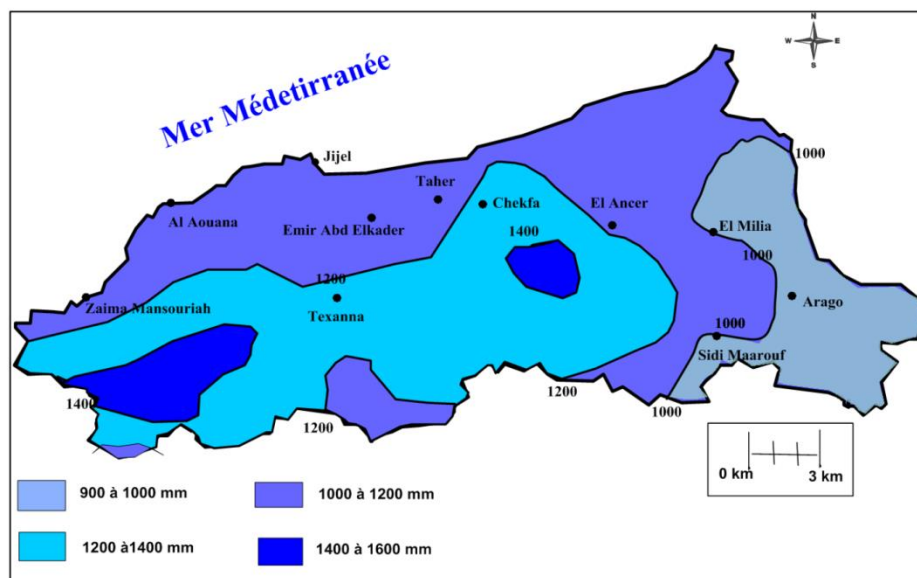


Figure I. 6 : Carte pluviométrique de la wilaya de Jijel (ANRH, 1993 in Sadoun, 2013). (Bouazize et Djehinet, 2020).

I.3.1. Caractéristiques climatiques :

L'analyse des paramètres climatiques s'appuie sur les données enregistrées par la station d'Achouat -Taher, la plus proche du périmètre étudié.

I.3.1.1. Précipitations :

On appelle hauteur de précipitations, la hauteur en mm du volume total des précipitations exprimées en eau, par unité de la surface collectrice et pour des durées variables (jour, mois, saisons ou années). Les précipitations sont un facteur fondamental pour caractériser le climat

d'une région. (BouazizeetDjehinet, 2020).

A) Variation des précipitations moyennes mensuelles interannuelles :

L'analyse de la courbe des variations des moyennes mensuelles des précipitations, enregistrées à la station d'Achouat -Taher sur une période de 75 ans (1950–2025), met en évidence une forte variabilité saisonnière. Le mois de Décembre apparaît comme le plus pluvieux, avec une moyenne de 163,76 mm, tandis que le mois de Juillet constitue le mois le plus sec, avec une moyenne de 5,34 mm (Tab 1, Fig. I.7).

Tableau I 1: Variation des précipitations moyennes mensuelles interannuelles à la station AchouatTaher(1950-2025).

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Août	Σann
P(mm)	61.09	102.89	150.60	163.76	153.37	124.71	114.50	96.79	63.02	22.82	5.34	15.43	1074.37

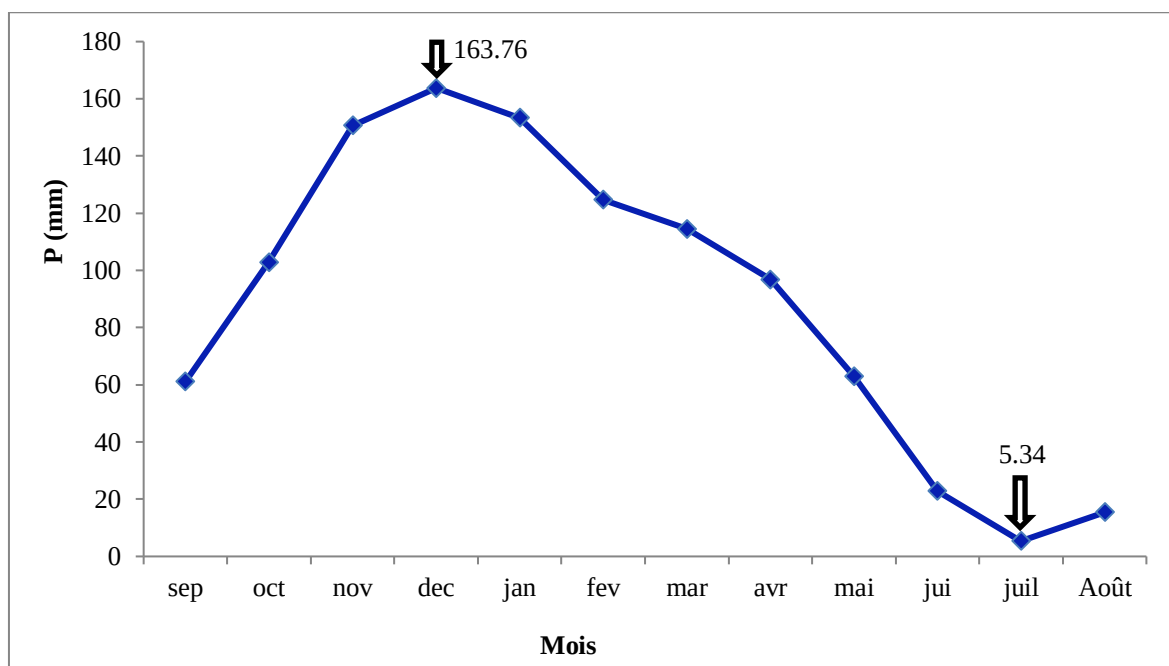


Figure I.7 : Variation des précipitations moyennes mensuelles interannuelles à la station d'AchouatTaher(1950-2025).

B) Variation des précipitations annuelles :

La variation des précipitations moyennes annuelles, mesurées à la station d'Achouet-Taher sur la période de 75 ans (1950-2025), est présentée dans la figure I.8.

L'analyse de la courbe montre que l'année 1972 est la plus arrosée avec 3656.41mm et l'année de 1961 est la plus sèche avec 2587.26mm.

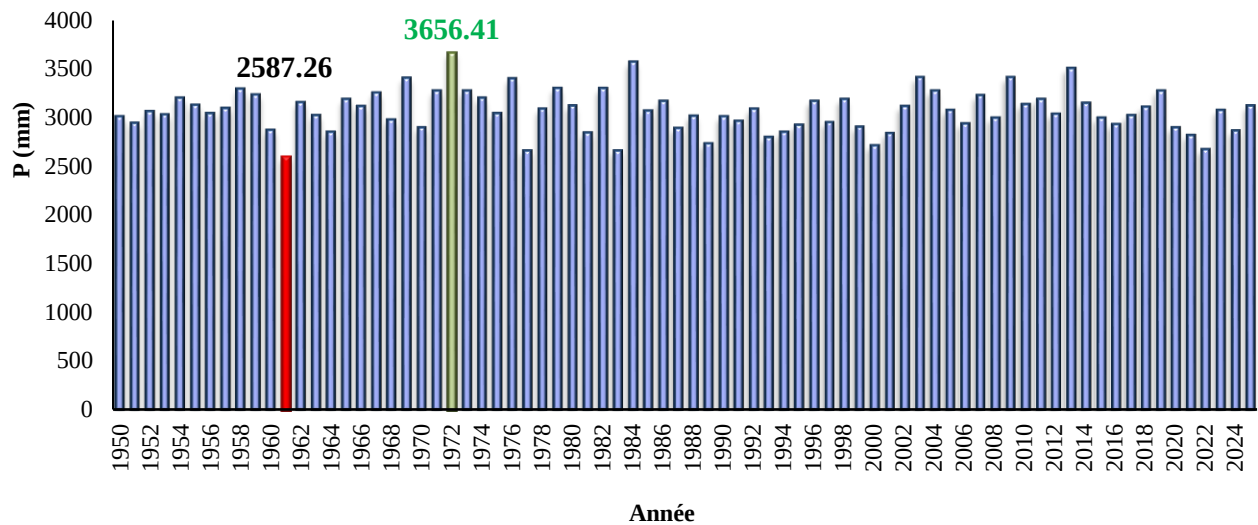


Figure I.8 : Variation des précipitations annuelles à la station Achouat-Taher (1950-2025).

I.3.1.2. La température :

La température représente un paramètre climatique essentiel, directement dépendant du rayonnement solaire. Ses fluctuations influencent les mécanismes d'évaporation de l'eau, aussi bien en surface qu'au niveau du sous-sol. Elle conditionne également l'intensité de l'évapotranspiration, ce qui peut entraîner une variation de la concentration en sels dissous et, par conséquent, du degré de salinité des eaux. (Bouazize et Djehinet, 2020)

En outre, la température constitue un élément clé dans l'évaluation du déficit d'écoulement et intervient de manière significative dans l'établissement du bilan hydrologique, en raison de son rôle dans les pertes hydriques par évaporation et évapotranspiration (Bouazize et Djehinet, 2020)

A- Températures moyennes mensuelles interannuelles :

A partir du tableau 2 et le graphique I.9 qui représentent les résultats des variations mensuelles des températures dans la station d'Achouat durant la période 1950-2025, on remarque que la valeur minimale enregistrée au mois de Janvier (11,22 °C) donc ce mois est le plus froid. Par contre le mois d'Aout la température augmente jusqu'à une valeur maximale de (25,85°C) donc c'est le mois le plus chaud.

Tableau I. 2 : Températures moyennes mensuelles interannuelles de la station d'Achouat-Taher (1950-2025).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jui	Aout	Moy
Tmax(°C)	26.01	23.05	18.25	15.34	13.49	14.26	16.16	16.95	20.52	25.28	29.01	28.75	17.94
Tmoy(°C)	23.26	19.60	15.37	12.38	11.22	11.53	13.10	14.99	18.06	21.82	25.14	25.85	15.18
Tmin(°C)	20.61	16.49	12.72	10.24	8.73	7.16	10.50	13.21	15.41	19.26	22.57	23.29	12.46

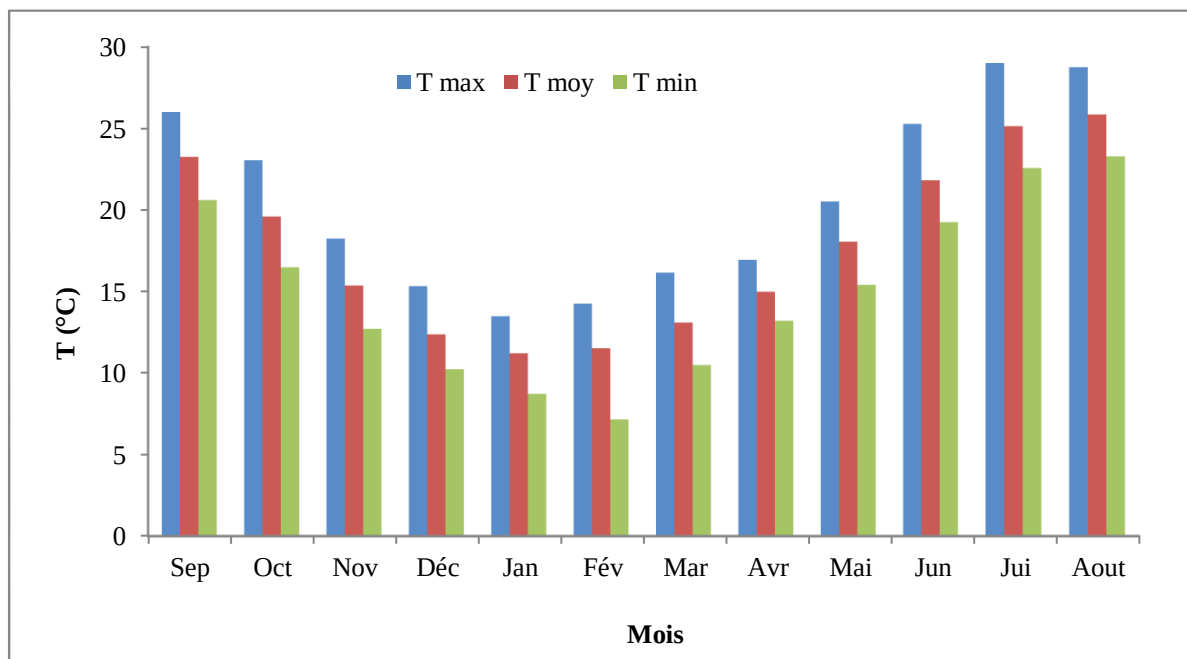


Figure I.9 : Températures moyennes mensuelles interannuelles à la station d'Achouat-Taher (1950- 2025).

I.3.2.Relation (Précipitations– Température) :

Pour établir cette relation, nous avons utilisé le diagramme ombrothermique selon la méthode d'Henri Gaussen et Louis Bagnouls. Ce diagramme repose sur le principe selon lequel les températures sont représentées à une échelle double de celle des précipitations, ce qui permet d'identifier les périodes sèches lorsque la moyenne mensuelle des précipitations (P) est inférieure ou égale au double de la température moyenne mensuelle (T), soit : $P < 2T$. (Bouaziz et Djehinet, 2020)

L'analyse du diagramme (Fig. I. 10) met en évidence l'existence de deux saisons contrastées :

- Une **saison humide**, qui s'étend de Septembre à la mi-Mai ;
- Une **saison sèche**, qui débute à la mi-Mai et se prolonge jusqu'à la fin du mois d'Août.

La saison sèche traduit un déficit pluviométrique, tandis que la saison humide se caractérise par un excédent en précipitations.

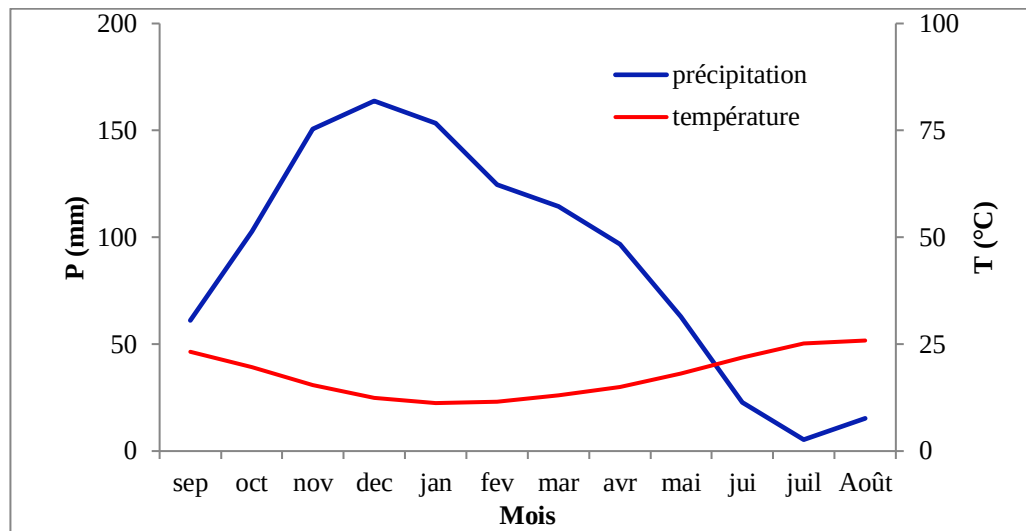


Figure I.10 : Diagramme Ombro-thermique de la station d'Achouat-Taher (1950-2025).

I.3.3.L'évapotranspiration :

Elle a pour but de quantifier les pertes en eau par retour à l'atmosphère sous forme de vapeur d'eau. Ces pertes peuvent représenter l'évapotranspiration des eaux de surface et du sous-sol et/ou la transpiration des végétaux. Il existe des formules d'approximation qui traduisent le phénomène sous forme analytique, parmi lesquelles la formule de C.W. Thornthwaite (1948). (BouazizeetDjehinet, 2020).

I.3.3.1. Calcul de l'évapotranspiration potentiel (ETP) :

L'évapotranspiration potentielle (ETP) correspond à l'évapotranspiration d'une surface qui serait suffisamment approvisionnée en eau pour évaporer la quantité d'eau maximale permise par les conditions climatiques. L'évapotranspiration potentielle selon C.W. Thornthwaite tient compte de l'indice thermique et de la température moyenne mensuelle. La formule de l'ETP est comme suit :

$$ETP = 16 [10T/I]^a$$

Avec :

ETP : Evapotranspiration potentiel non corrigé (mm).

T : Température moyenne mensuelle en (°C).

I : Indice thermique annuel : $I = \sum_{i=1}^{12} i$

i : indice thermique mensuel déterminé par l'expression : $i = (T/5)^{1.514}$.

a : exposant climatique calculé par la formule : $a = 1.6 \left(\frac{I}{100} \right) + 0.5$.

L'évapotranspiration corrigée est donnée par la relation suivante :

$$ETP_{corr} = 1.6 \left[\frac{10T}{I} \right]^a \cdot K$$

Avec :

K : coefficient de correction qui dépend du temps et de la latitude ;

Les résultats de calcul de l'ETP par la méthode C.W. Thornthwaite sont présentés dans le tableau I.3.

Tableau I.3 : Calcul de l'ETP par la formule de Thornthwaite à la station d'Achouat Taher (1950-2025)

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Ann
T(°C)	23.26	19.6	15.37	12.38	11.22	11.53	13.1	14.99	18.06	21.82	25.14	25.85	17.70
I	10.25	7.91	5.48	3.95	3.40	3.55	4.30	5.27	6.99	9.31	11.53	12.03	83.95
A	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	/
ETP	104.67	76.36	48.81	32.77	27.33	28.71	36.35	46.58	65.67	93.06	120.80	127.19	808.20
K	1.03	0.97	0.86	0.84	0.87	0.85	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16	/
ETPc	107.83	74.06	41.95	27.50	23.76	24.41	37.42	51.24	79.45	113.53	149.81	147.52	878.48

I.3.3.2. Evapotranspiration réelle (ETR) ou déficit d'écoulement (De):

L'ETR ou déficit d'écoulement (De) est la quantité d'eau évaporée par le sol, la végétation et les surfaces d'eau libre. D'après Thornthwaite, le bilan hydrique est établi à l'échelle mensuelle interannuelles est basé sur les données connues des précipitations (P) et de l'évapotranspiration potentielle (ETP), pour déterminer les variations des paramètres suivants (Bouazize et Djehinet. 2020)

- L'évapotranspiration réelle (ETR) ;
- La réserve en eau facilement utilisable (RFU) ;
- Le déficit agricole (Da) ; (Da = ETP – (P + RFU)) ;
- L'excédent (water surplus « Wa »).

Le principe de calcul est basé sur les cas suivants :

- Si $P > ETP \rightarrow ETR = ETR$, la quantité $(P - ETP)$ alimente la RFU jusqu'au maximum.
- Si $P < ETP \rightarrow ETR = P +$ une partie de la RFU jusqu'à égaliser la valeur de l'ETP.
- Si malgré l'apport de la RFU, l'ETR est toujours inférieure à l'ETP

($ETR < ETP$), il existe un déficit agricole : $Da = ETP - ETR$.

- Si $P = ETR$, les précipitations sont juste suffisantes pour alimenter le sol. Il n'y aura pas alimentation de la RFU.

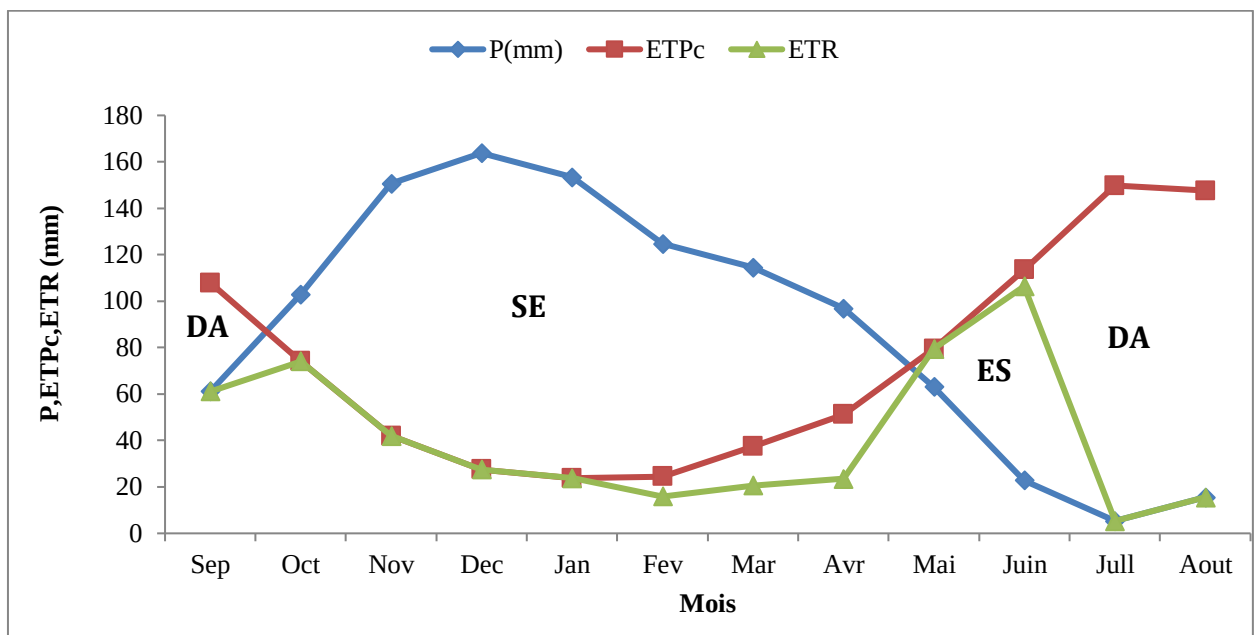
Le calcul du bilan commence par le mois de septembre où on considère que la RFU est nulle. Pour notre cas, on prend la RFU maximale égale à 100mm (Tab I.4).

Tableau I.4 : Le bilan hydrologique de la station d'Achouat-Taher(1950-2025).

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Jull	Aout	Année
P(mm)	61.09	102.89	150.6	163.76	153.37	124.71	114.5	96.79	63.03	22.82	5.34	15.43	1074.37
ETPc(mm)	107.83	74.06	41.95	27.50	23.76	24.41	37.42	51.24	79.45	113.53	149.81	147.52	878.48
ETR(mm)	61.09	74.06	41.95	27.50	23.76	24.41	37.42	51.24	79.45	106.39	5.34	15.43	547.88
RFU (mm)	0.00	28.83	79.83	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	83.41	0.00	0.00	0.00	/
Da (mm)	46.74	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.30	144.47	132.09	330.59
EX (mm)	0.00	0.00	0.00	173.74	129.61	108.77	77.08	45.55	0.16	0.00	0.00	0.00	534.92

Le bilan hydrologique pour une période de 75 ans (1950–2025) à la station d'AchouatTaher(Tableau 4, Fig. I.11) fait ressortir que :

- Les précipitations deviennent supérieures à l'évapotranspiration potentielle (ETP) du mois d'Octobre jusqu'au mois d'Avril.
- L'ETR atteint son maximum au mois de Juin avec une valeur de 106.39mm.
- La RFU est à son maximum de 100 mm du mois de Novembre jusqu'à la fin d'Avril, où on totalise un excédent de 543.67mm avec un pic au mois de Novembre (137.48mm).
- Par ailleurs, la RFU commence à diminuer au début du mois de Mai, pour s'épuiser et devenir nulle du mois de Juin jusqu'au mois de Septembre, avec un déficit agricole de l'ordre de 137.48mm.



ES:Epuisement du stock. SE:Surplus d'eau. DA:Déficit Agricole.

Figure I.11: Représentation graphique du bilan hydrologique à la station d'Achouat-Taher (1950-2025)

I.4.Contexte humain et socio-économique :

I.4. 1. Contexte humain et socio-économique :

Le territoire de la vallée de l'Oued El Nil se déploie administrativement sur plusieurs communes rattachées principalement aux daïras de Taher et de Chekfa. Ces entités administratives enregistrent une concentration humaine notable, comme en témoignent les données démographiques. La daïra de Taher, qui englobe une partie significative de la vallée, comptait 147 612 habitants en 2008, tandis que la daïra de Chekfa en recensait 56 447 à la même période.(ONS,2008)

Cette densité, particulièrement marquée dans la plaine alluviale de Taher avec plus de 400 habitants par kilomètre carré, exerce une pression considérable sur les ressources, notamment foncières. Depuis les années 2000, la région connaît un développement démographique important, entraînant une expansion urbaine rapide qui tend à empiéter sur les terres agricoles fertiles, un enjeu majeur pour l'équilibre du territoire.(Boufenara, 2015 ;Boussif, 2022)

I.4.2. Un dualisme économique : entre agriculture et industrie :

L'économie de la vallée de l'Oued El Nil est caractérisée par la coexistence d'un secteur agricole ancestral et d'un pôle industriel moderne en plein essor.

Grâce à la fertilité de ses sols et à une pluviométrie généreuse atteignant 1200 mm par an, possède

une vocation agricole par excellence. L'agriculture locale s'appuie sur l'irrigation à partir des eaux de l'Oued Nil, régulées par un réseau d'infrastructures hydrauliques comprenant des retenues collinaires et de petits barrages. Les productions principales incluent le maraîchage, avec une spécialisation dans la culture de la tomate industrielle, ainsi que l'arboriculture, notamment l'oléiculture.(Boufenara, 2015)

I.4.3. Enjeux et défis du développement :

Le développement rapide de la vallée de l'Oued El Nil soulève plusieurs défis. La gestion durable des ressources en eau est primordiale pour concilier les besoins de l'agriculture irriguée et l'alimentation en eau potable d'une population croissante. De plus, la protection de l'environnement, et en particulier de la nappe alluviale, contre les risques de pollution liés aux rejets urbains et industriels, représente un enjeu très important pour l'avenir de la région. Enfin, la maîtrise de l'urbanisation est indispensable pour préserver le potentiel agricole de la vallée et assurer un développement équilibré du territoire.(Boussif, 2022)

Conclusion :

La vallée de l'Oued El Nil est un territoire riche en eau (aquifère puissant, pluviométrie élevée) mais confronté à de fortes pressions humaines (densité de population élevée, agriculture intensive, industrie). L'évolution récente des écoulements souterrains montre la vulnérabilité de ses ressources. Ce chapitre a posé les bases nécessaires pour comprendre que l'eau, bien qu'abondante, constitue l'enjeu central pour concilier développement économique et préservation de l'environnement.

CHAPITRE 2 : Caractérisation et évolution temporelle de la qualité des eaux de surface d'Oued El Nil .

Introduction :

Les eaux de surface constituent une ressource vitale qui joue un rôle essentiel dans l'équilibre écologique et le développement socio-économique, mais elles restent extrêmement fragiles en raison de leur exposition directe aux pressions humaines et naturelles.

La vallée d'El Nil, constitue une ressource en eau de surface d'une importance capitale au niveau local. Elle alimente les nappes phréatiques, soutient les activités agricoles et constitue un pilier de la biodiversité et des écosystèmes aquatiques. La qualité de ses eaux dépend de caractéristiques physico-chimiques qui reflètent la santé de l'écosystème. Mais cette ressource vitale subit une dégradation croissante due à des pressions humaines (agriculture, expansion urbaine, déchets industriels) et environnementales (changements climatiques, sécheresse, inondations) de plus en plus intenses.

II.1 Méthodologie d'analyse des données compilées :

Dans le cadre de ce travail, nous disposons de plusieurs études hydrochimiques réalisées à différentes périodes, avec des protocoles ou des laboratoires différents. Ces données, bien que précieuses, ne sont pas immédiatement comparables. L'objectif de cette méthodologie est donc de transformer cette collection hétérogène d'informations en un jeu de données cohérent, fiable et interprétable.

Pour cela, nous allons suivre une démarche en plusieurs étapes :

- **Harmonisation** : d'abord, nous rendons les données comparables en uniformisant les unités, les noms de paramètres.
- **Analyse descriptive et classification des eaux** : nous déterminons le faciès chimique dominant des eaux à l'aide du diagramme de Piper, puis nous comparons la répartition relative des principaux ions (Ca, Mg, Na, K, Cl, SO₄, HCO₃) d'un échantillon à l'autre grâce au diagramme de Schoeller, ce qui permet de visualiser rapidement les similitudes ou différences entre eaux de différentes études.
- **Analyse des rapports ioniques** : pour comprendre l'origine géochimique des éléments (dissolution de carbonates, évaporites, altération des silicates, influence marine).
- **Évaluation de la qualité des eaux pour l'irrigation** : nous calculons le SAR (Sodium Adsorption Ratio, ou Rapport d'Absorption du Sodium) à partir des concentrations en Na, Ca et Mg. Ce paramètre permet d'évaluer le risque d'alcalinisation des sols. Nous croisons ensuite le SAR avec la conductivité électrique (CE) dans le diagramme de Wilcox afin de classer chaque échantillon dans une catégorie de qualité (excellente, bonne, permise, douteuse, inadéquate) pour l'irrigation.

L'objectif de cette méthodologie n'est pas de gommer les hétérogénéités entre les études anciennes,

mais de les reconnaître et de les prendre en compte dans l'analyse de la variation chimique ou de l'évolution temporelle de la qualité des eaux.

II.1.1. Localisation des sites de prélèvement des eaux :

Sur la base d'études antérieures portant sur la qualité des eaux de surface dans le bassin d'El Nil, six stations issues de l'étude de Boussif (avril 2022) et six stations issues de l'étude de Fennour (avril 2015) ont été sélectionnées, comme le montre la figure II.1

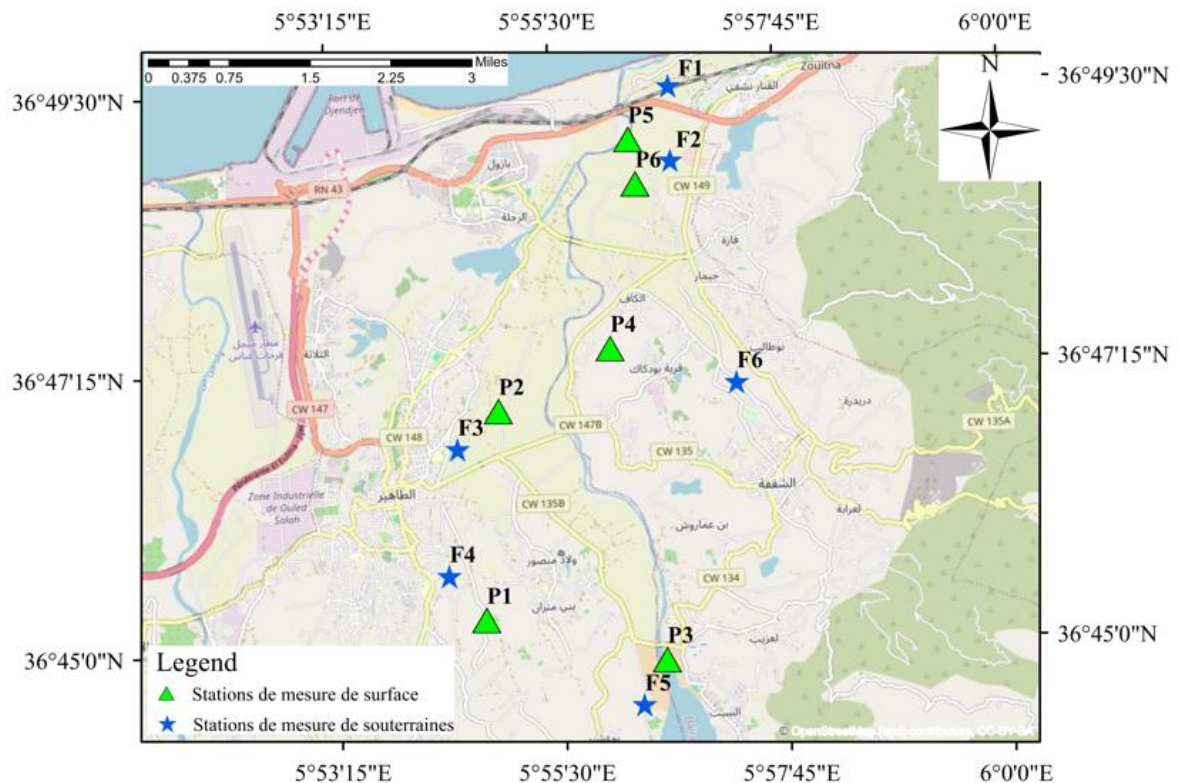


Figure II.1: Carte des station de la mesure des eaux de surface .

II.2 Les paramètres physiques :

II.2.1 La température (T°C) :

La température de l'eau joue un rôle important par exemple, en ce qui concerne la solubilité des sels et des gaz. Par ailleurs, la température accroît les vitesses des réactions chimiques et biochimiques et l'activité métabolique des organismes aquatiques. On doit absolument la mesurer sur le terrain, parce qu'elle tend à s'ajuster rapidement à la température ambiante (De viller et al, 2005).

L'analyse comparative des températures des eaux de surface de l'Oued El Nil entre Avril 2015 et Avril 2022 révèle un refroidissement généralisé sur 5 des 6 stations, avec des baisses de 3,5 °C (P5) à 9 °C (P1). Les refroidissements les plus marqués concernent P1 (24,0 → 15,0 °C) et P6 (22,5 → 16,5 °C) (Fig. II.2). Cette tendance s'explique par des précipitations abondantes (plus 1

200 mm/an), une recharge hydrique soutenue et les échanges entre la nappe, les oueds et les zones humides (El Kennar, Redjla). Par ailleurs, la température climatique annuelle moyenne (station d'Achouat-Taher) a baissé de 1 °C entre 2015 et 2022 (16,22 → 15,22 °C), contribuant ainsi au refroidissement des eaux. À l'inverse, la station P4 fait exception avec une hausse de 2,5 °C (18,5 → 21,8 °C), cette anomalie locale pourrait résulter d'un apport d'eaux plus chaudes, d'une faible profondeur, d'une réduction de l'ombrage ou d'une influence anthropique ponctuelle. Hormis ce cas isolé, la cohérence des baisses atteste d'un refroidissement significatif du cours d'eau sur la période étudiée.

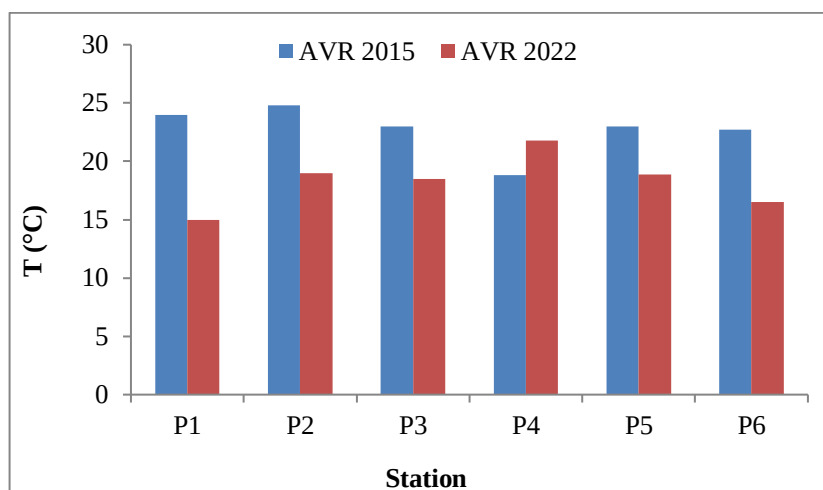


Figure II.2 :Évolution temporelle de la température des eaux de surface d'Oued El Nil.

II.2.2.Le potentiel hydrogène (pH) :

Il caractérise l'acidité ou la basicité d'une eau (ou d'une solution) et par conséquent sa concentration en ions (H^+), c'est-à-dire, si celle-ci est agressive, corrosive ou entartrent. Ce caractère lui est conféré en fonction de sa teneur en ions issus du milieu naturel, des rejets urbains et industriels ou du lessivage des terres agricoles (Boussif ,2022).

Entre avril 2015 et avril 2022, les valeurs de pH, globalement proches de la neutralité en première campagne (7,4 à 9,1), montrent des évolutions contrastées. La stabilité de la station P4 (7,8 → 7,8) atteste d'un équilibre hydrochimique localement préservé, probablement dû à un pouvoir tampon efficace. À l'opposé, la hausse spectaculaire enregistrée à P3 (7,4 → 9,2) traduit une alcalinisation marquée, attribuable à une activité photosynthétique intense (développement algal) ou au lessivage des formations calcaires (cipolins, calcaires oligo-miocènes) qui affleurent dans le bassin versant. En revanche, les légères baisses de pH observées à P1 et P2 (respectivement -0,4 et -0,6) pourraient résulter d'une reminéralisation des matières organiques ou d'apports acides ponctuels, liés à la nitrification des engrais azotés ou à des rejets industriels. Cette divergence des comportements témoigne d'une fragilisation du système hydrochimique, soumis à des pressions anthropiques croissantes (Fig. II.3).

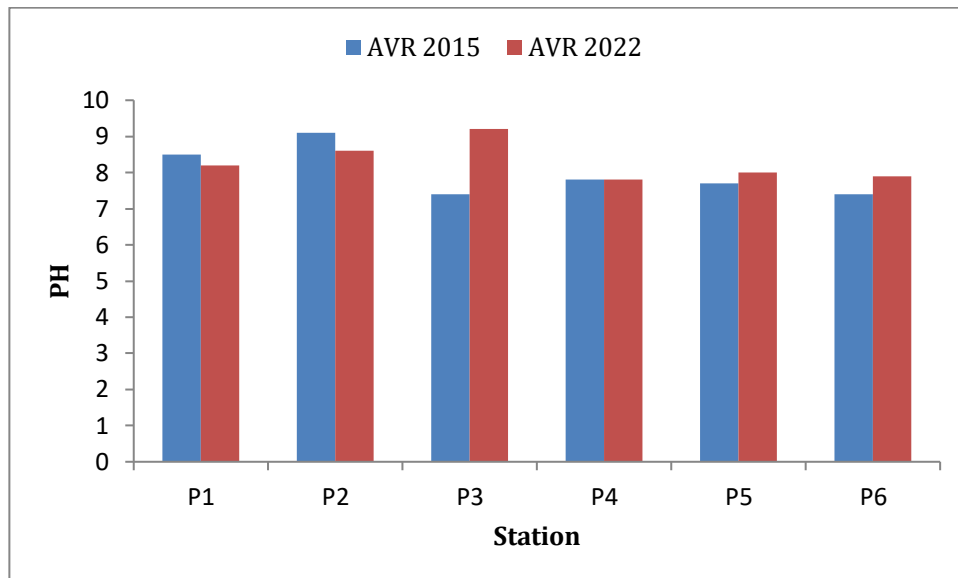


Figure II.3 :Évolution temporelle du pH des eaux de surface d'Oued El Nil.

II.2.3 La conductivité électrique (CE) :

Définie comme étant l'aptitude d'une eau à se laisser traverser, plus ou moins vite, par un courant électrique. Elle est directement proportionnelle à la teneur en sels dissous d'une eau et dont les valeurs représentatives sont prises à de températures 25 °C et exprimées en $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Elie, 2005).

La conductivité électrique augmente très nettement entre 2015 et 2022 sur l'ensemble des stations (Fig.II.4), avec des valeurs souvent multipliées par deux ou trois. À titre d'exemple, la CE de P1 passe de 260 à 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$, celle de P2 de 285 à 650 $\mu\text{S}/\text{cm}$, P3 de 225 à 450 $\mu\text{S}/\text{cm}$, P4 de 250 à 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, P5 de 310 à 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et P6 de 266 à 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Cette hausse traduit une minéralisation croissante des eaux, c'est-à-dire une augmentation de la concentration en sels dissous. Ce phénomène peut s'expliquer par une intensification des lessivages des sols agricoles (fertilisants), par des rejets industriels (zone industrielle en développement). L'aquifère alluvial, bien que très productif, semble donc subir une pression anthropique croissante, comme évoqué dans le chapitre 1.

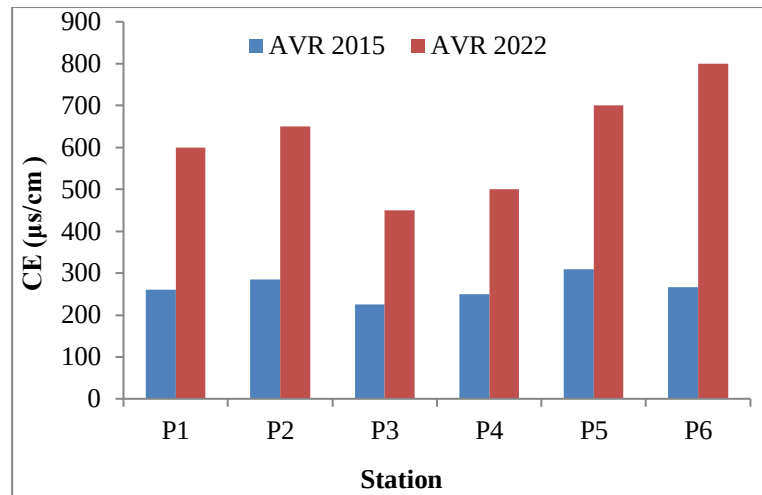
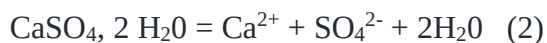
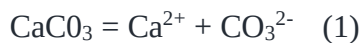


Figure II.4 : Évolution de la conductivité électrique des eaux de surface d'Oued El Nil.

II.3 Les paramètres chimiques « éléments majeurs » :

II.3.1 Le Calcium (Ca^{+2}) :

Est un élément très fréquent dans les roches sédimentaires, sa présence dans l'eau est liée principalement à deux origines naturelles : soit la dissolution des formations carbonatées (CaCO_3)(Eq 1), soit la dissolution des formations gypseuses (CaSO_4)(Eq 2), (Rodier, 2009).



La teneur en calcium augmente très fortement entre 2015 et 2022 sur l'ensemble des stations, avec des valeurs parfois doublées, voire triplées. P1 passe de 31 à 69 mg/l, P2 de 25 à 89 mg/l, P3 de 19 à 54,5 mg/l, P4 de 38 à 66 mg/l, P5 de 39 à 78 mg/l et P6 de 52 à 98 mg/l. Cette hausse généralisée traduit une minéralisation carbonatée croissante, liée au lessivage des formations calcaires et des cipolins présents dans le bassin versant, favorisé par les précipitations abondantes et le ruissellement (Fig. II.5).

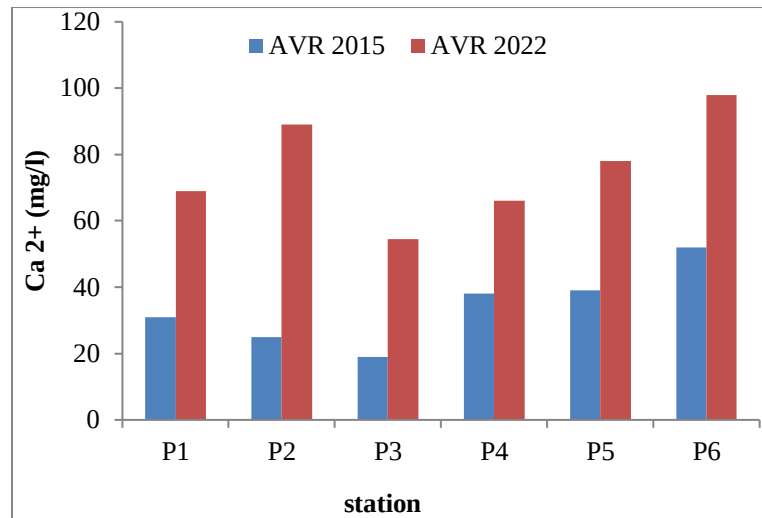
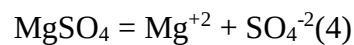
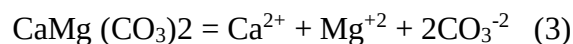


Figure II.5 : Evolution temporelle de Ca^{2+} des eaux de surface d'Oued El Nil.

II.3.2 Le Magnésium (Mg^{+2}) :

Le magnésium est moins abondant que le calcium et provient de la dissolution des formations carbonatées à fortes teneurs en magnésium (dolomite (Eq 3) et magnésite (Eq 4) selon les formules suivantes (Later et Terki, 1998) :



Entre 2015 et 2022, les concentrations en magnésium ont globalement diminué dans la plupart des stations, à l'exception de légères hausses à P4 et P5 (Fig. II6). Les baisses les plus marquées sont observées à P3 (58 → 13 mg/L, soit -78 %) et P2 (36 → 18 mg/L, soit -50 %). P1 et P6 enregistrent des diminutions modérées (respectivement -1 et -4,5 mg/L), tandis que P4 (20 → 22,5 mg/L) et P5 (38 → 40 mg/L) progressent très faiblement. Cette tendance générale à la baisse, qui contraste avec l'augmentation du calcium et de la conductivité électrique, suggère une modification de l'équilibre calco-carbonique. Elle peut s'expliquer par la présence de lentilles argileuses et de formations marneuses qui piègent ou relâchent sélectivement le magnésium, ainsi que par les échanges complexes entre la nappe, les oueds et les marécages. Cette diminution est probablement liée à la précipitation de carbonates de type dolomitique. Seules P4 et P5 présentent des apports locaux ponctuels, attribuables aux engrais ou au lessivage de sols magnésiens.

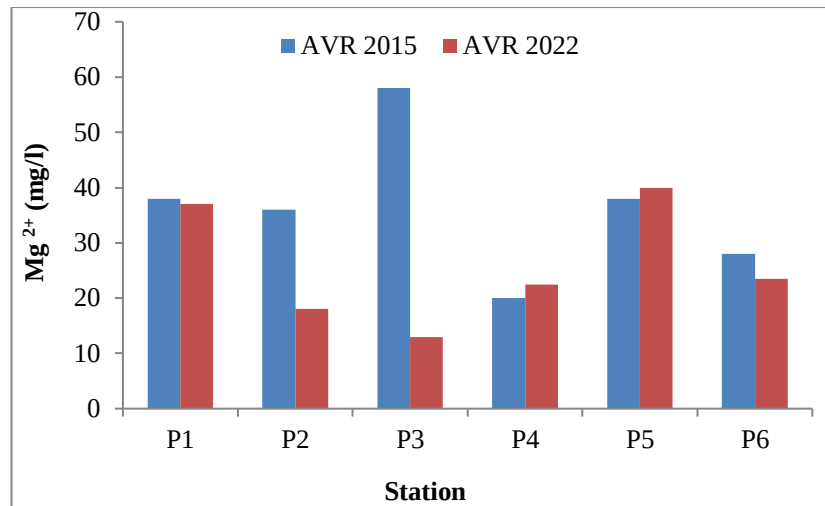
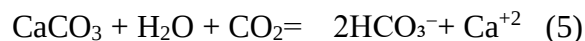


Figure II.6 : Evolution temporelle de Mg^{+2} des eaux de surface d'Oued El Nil.

II.3.3 Les Bicarbonates (HCO_3^-) :

Les bicarbonates résultent de la dissolution des formations carbonatées (Cipolins, calcaires) par des eaux chargées en gaz carbonique. La somme des équations de dissolution est donnée comme suit (Eq 5) (Rodier, 2009) :



Les bicarbonates présentent une tendance variable entre 2015 et 2022 (Fig. II.7), les concentrations en bicarbonates ont diminué dans la plupart des stations (P1 à P4), avec des baisses allant de 8 à 45 mg/L, traduisant une perturbation de l'équilibre calco-carbonique probablement liée à la précipitation du carbonate de calcium (en rapport avec l'augmentation du calcium). En revanche, les stations aval P5 et P6 ont enregistré des hausses nettes (respectivement +10,5 et +37,6 mg/L), suggèrent une alcalinisation locale, possiblement en lien avec des apports d'eaux souterraines chargées en bicarbonates drainant les formations calcaires en amont.

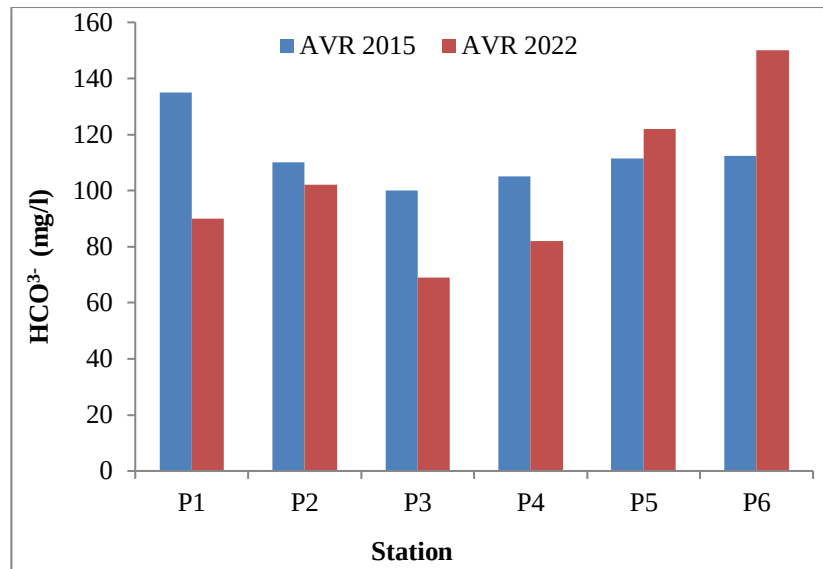


Figure II.7 : Evolution temporelle du HCO_3^- des eaux de surface d'Oued El Nil.

II.3.4 Le sodium (Na^+) :

Le sodium est un élément dont la concentration dans l'eau varie d'une région à une autre. Son origine peut être naturelle (mer, terrain salé). Les eaux très riches en sodium deviennent saumâtres, prennent un goût désagréable et ne peuvent pas être consommées (Rodier et al, 2005).

Entre avril 2015 et avril 2022, les concentrations en sodium (Na^+) ont augmenté dans toutes les stations, avec des évolutions très variables (Fig. II.8). Les hausses les plus modérées sont observées à P2 (25 → 30 mg/L, +5), P3 (12 → 14 mg/L, +2) et P1 (20 → 29 mg/L, +9). P4 enregistre une hausse nette de 11,3 à 20 mg/L (+8,7). Les augmentations les plus spectaculaires concernent les stations aval P5 (16,6 → 48 mg/L, +31,4) et P6 (20 → 50 mg/L, +30), où la concentration a presque triplé. Cette élévation généralisée, particulièrement marquée à l'aval, traduit une contamination croissante par des sources anthropiques : lessivage des engrais agricoles (notamment le nitrate de sodium), rejets d'eaux usées domestiques (détergents, adoucissants). L'augmentation du sodium accompagne celle de la conductivité électrique, des chlorures et du potassium, confirmant une dégradation progressive de la qualité des eaux de surface de l'Oued El Nil entre 2015 et 2022.

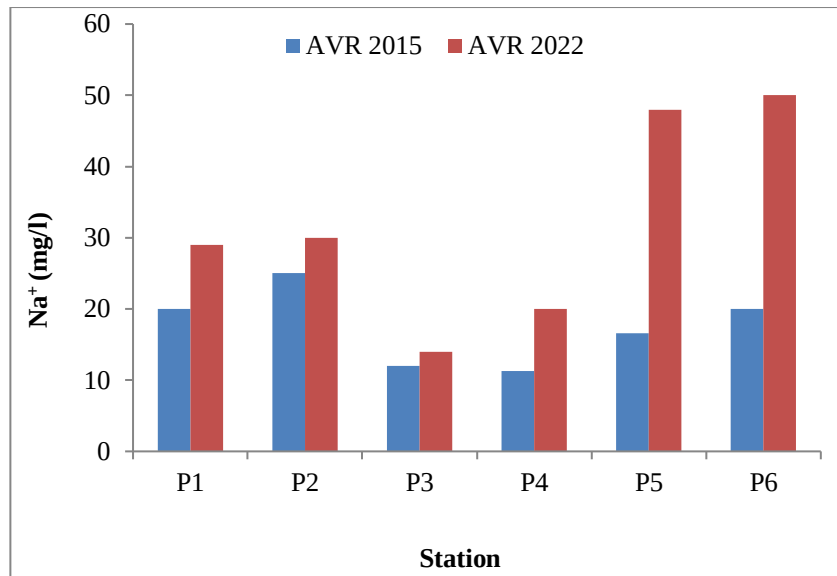


Figure II.8 : Evolution temporelle Na^+ des eaux de surface d'Oued El Nil.

II.3.5 Le potassium (K^+) :

Le potassium résulte de l'altération des certaines argiles et de la dissolution des engrais chimiques (NPK) qui sont utilisés massivement par les agriculteurs. La présence de cet élément peut être également liée au déversement des eaux usées domestiques, et sa teneur naturelle ne dépasse pas habituellement 10 à 15 mg/l. (Boussif, 2022)

Entre avril 2015 et avril 2022, les concentrations en potassium (K^+) ont augmenté dans la plupart des stations, avec des hausses notables (Fig. II.9) : P1 (3,0 → 5,7 mg/L, +2,7), P2 (2,5 → 3,9 mg/L, +1,4), P3 (2,8 → 6,2 mg/L, +3,4) et P4 (1,9 → 5,5 mg/L, +3,6). À l'inverse, les stations aval P5 et P6 ont enregistré une baisse significative, passant respectivement de 2,3 à 1,1 mg/L (-1,2) et de 2,5 à 1,2 mg/L (-1,3). Cette augmentation généralisée dans l'amont et le centre du bassin reflète principalement l'influence des activités agricoles (utilisation d'engrais potassiques, KCl) et des rejets domestiques (eaux usées riches en potassium). En revanche, les baisses enregistrées à P5 et P6 pourraient résulter d'une assimilation biologique accrue par les végétaux ou de conditions locales de dilution. Cette hétérogénéité spatiale reflète la complexité des processus hydrochimiques dans la plaine alluviale.

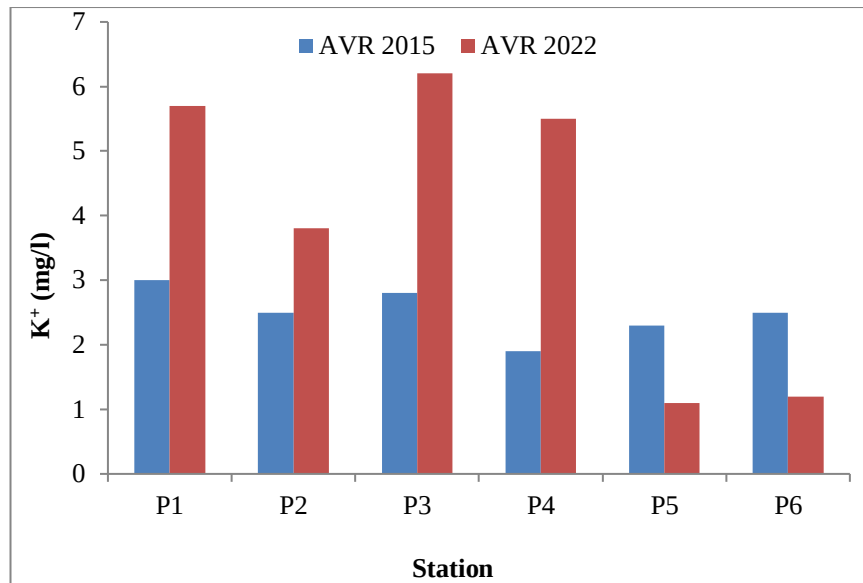


Figure II.9 : Evolution temporelle K^+ des eaux de surface d'Oued El Nil.

II.3.6 Les chlorures (Cl^-) :

Les chlorures sont des anions inorganiques importants contenus en concentrations variables dans les eaux naturelles, généralement sous forme de sels de sodium ($NaCl$) et de potassium (KCl). Ils sont souvent utilisés comme un indice de pollution. Ils ont une influence sur la croissance des végétaux. (Fennour, 2020)

Entre 2015 et 2022, les teneurs en chlorures ont augmenté dans toutes les stations, avec des hausses allant de 12 à 38 mg/L, soit

du double. Cette progression généralisée reflète une salinisation croissante liée aux apports agricoles (engrais potassiques), domestiques (eaux usées) et industriels. L'augmentation des chlorures, cohérente avec celle de la conductivité électrique et du sodium, confirme une dégradation marquée de la qualité des eaux de surface de l'Oued El Nil (Fig. II.10)

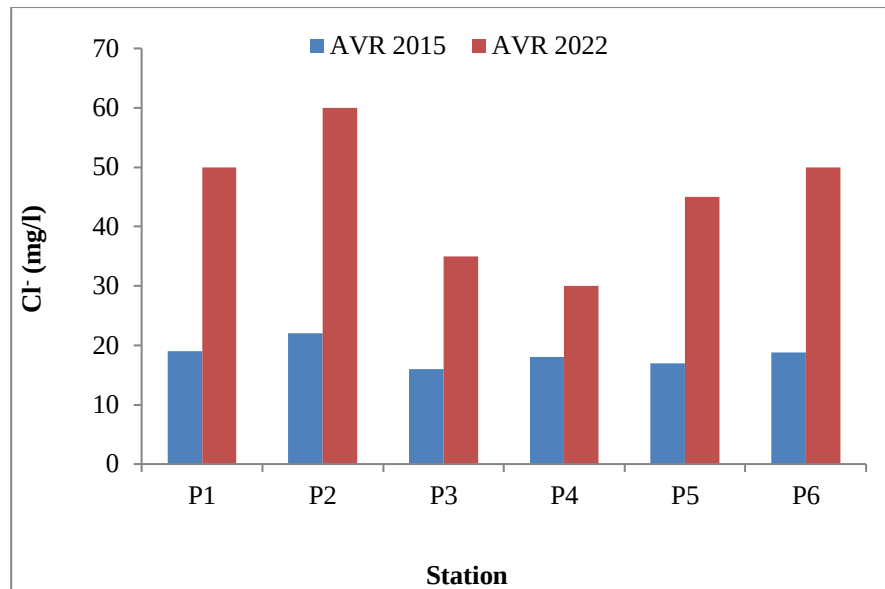
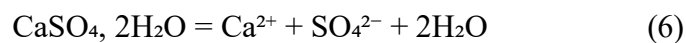


Figure II.10 : Evolution temporelle du Cl⁻ des eaux de surface d'Oued El Nil.

II.3.7 Sulfate (SO₄²⁻) :

On trouve du sulfate dans presque toutes les eaux naturelles. Il provient La plupart des composés sulfatés proviennent de l'oxydation des minéraux sulfatés, et sont liés à l'eau de pluie (évaporation de l'eau de mer) et à la dissolution des roches sédimentaires évaporitiques, en particulier les formations gypseuses, selon l'équation suivante(Eq 6)(Boussif .2022):



Les sulfates enregistrent une hausse très marquée sur l'ensemble des stations entre 2015 et 2022 (Fig. II.11). P1 passe de 15 à 55 mg/l, P2 de 15,5 à 50 mg/l, P3 de 16 à 45 mg/l, P4 de 15,6 à 50 mg/l, P5 de 16,8 à 55 mg/l et P6 de 17 à 70 mg/l. La hausse la plus spectaculaire concerne P6 (+53 mg/l). Cette augmentation généralisée, associée à celle des chlorures, est typique d'une contamination par les engrais (sulfates d'ammonium, de potassium), les détergents ou les rejets industriels, confirmant la vulnérabilité croissante des ressources en eau de la vallée face aux pressions anthropiques.

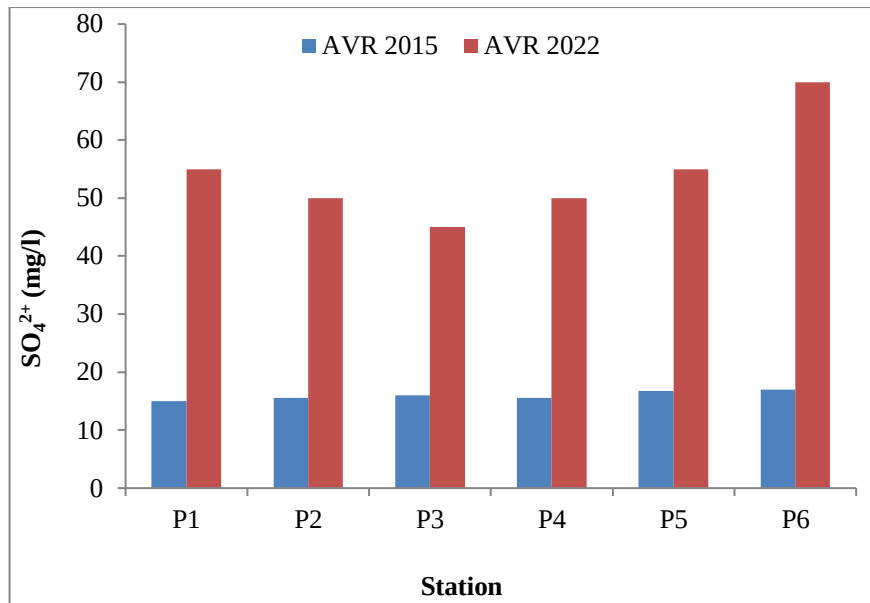


Figure II.11 : Evolution temporelle SO_4^{2+} des eaux de surface d'Oued El Nil.

II.4 Rapports caractéristiques :

Un rapport ionique est le quotient entre les concentrations de deux ions, exprimées en milliéquivalents par litre (még/l), et son intérêt réside dans la possibilité de déterminer l'origine des éléments chimiques (naturelle ou anthropique), de comprendre les processus hydrochimiques qui contrôlent l'évolution des eaux, et de vérifier la cohérence des analyses à travers le bilan ionique.

II.4.1 Le rapport Na/Cl :

Le rapport Na/Cl (en équivalents meq/L, Fig. II.12) permet de distinguer l'origine de la salinisation. Les points situés au-dessus de la pente 1/1 ($\text{Na/Cl} > 1$) indiquent un excès de sodium par rapport aux chlorures, caractéristique des échanges cationiques sur les argiles ou des apports d'eaux usées riches en détergents. Les points situés en dessous de la droite ($\text{Na/Cl} < 1$) traduisent un excès de chlorures, typique de l'utilisation d'engrais potassiques (KCl). On observe aussi une large dispersion autour de la droite 1/1 : plusieurs points s'en éloignent nettement au-dessus (Na très dominant), tandis que d'autres passent en dessous, notamment pour les plus fortes teneurs en chlorures. Cette répartition confirme la coexistence de deux sources anthropiques majeures : les rejets domestiques/industriels (excès de Na) et les lessivages agricoles (excès de Cl).

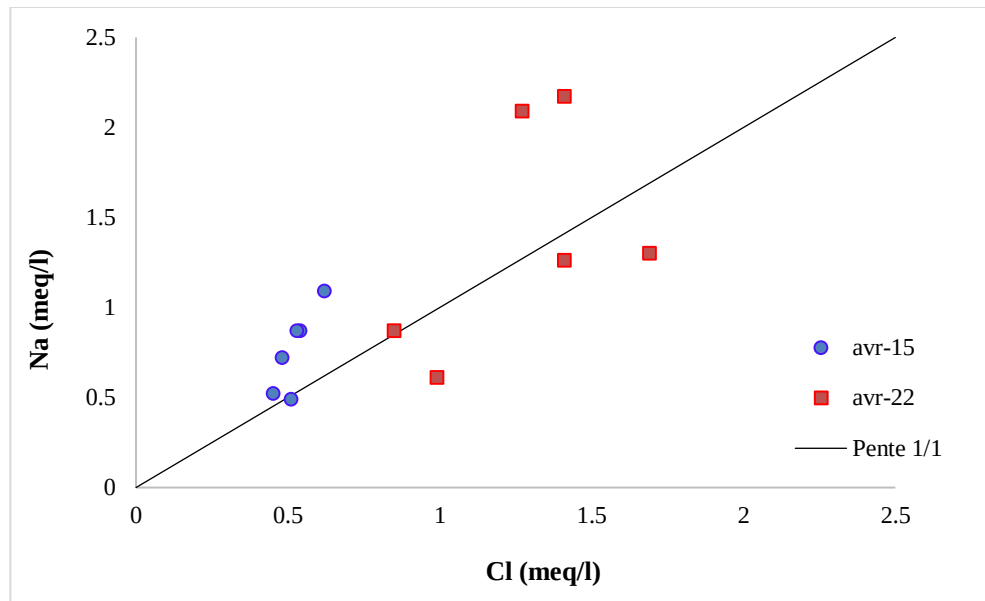


Figure II.12 : Rapport ionique $r_{Na/rCl}$.

II.5.2 Le rapport Ca/Mg :

La figure II.13 représente le rapport Ca^{2+}/Mg^{2+} , révèle un basculement net entre deux populations d'échantillons. Les premiers points se situent en dessous de la droite 1/1, traduisant une dominance magnésienne ($Mg > Ca$) typique des eaux issues de l'altération des marnes et dolomies. En revanche, les autres échantillons se positionnent nettement au-dessus de la droite 1/1, indiquant une inversion complète avec une dominance calcique ($Ca > Mg$), avec des rapports Ca/Mg atteignant 2,81. Ce passage de part et d'autre confirme une modification profonde de l'équilibre calco-carbonique, expliquée par la précipitation sélective de la dolomite ($CaMg(CO_3)_2$) en milieu alcalin, qui consomme du magnésium tandis que le calcium reste en solution. Plus les points s'éloignent au-dessus de la droite, plus l'évolution hydrochimique est avancée.

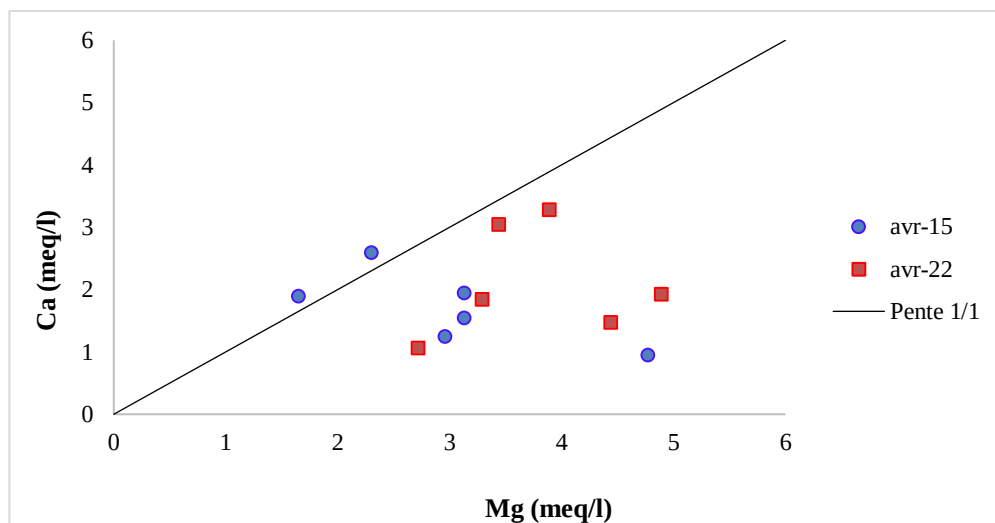


Figure II.13: Rapport ionique $r_{Ca/rMg}$.

II.5.3 Le rapport $(Ca+Mg)/(HCO_3+SO_4)$:

Ce rapport permet d'évaluer l'équilibre entre les cations alcalino-terreux et les anions carbonatés et sulfatés (Fig. II.14). Pour les deux campagnes (Avr 2015, Avr 2022), la plupart des points se situent au-dessus de la pente 1/1, indiquant un excès de $(Ca+Mg)$ par rapport à (HCO_3+SO_4) , traduisant une augmentation relative d'une minéralisation supplémentaire d'origine anthropique. Cet excès cationique s'explique également par la dissolution des formations calcaires (cipolins) et des roches métamorphiques, qui libèrent naturellement du calcium et du magnésium dans les eaux de surface.

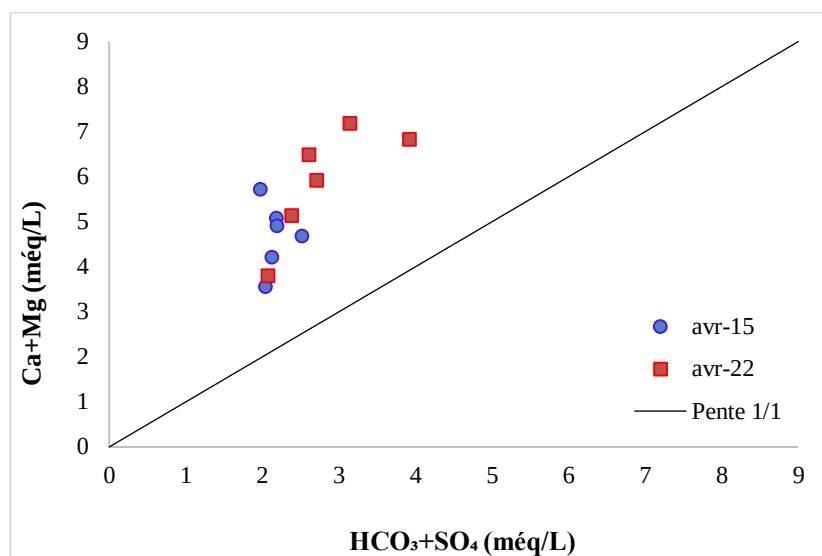


Figure II.14 : Rapport ionique $r(Ca+Mg)/r(HCO_3+SO_4)$.

II.6 Classification des eaux « Faciès chimique » :

II.6.1 Diagramme de Piper :

Afin de connaître la nature hydrogéochimique des eaux de la plaine alluviale d'Oued El Nil, les données recueillies, elles sont reportées sur le diagramme tri-linéaire de Piper (Piper, 1944) pour déduire les faciès hydrogéochimiques et comparer les compositions chimiques des eaux naturelles et cela grâce au logiciel Diagrammes, développé par le laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon. Ce type de diagramme permet d'une représentation des cations et anions sur deux triangles spécifiques dont les côtés témoignent des teneurs relatives de chacun des ions majeurs par rapport au total des ions. La position relative d'un résultat analytique sur chacun de ces triangles permet de préciser en premier lieu la dominance cationique et anionique. A ces deux triangles, est associé un losange sur lequel est reportée l'intersection des deux lignes issues des points identifiés sur

chaque triangle. Ce point d'intersection représente l'analyse globale de l'échantillon. Cette position permet de préciser le faciès de l'eau naturelle concernée (Fig. II.15).

Campagne Avril 2015

- Faciès bicarbonaté magnésien (Mg-HCO_3) – (66 %)

Dans le diagramme de Piper, les échantillons d'avril 2015 se projettent tous dans la partie gauche, caractéristique des eaux à dominante bicarbonatée. Les bicarbonates représentent entre 70 % et 85 % des équivalents anioniques. Quatre stations (P1, P2, P3 et P5) répondent strictement aux critères du faciès bicarbonaté magnésien, à savoir HCO_3^- supérieur à 50 % des anions et Mg^{2+} supérieur à Ca^{2+} . Ce faciès est attribué à l'altération naturelle des roches dolomitiques ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) et des formations métamorphiques magnésiennes (schistes, micaschistes, granulites) du nord du bassin. Il s'agit du faciès naturel des eaux avant les fortes pressions anthropiques.

- Faciès non classé – (33%)

Les stations P4 et P6, bien que présentant une dominance des bicarbonates, ne répondent pas strictement aux critères du faciès bicarbonaté magnésien car Ca^{2+} y est légèrement supérieur ou égal à Mg^{2+} . Elles ne répondent pas non plus aux critères du faciès bicarbonaté calcique (car la dominance de Ca^{2+} sur Mg^{2+} n'est pas nette et le cas reste isolé). Ces deux échantillons ne sont donc classés dans aucun faciès de la typologie proposée.

Campagne d'avril 2022

- Faciès mixte $\text{Ca-(HCO}_3 - \text{Cl} - \text{SO}_4)$ - 100%

Au niveau des anions, on observe une association $\text{HCO}_3^- + \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$ sans dominance nette d'un seul. Au niveau des cations, on note une dominance du calcium (Ca^{2+}) sur le magnésium (Mg^{2+}) et sur la somme sodium+potassium ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$). La position dans le losange correspond à une zone bicarbonatée-chlorurée-sulfatée calcique. Le losange traduit une anthropisation généralisée.

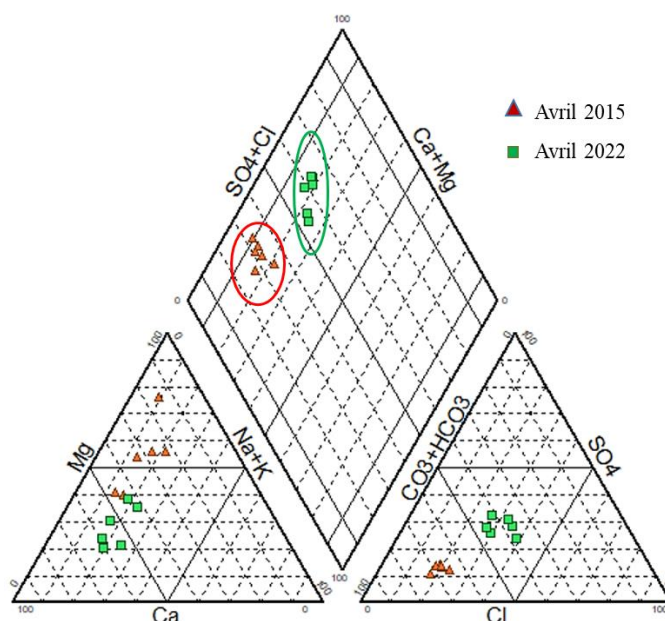


Figure II.15 : Diagramme de Piper des eaux de surface d'Oued El Nil.

II.6.2 Diagramme de Schoeller-Berkaloff :

Le diagramme de Schoeller (également appelé diagramme semi-logarithmique de Schoeller-Berkaloff) est un outil graphique utilisé en hydrochimie pour représenter et comparer la composition chimique des eaux naturelles (superficielles ou souterraines). Il permet de visualiser rapidement la minéralisation globale d'une eau ainsi que les concentrations relatives des ions majeurs.

Contrairement au diagramme de Piper (qui classe les eaux en faciès), le diagramme de Schoeller est particulièrement adapté pour comparer plusieurs échantillons entre eux et pour mettre en évidence des similitudes ou des différences de composition chimique.

Compagne Avril 2015

L'observation des six courbes (Fig. II.16) révèle une très grande similitude de forme, témoignant d'une composition chimique homogène de l'ensemble des eaux de surface en 2015. Les caractéristiques communes sont :

- Faciès bicarbonaté magnésien (Mg-HCO_3) – (66%)

Ce faciès dominant se caractérise par une prépondérance des bicarbonates (>70 % des anions) et une dominance du magnésium sur le calcium ($\text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$). Les concentrations varient entre 100 et 135 mg/L pour HCO_3^- et entre 28 et 58 mg/L pour Mg^{2+} . Son origine géochimique est liée à l'altération des roches dolomitiques ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) et des formations métamorphiques magnésiennes (schistes, micaschistes) qui affleurent largement dans le bassin versant. Les très

faibles teneurs en chlorures (16 à 22 mg/L) et en sulfates (15 à 17 mg/L) confirment l'absence de contamination anthropique. Ce faciès témoigne ainsi d'un système hydrochimique naturel préservé en 2015.

- Faciès bicarbonaté calcique (Ca-HCO_3) – (33 %)

Ce faciès, observé aux stations P4 et P6, se caractérise par une dominance des bicarbonates (>70 % des anions) et une inversion de la dominance cationique avec $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$. À P4, le calcium atteint 38 mg/L contre 20 mg/L pour le magnésium ; à P6, le calcium atteint 52 mg/L contre 28 mg/L pour le magnésium. Son origine géochimique est attribuable à la dissolution des calcaires purs (cipolins) présents localement dans le bassin versant, selon la réaction $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2 \text{HCO}_3^-$. Les teneurs en bicarbonates varient entre 105 et 112 mg/L. Comme pour le faciès dominant, les faibles teneurs en chlorures (18,8 mg/L) et en sulfates (15,6 à 17 mg/L) confirment le caractère naturel et non perturbé de ces eaux en 2015.

Compagne Avril 2022

Le diagramme de Schoeller des six stations prélevées en avril 2022 (P1 à P6) (Fig. II.16) montre une nette évolution par rapport aux profils typiquement bicarbonatés observés en 2015. Les courbes des différents points de prélèvement ne sont plus superposées mais présentent une certaine dispersion, témoignant d'une hétérogénéité chimique accrue. Cependant, des tendances communes se dégagent :

- Faciès mixte $\text{Ca-(HCO}_3 - \text{Cl} - \text{SO}_4)$

Les eaux de surface de l'Oued Nil présentent toutes un faciès chimique de type mixte, ce faciès se caractérise d'une part par une dominance du calcium (Ca^{2+}) parmi les cations, avec des concentrations comprises entre 54,5 et 98 mg/L, systématiquement supérieures à celles du magnésium (13 à 40 mg/L) et du sodium+potassium (14,6 à 51,2 mg/L). D'autre part, les anions se partagent de manière équilibrée : les bicarbonates (HCO_3^-) varient entre 69 et 150 mg/L, les chlorures (Cl^-) entre 30 et 60 mg/L, et les sulfates (SO_4^{2-}) entre 45 et 70 mg/L. Aucun anion ne domine nettement. Cette composition chimique traduit une minéralisation prononcée des eaux d'origine anthropique. L'enrichissement en chlorures et sulfates est directement lié à l'utilisation intensive d'engrais potassiques (KCl) et sulfatés (K_2SO_4 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) dans les zones agricoles, tandis que les rejets domestiques et industriels contribuent à l'élévation du sodium et des chlorures. La dominance calcique s'explique par les apports d'engrais calciques et la dissolution des formations carbonatées du bassin. Ce faciès mixte calcique, observé sur l'ensemble du cours d'eau, reflète une dégradation généralisée de la qualité des eaux sous l'effet conjugué de l'agriculture intensive et de l'urbanisation croissante.

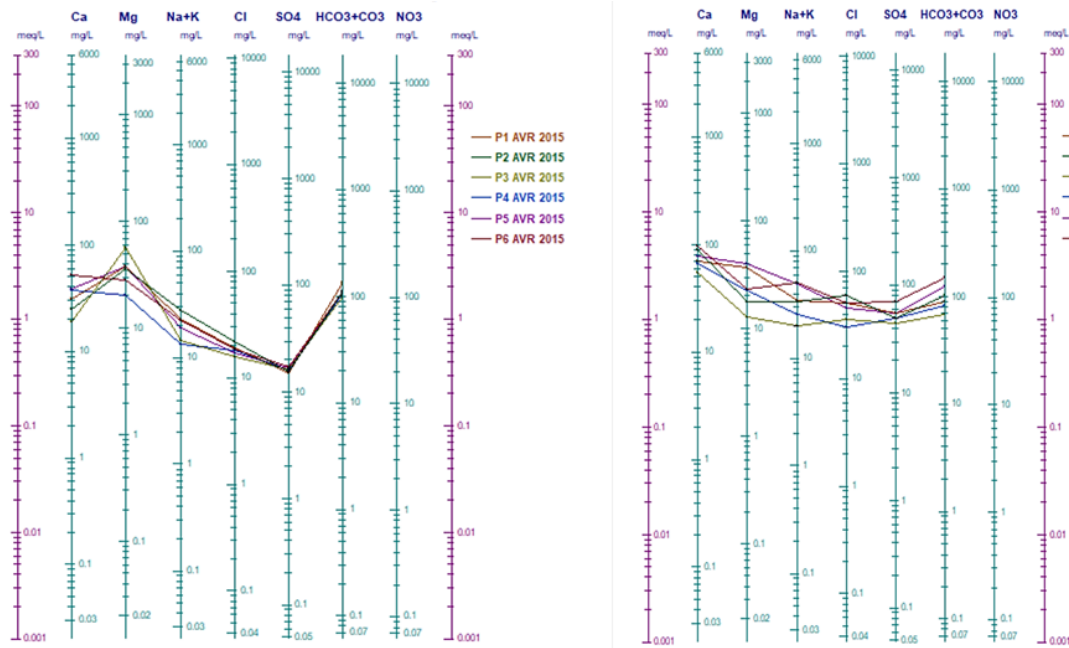


Figure II.16 : Diagramme de Schoeller des eaux de surface d'Oued El Nil.

II.7 Discussion :

L'analyse comparative des eaux de surface de l'Oued El Nil entre avril 2015 et avril 2022 (Tab II.1) révèle une dégradation marquée de la qualité physico-chimique, sous l'effet conjugué des pressions anthropiques et des processus géochimiques naturels. Entre 2015 et 2022, la température des eaux a globalement diminué sur cinq des six stations (de $-3,5$ °C à $-9,0$ °C), en cohérence avec la baisse de la température climatique annuelle (-1 °C) et la recharge hydrique soutenue par les précipitations abondantes (1200 mm/an). Seule la station P4 présente une hausse de $2,5$ °C, probablement liée à des conditions locales (faible profondeur, ombrage réduit ou apports anthropiques). Parallèlement, le pH, globalement proche de la neutralité en 2015, enregistre une alcalinisation ponctuelle à P3 ($7,4 \rightarrow 9,2$), favorisant la précipitation des carbonates. La conductivité électrique (CE) augmente très fortement sur l'ensemble des stations, avec des valeurs multipliées par deux à trois (P1 : $260 \rightarrow 600$ $\mu\text{S}/\text{cm}$; P6 : $266 \rightarrow 800$ $\mu\text{S}/\text{cm}$). Cette hausse traduit une minéralisation croissante des eaux, directement liée à l'intensification des activités agricoles (engrais) et aux rejets domestiques et industriels, conformément au contexte socio-économique de la vallée (agriculture intensive, urbanisation rapide, zone industrielle en développement).

Les éléments majeurs confirment cette tendance. Le calcium augmente très fortement (P2 : $25 \rightarrow 89$ mg/L), traduisant la dissolution des calcaires et des cipolins du bassin. À l'inverse, le magnésium diminue dans la plupart des stations, avec une baisse spectaculaire à P3 ($58 \rightarrow 13$ mg/L, -78 %), expliquée par la précipitation de la dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) en milieu alcalin. Le

sodium augmente modérément en amont et triple presque à l'aval (P5 : 16,6 → 48 mg/L ; P6 : 20 → 50 mg/L), tandis que le potassium augmente dans les stations amont (P3 : 2,8 → 6,2 mg/L) sous l'effet des engrais potassiques (KCl), puis diminue à l'aval par assimilation biologique ou dilution. La somme $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ augmente partout, confirmant une salinisation progressive.

Les bicarbonates diminuent dans les stations amont (P1 à P4), traduisant une précipitation carbonatée, mais augmentent à l'aval (P5, P6) sous l'effet d'apports souterrains chargés. Les chlorures doublent ou triplent (P2 : 22 → 60 mg/L), signant l'utilisation intensive d'engrais KCl et les rejets domestiques. Les sulfates enregistrent la hausse la plus spectaculaire (P6 : 17 → 70 mg/L, $\times 4,1$), liée aux engrais sulfatés (K_2SO_4 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) et aux détergents.

L'évolution des faciès chimiques illustre parfaitement ce basculement. En 2015, les eaux présentent un faciès bicarbonaté naturel : magnésien (4 stations, 67 %) issu de l'altération des dolomies et schistes, et calcique (2 stations, 33 %) lié à la dissolution des calcaires purs. En 2022, ce faciès bicarbonaté pur a complètement disparu au profit d'un faciès mixte $\text{Ca}-(\text{HCO}_3 - \text{Cl} - \text{SO}_4)$ sur l'ensemble des stations (100 %), traduisant une contamination généralisée par les engrais (KCl, K_2SO_4) et les rejets domestiques/industriels.

Cette synthèse met en évidence une dégradation généralisée de la qualité des eaux de surface de l'Oued Nil entre 2015 et 2022 (Tab II.1), caractérisée par une minéralisation croissante, une salinisation progressive, une inversion cationique ($\text{Mg} \rightarrow \text{Ca}$) et un basculement vers un faciès mixte anthropisé, sous l'effet conjugué de l'agriculture intensive (engrais KCl, K_2SO_4) et des rejets domestiques et industriels

Tableau II.1 : Synthèse des tendances évolutives 2015 – 2022.

Paramètre / Faciès	2015	2022	Évolution
Température	18,8 – 25,0 °C	15,0 – 21,8 °C	Baisse (–3,5 à –9 °C, sauf P4 +2,5)
pH	7,4 – 9,1	7,8 – 9,2	Alcalinisation à P3 (9,2)
CE (µS/cm)	225 – 310	450 – 800	Forte hausse (×2 à ×3)
Ca²⁺ (mg/L)	19 – 52	54,5 – 98	Très forte hausse
Mg²⁺ (mg/L)	20 – 58	13 – 40	Baisse généralisée (–78 % max)
Na⁺ (mg/L)	11,3 – 25	14 – 50	Forte hausse (triple à l'aval)
K⁺ (mg/L)	1,9 – 3,0	1,1 – 6,2	Hausse amont / baisse aval
Na⁺+K⁺ (mg/L)	9,2 – 19	20,2 – 51,2	Très forte hausse
HCO₃⁻ (mg/L)	100 – 135	69 – 150	Baisse amont / hausse aval
Cl⁻ (mg/L)	16 – 22	30 – 60	Forte hausse (×2 à ×3)
SO₄²⁻ (mg/L)	15 – 17	45 – 70	Très forte hausse (×2,8 à ×4,1)
Faciès dominant	Bicarbonaté (Mg-HCO ₃ : 67 % ; Ca-HCO ₃ : 33 %)	Mixte Ca- (HCO ₃ -Cl-SO ₄) (100 %)	Disparition des faciès naturels, anthropisation générale

Conclusion :

L'analyse des paramètres physico-chimiques et des faciès chimiques des eaux de surface de l'Oued El Nil, menée à partir des campagnes d'avril 2015 et d'avril 2022, met en évidence une dégradation significative et généralisée de la qualité de l'eau sur une période de sept ans.

Entre 2015 et 2022, la température des eaux a globalement diminué sur cinq des six stations (jusqu'à –9 °C à P1), en cohérence avec la baisse de la température climatique annuelle et la recharge hydrique soutenue. Seule la station P4 présente une hausse de 2,5 °C, attribuable à des conditions locales ou à des apports anthropiques ponctuels. La conductivité électrique a augmenté de manière spectaculaire (×2 à ×3), traduisant une minéralisation croissante des eaux, directement liée à l'intensification des pressions anthropiques (agriculture intensive, rejets domestiques et industriels).

L'évolution des éléments majeurs confirme cette tendance. Le calcium augmente très fortement (jusqu'à 98 mg/L à P6), tandis que le magnésium diminue (jusqu'à –78 % à P3), traduisant une inversion cationique (Mg → Ca) par précipitation de la dolomite en milieu alcalin (pH jusqu'à

9,2 à P3). Le sodium et le potassium augmentent nettement, particulièrement à l'aval (P5, P6), sous l'effet des engrais potassiques (KCl) et des eaux usées. Les chlorures et les sulfates enregistrent des hausses très marquées ($\times 2$ à $\times 4$), signant une contamination par les engrais (KCl, K_2SO_4 , $(NH_4)_2SO_4$) et les détergents

**CHAPITRE 3 : Caractérisation et évolution
temporelle de la qualité des eaux souterraines de
la plaine alluviale d'Oued El Nil.**

Introduction :

Les eaux souterraines de la plaine alluviale d'Oued El Nil sont une ressource stratégique pour l'irrigation et l'alimentation en eau potable. Leur vulnérabilité est élevée en raison de la forte perméabilité des alluvions et de la faible profondeur de la nappe, ce qui facilite l'infiltration rapide des polluants agricoles (engrais, pesticides) et domestiques (eaux usées). Évaluer leur qualité et son évolution temporelle est donc essentiel pour détecter les signes de salinisation, vérifier la conformité aux normes algériennes (JORA, 2011) et proposer des mesures de protection adaptées. Ce chapitre analyse les paramètres physico-chimiques et les rapports ioniques afin d'identifier les origines naturelles ou anthropiques des éléments dissous et d'orienter la gestion durable de la ressource.

III.1. Localisation des sites de prélèvement des eaux :

Sur la base d'études antérieures portant sur la qualité des eaux souterraines de la plaine alluviale d'Oued El Nil, six stations issues de l'étude de Fennour (avril 2015) et six stations issues de l'étude de Boussif (avril 2022) ont été sélectionnées, comme le montre la figure III.1

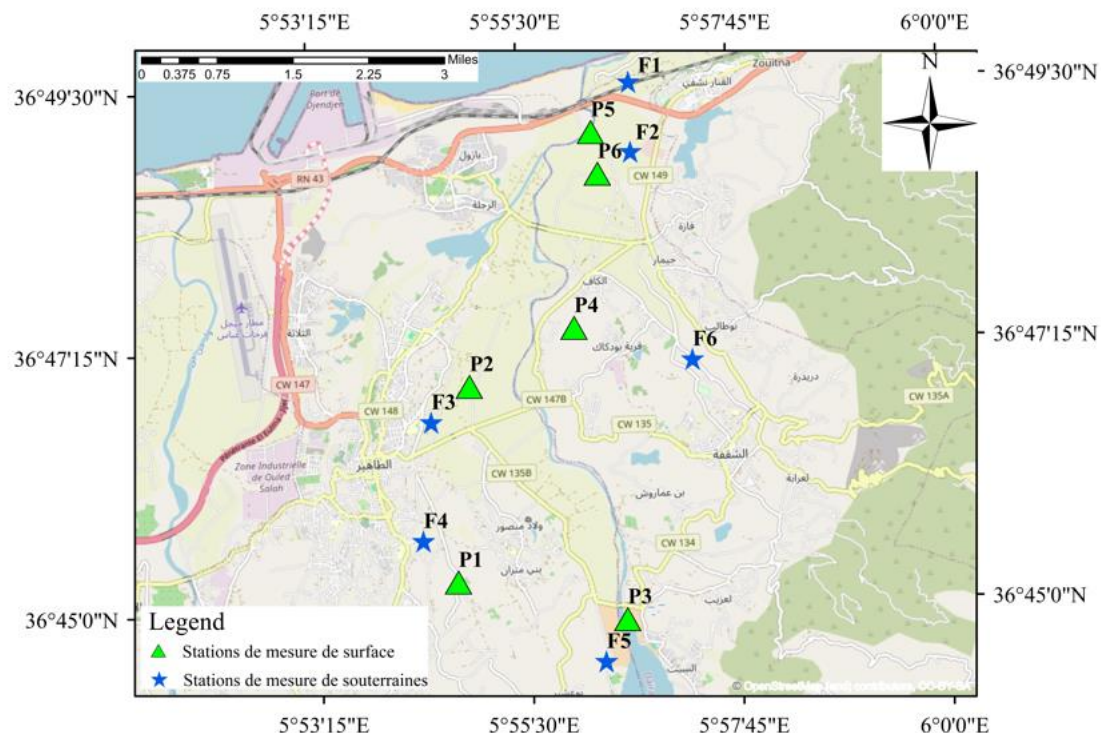


Figure III.1 : Carte des stations de la mesure des eaux de souterraines.

III.2 Les paramètres physiques :

III.2.1 La température (T°C) :

Entre 2015 et 2022, la température des eaux souterraines a augmenté dans la plupart des puits (F1, F2, F3), avec des hausses modérées comprises entre +2,2 °C et +3,5 °C. Seul le puits F4 a enregistré une très légère baisse (−0,7 °C) (Fig. III.2). En 2022, les températures varient de 14,8 à 21,0 °C, toutes nettement inférieures à la norme algérienne de 25 °C (JORA, 2011). Cette tendance

au réchauffement, sans dépassement des seuils, pourrait être liée à l'infiltration d'eaux de surface plus chaudes ou à un renouvellement plus lent de la nappe.

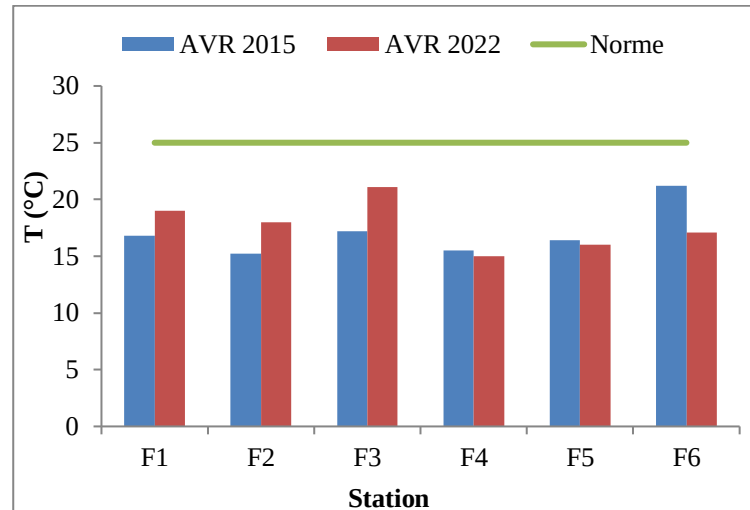


Figure III.2 : Évolution temporelle de la température des eaux de souterraines d'Oued El Nil.

III.2.2 Le potentiel hydrogène (pH) :

Le pH des eaux souterraines évolue de façon contrastée entre les deux campagnes 2015 et 2022 (Fig. III.3). Les puits F2 (5,4 → 7,6) et F6 (6,2 → 7,6) s'améliorent pour devenir conformes à la norme JORA (6,5–9,5). En revanche, F3 se détériore (8,0 → 5,5) et sort des limites réglementaires, signalant une acidification locale probablement liée aux engrais azotés ou aux rejets organiques. Les autres puits restent stables et conformes. Ainsi, malgré une amélioration de certains points, une zone d'alerte persiste au puits F3.

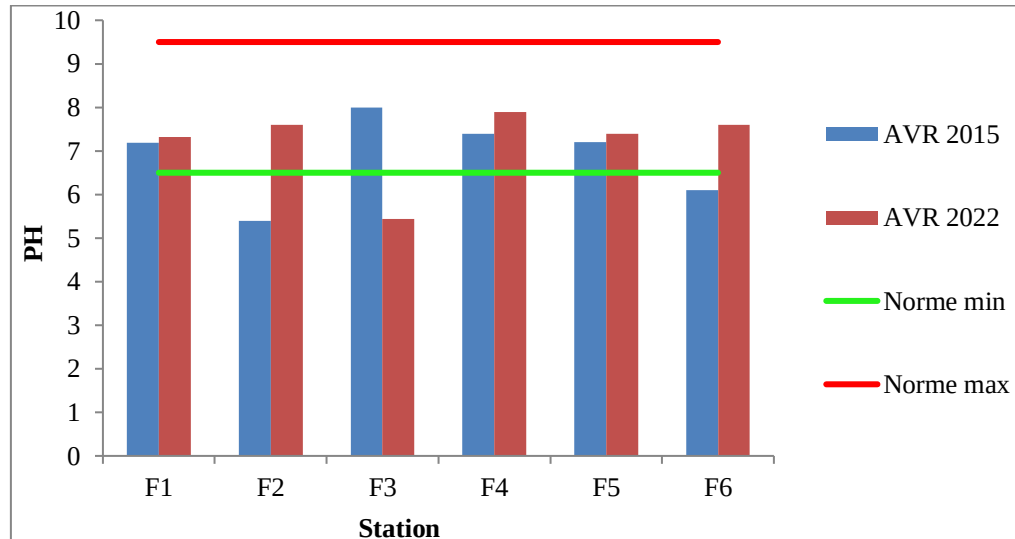


Figure III.3 : Évolution temporelle de pH des eaux de souterraines d'Oued El Nil.

III.2.3 La conductivité électrique (CE) :

La conductivité électrique des eaux souterraines a nettement augmenté dans la majorité des puits (F1, F2, F4, F5) (Fig. III.4), avec des hausses de +620, +700, +570 et +130 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectivement. Les deux points F3 et F6 ont une augmentation légère (+60 et +50) respectivement. Toutes les valeurs (480 à 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$) restent très inférieures à la norme algérienne (2800 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Cette hausse généralisée indique une minéralisation croissante de la nappe, liée à l'infiltration des eaux de surface plus salines, aux engrais et aux rejets domestiques. Bien que conforme aux normes,

cette tendance constitue un signal précoce de salinisation progressive justifiant une surveillance régulière.

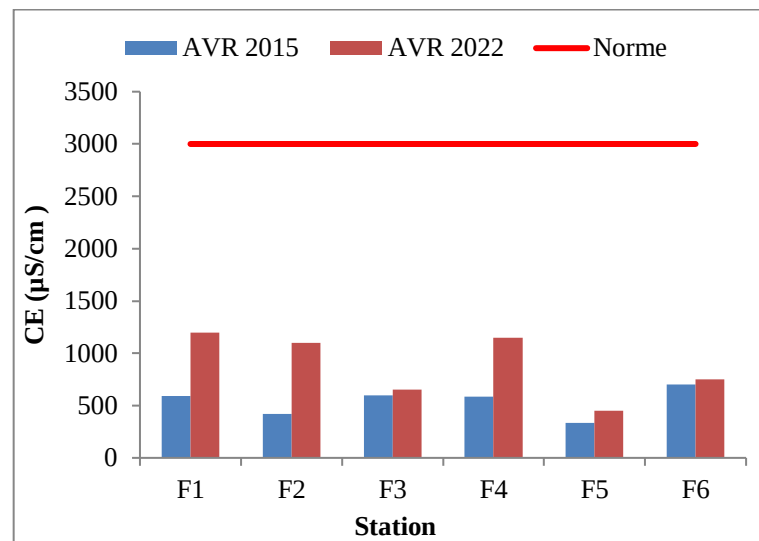


Figure III. 4 : Évolution temporelle de CE des eaux de souterraines d'Oued El Nil.

III.3 Les paramètres chimiques « éléments majeurs » :

III.3.1 Le Calcium (Ca^{+2}) :

Entre 2015 et 2022, les teneurs en calcium ont augmenté dans cinq puits sur six (F1, F2, F4, F5, F6), avec des hausses marquées pour F2 (+90 mg/L) et F5 (+59 mg/L). Seul F3 a baissé (de 76 à 31 mg/L). En 2022, tous les puits respectent la norme JORA2011 (200 mg/L), la valeur maximale étant 118 mg/L (F5). L'augmentation généralisée peut s'expliquer par le lessivage des calcaires ou les apports agricoles, dans le cas de F3 sa baisse, suggère une dilution locale (Fig. III.5).

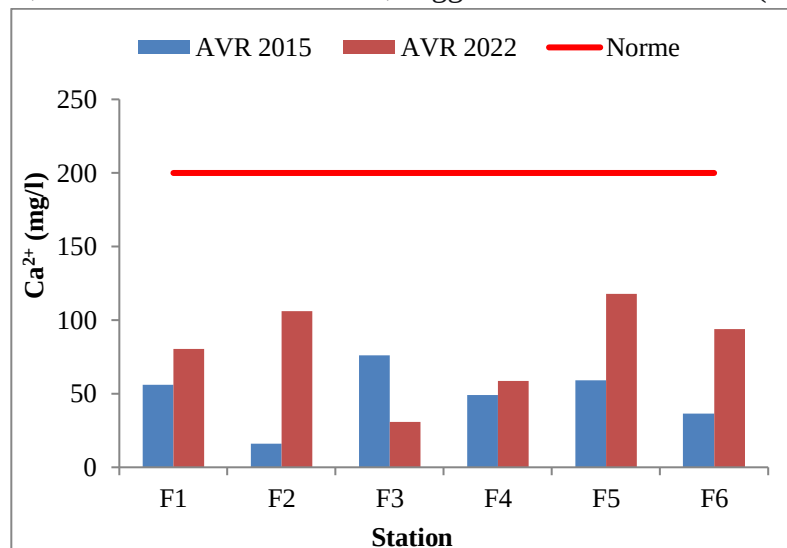


Figure III.5 : Évolution temporelle de Ca^{2+} des eaux de souterraines d'Oued El Nil.

III. 3.2 Le Magnésium (Mg^{+2}) :

Les teneurs en magnésium ont diminué dans tous les puits, entre les deux campagnes 2015 et 2022, avec des baisses allant de -12 à -68 mg/L. En 2022, les valeurs varient de 20 à 64 mg/L, soit très en dessous de la norme algérienne (JORA, 2011) fixée à 150 mg/L ; tous les puits sont

donc largement conformes (Fig. III.6). Cette baisse généralisée, contrastant avec l'augmentation du calcium, reflète probablement une précipitation des carbonates magnésiens (dolomite) dans l'aquifère ou un changement des sources d'alimentation. Du point de vue de la qualité, cette tendance est positive et ne présente aucun risque pour la potabilité. Un suivi reste recommandé pour confirmer cette évolution favorable.

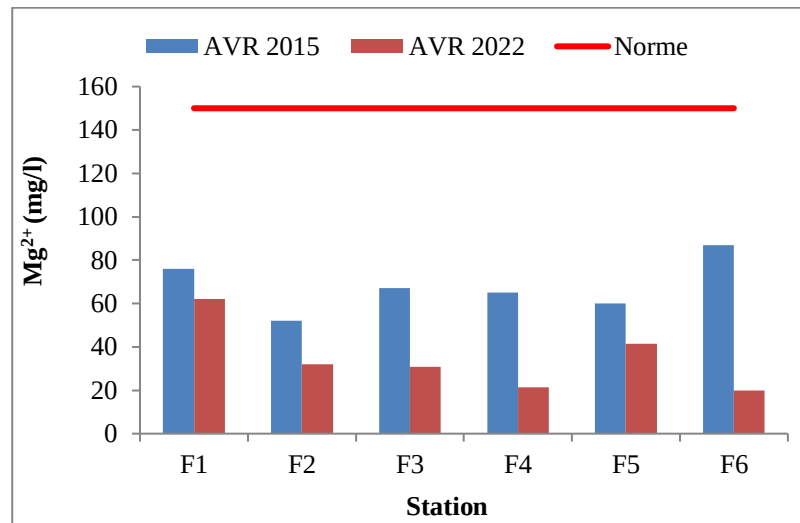


Figure III.6 : Évolution temporelle de Mg^{2+} des eaux de souterraines d'Oued El Nil.

III.3.3 Les Bicarbonates (HCO_3^-) :

Entre 2015 et 2022, les teneurs en bicarbonates ont évolué de façon contrastée : fortes baisses à F1 (–115 mg/L), F3 (–285 mg/L) et F4 (–145 mg/L) (Fig. III.7); forte hausse à F2 (+205 mg/L) ; stabilité à F5 et F6. En 2022, les valeurs vont de 20 à 260 mg/L, très en dessous de la norme algérienne (JORA, 2011) fixée à 500 mg/L, tous les puits sont donc conformes. Les baisses reflètent une précipitation du carbonate de calcium (consommation de HCO_3^-), en lien avec l'augmentation du calcium. La hausse à F2 peut indiquer un lessivage de sols carbonatés ou des apports alcalins ponctuels. Aucun risque réglementaire n'est à signaler, mais l'hétérogénéité des tendances justifie une surveillance ciblée.

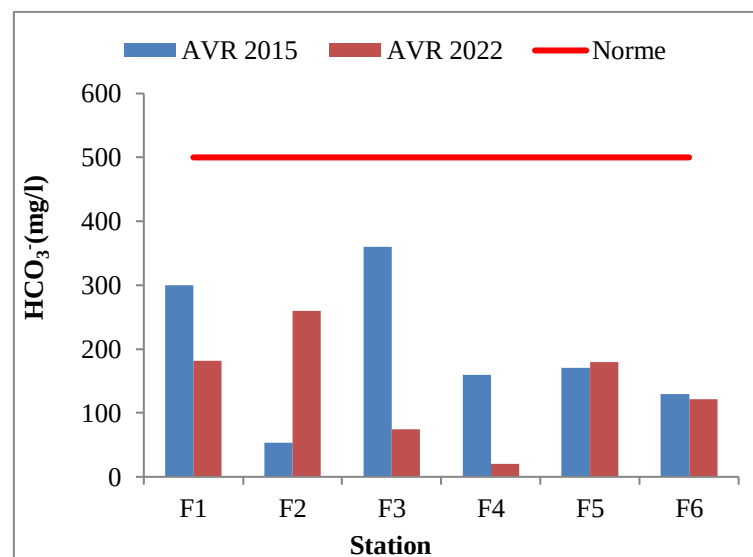


Figure III.7 : Évolution temporelle de HCO_3^- des eaux de souterraines d'Oued El Nil.

III.3.4. Les chlorures (Cl^-) :

Entre 2015 et 2022, l'évolution des concentrations en chlorures (Cl^-) dans les eaux souterraines d'Oued El Nil montre une tendance contrastée mais globalement maîtrisée (Fig. III.8). La station F1 enregistre une hausse modérée ($22 \rightarrow 50 \text{ mg/L}$, +28), F3 une augmentation plus nette ($33 \rightarrow 74 \text{ mg/L}$, +41) et F5 une légère progression ($35 \rightarrow 60 \text{ mg/L}$, +25). À l'inverse, les stations F2 ($35 \rightarrow 30 \text{ mg/L}$, -5), F4 ($30 \rightarrow 25 \text{ mg/L}$, -5) et F6 ($64 \rightarrow 40 \text{ mg/L}$, -24) présentent des baisses notables. La valeur maximale relevée en 2022 est de 74 mg/L (F3), soit seulement 15 % de la norme JORA 2011 fixée à 500 mg/L . Par conséquent, tous les six puits sont conformes et aucune pollution chlorurée d'origine anthropique (engrais, eaux usées) n'est détectée. La qualité des eaux est jugée satisfaisante pour la potabilité, ne nécessitant aucune action corrective urgente, mais une surveillance régulière reste recommandée pour confirmer la stabilité des faibles teneurs.

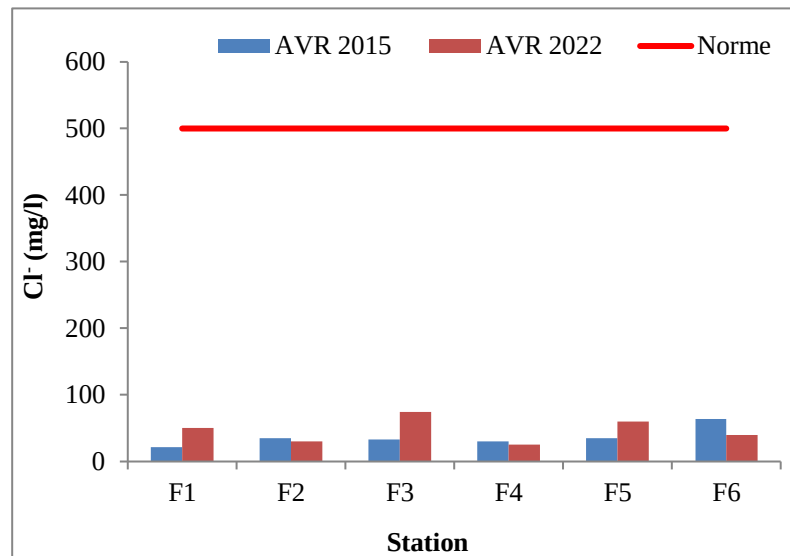


Figure III.8 : Évolution temporelle de Cl^- des eaux de souterraines d'Oued El Nil.

III.3.5 Le sodium (Na^+) :

Entre 2015 et 2022, les concentrations en sodium augmentent légèrement dans cinq stations (F1, F2, F3, F5, F6), avec un maximum de 75 mg/L en 2022, et baissent à F4. Toutes restent très en dessous de la norme JORA 2011 (200 mg/L). Aucune pollution anthropique sévère n'est détectée. Les eaux sont conformes pour la consommation (Fig. III.9).

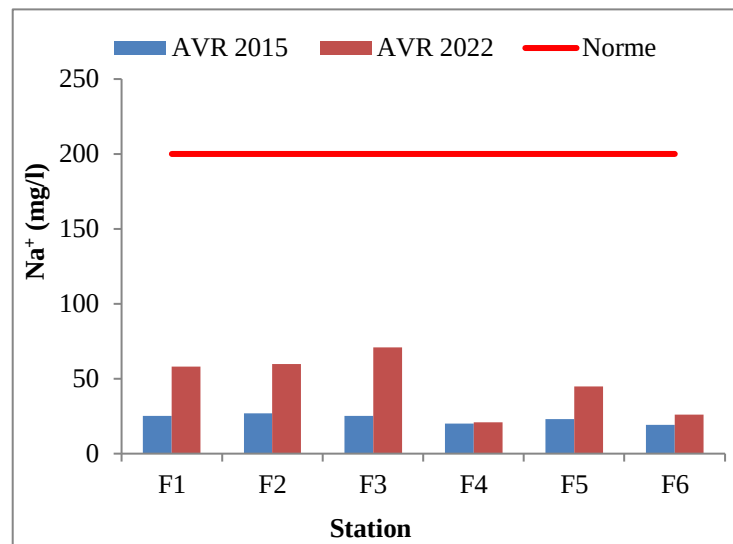


Figure III.9 : Évolution temporelle de Na^+ des eaux de souterraines d'Oued El Nil.

III.3.6 .Le potassium (K^+) :

Les concentrations en potassium ont légèrement augmenté dans tous les puits (+0,2 à +4,0 mg/L)(Fig. III.10). En 2022, les valeurs varient de 3,2 à 8,5 mg/L, soit très en dessous de la norme algérienne (JORA, 2011) fixée à 12 mg/L. Tous les puits sont donc conformes. Cette hausse, bien que modérée, reflète l'influence des engrais potassiques (KCl , K_2SO_4) et des rejets domestiques. Aucun risque réglementaire n'est à signaler, mais la tendance haussière justifie une surveillance régulière.

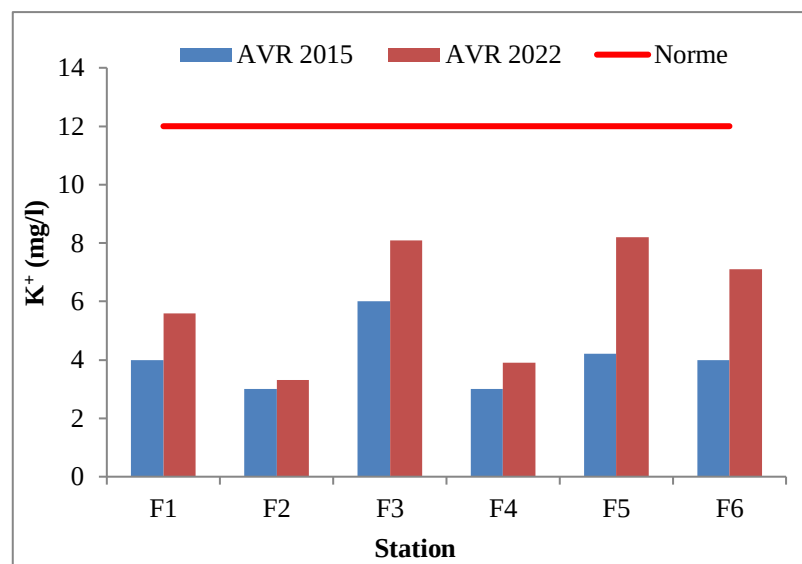


Figure III.10:Évolution temporelle de K^+ des eaux de souterraines d'Oued El Nil.

III.3.7.Sulfate (SO_4^{2-}) :

Entre 2015 et 2022, les concentrations en sulfates dans les eaux souterraines d'Oued El Nil augmentent dans cinq stations (F1, F3, F4, F5, F6) avec des hausses modérées (de +45 % à +200 %), tandis que F2 enregistre une légère baisse (40→30 mg/L). La valeur maximale en 2022 est de 90 mg/L (F3), soit seulement 22,5 % de la norme JORA 2011 (400 mg/L). Tous les six puits sont donc conformes, sans aucune pollution sulfatée sévère. Ces eaux présentent une

minéralisation naturelle modérée, sans risque pour la consommation (Fig. III.11).

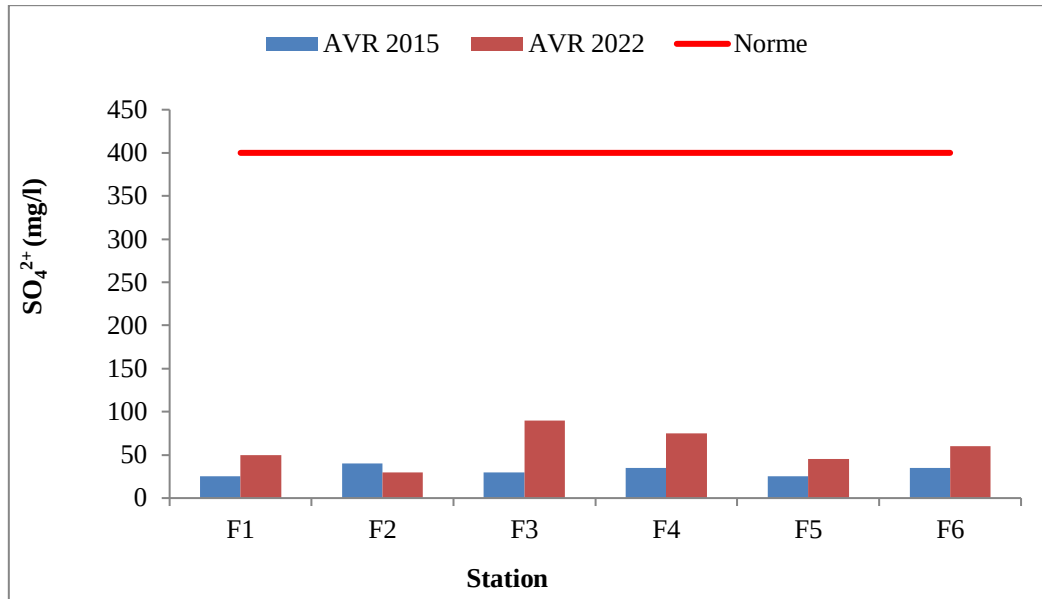


Figure III.11 : Évolution temporelle de SO_4^{2-} des eaux de souterraines d'Oued El Nil.

III.3.8. Nitrate NO_3^- :

Entre 2015 et 2022, les teneurs en nitrates ont très légèrement diminué ou sont restées stables dans tous les puits (valeurs comprises entre 0,5 et 19,5 mg/L en 2022) (Fig. III.12). La norme algérienne (JORA, 2011) fixe la limite maximale à 50 mg/L. Tous les puits sont donc très largement conformes, avec des concentrations de 2,5 à 100 fois inférieures au seuil. Cette tendance positive indique l'absence de pollution azotée significative.

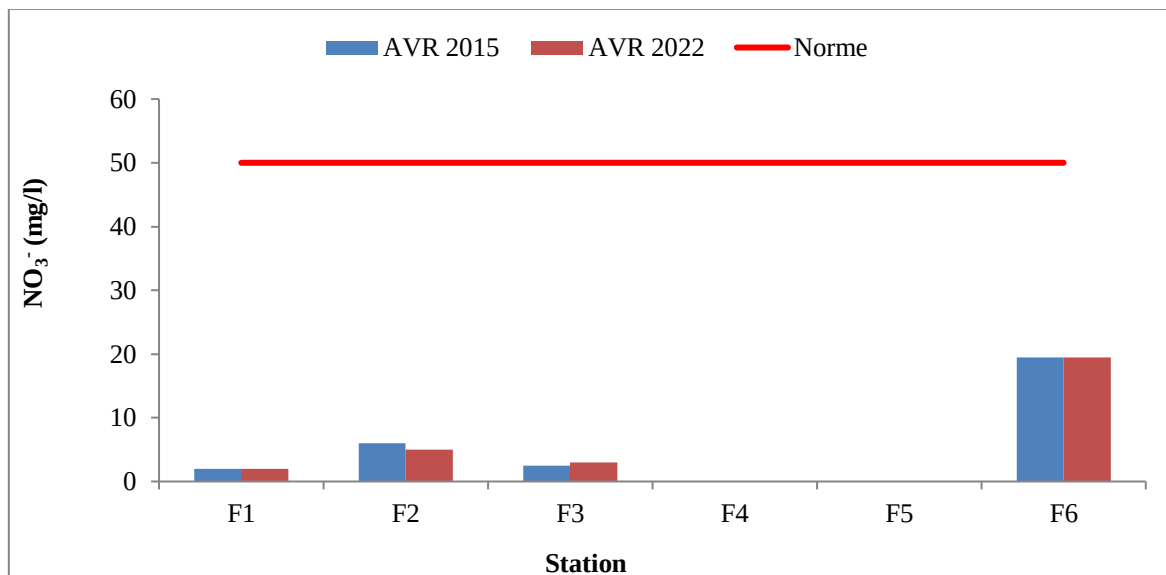


Figure III.12 : Évolution temporelle de NO_3^- des eaux de souterraines d'Oued El Nil.

III.4. Rapports caractéristiques :

Les rapports ioniques (ou rapports caractéristiques) constituent des indicateurs hydrochimiques importants pour comprendre l'origine des eaux souterraines, leurs mécanismes d'alimentation et les processus géochimiques qui les influencent. Dans cette étude, les rapports entre les principaux

ions ont été calculés et analysés à partir des données des campagnes d'avril 2015 et d'avril 2022, dans le but d'identifier les sources naturelles et anthropiques des sels et de suivre l'évolution de la qualité de l'eau dans la plaine alluviale d'Oued EL Nil.

III.4.1 Le rapport Na/Cl :

En 2015, la plupart des échantillons se situent au-dessus de la droite d'équilibre, indiquant un enrichissement naturel en sodium par échanges cationiques au sein de l'aquifère alluvial. Un seul point (F6) se trouve en dessous de la droite, traduisant un excès local de chlorures probablement lié à des apports ponctuels d'engrais potassiques (KCl). En 2022, tous les points se déplacent vers le haut ou restent au-dessus de la droite, avec un éloignement marqué pour certains (F2 notamment). Cette migration traduit un enrichissement supplémentaire en sodium d'origine anthropique : infiltration d'eaux usées domestiques riches en sodium (lessives, détergents, adoucissants) et lessivage d'engrais sodiques (NaNO_3) utilisés en agriculture intensive. Le point F6, quant à lui, rejoint la droite 1/1, signe que l'excès initial de chlorures a été compensé par un apport de sodium (Fig. III.13).

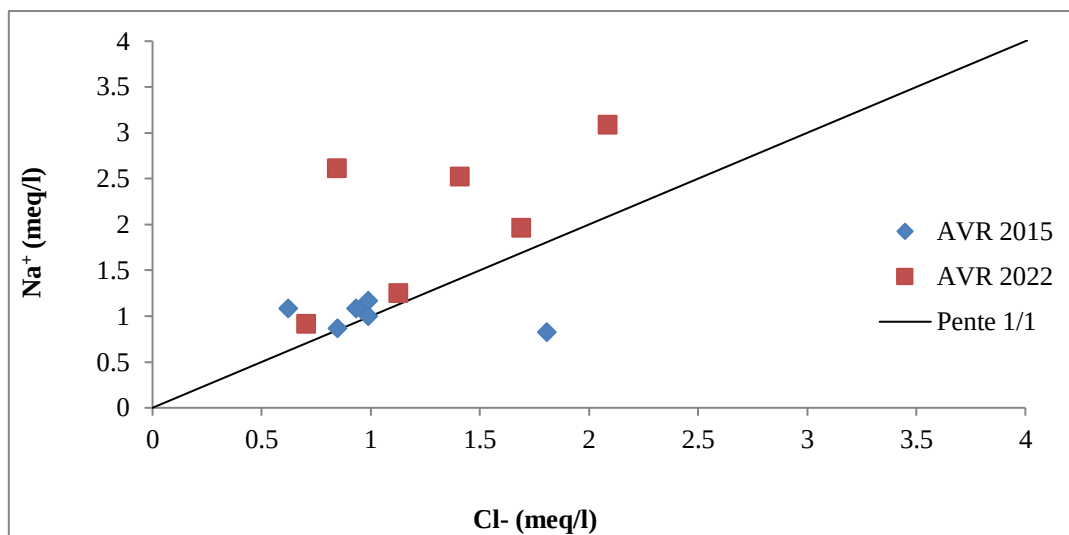


Figure III.13 : Rapport ionique $r_{\text{Na}}/r_{\text{Cl}}$.

III.4.2 Le rapport Ca/Mg :

En 2015, l'ensemble des points se situe sous la droite 1/1 (Fig. III.14), avec des rapports Ca/Mg compris entre 0,19 et 0,69. Cette position reflète la dominance naturelle du magnésium sur le calcium, caractéristique des eaux ayant circulé dans les roches métamorphiques magnésiennes (schistes, micaschistes, granulites) et les dolomies décrites au chapitre 1. En 2022, la configuration change radicalement : une partie des points franchit la droite 1/1 pour se placer au-dessus (F2, F4, F5, F6), tandis que F1 et F3 restent en dessous mais se rapprochent de la droite. Ce basculement de part et d'autre de la droite 1/1 est un signal géochimique majeur. Il traduit une inversion de la dominance cationique : le magnésium naturel cède la place au calcium d'origine anthropique. Les apports proviennent du chaulage des sols agricoles (apport de chaux pour corriger le pH), des eaux usées domestiques riches en calcium (détergents, eaux dures), et de l'infiltration d'eaux de surface polluées lessivant les carbonates.

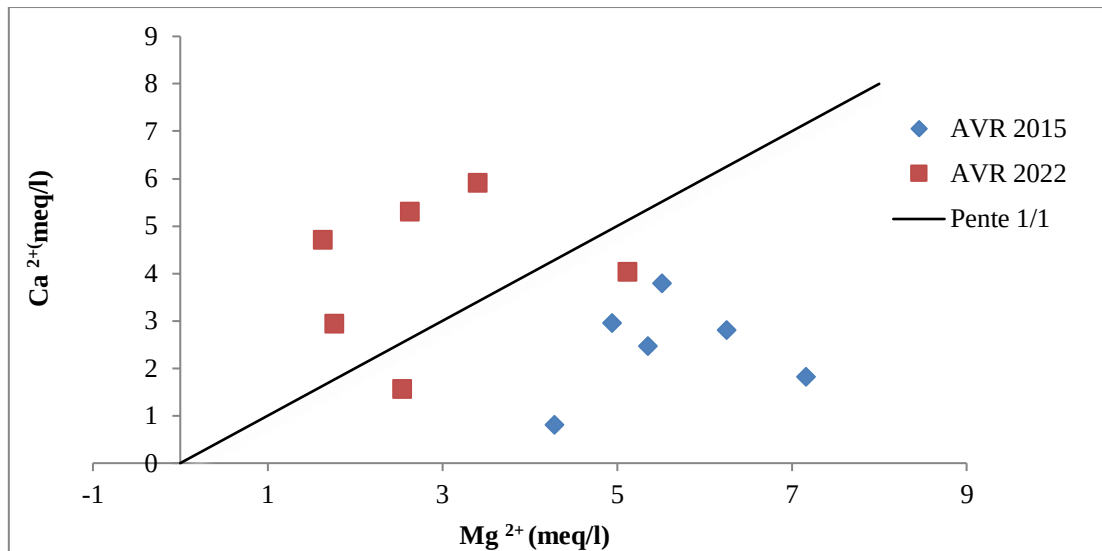


Figure III.14 : Rapport ionique rCa/rMg .

III.4.3 Le rapport $(Ca+Mg)/(HCO_3+SO_4)$:

La figure III.15 montre que la majorité des points se situe en dessous de la droite 1/1, traduisant un excès généralisé des anions acides (HCO_3+SO_4) sur les cations divalents ($Ca+Mg$). Toutefois, deux points particuliers se distinguent. Le point F5-2015 se trouve au-dessus de la droite, reflétant une dominance naturelle des cations divalents encore préservée à cette époque. Le point F2-2022 se situe exactement sur la droite, indiquant un équilibre ponctuel entre les deux pôles. L'ensemble des autres points, tous en dessous, confirme une tendance générale au déséquilibre anionique, liée à la hausse des sulfates d'origine anthropique (engrais sulfatés, eaux usées). La présence d'un point d'équilibre en 2022 constitue un signal d'alerte pour l'avenir.

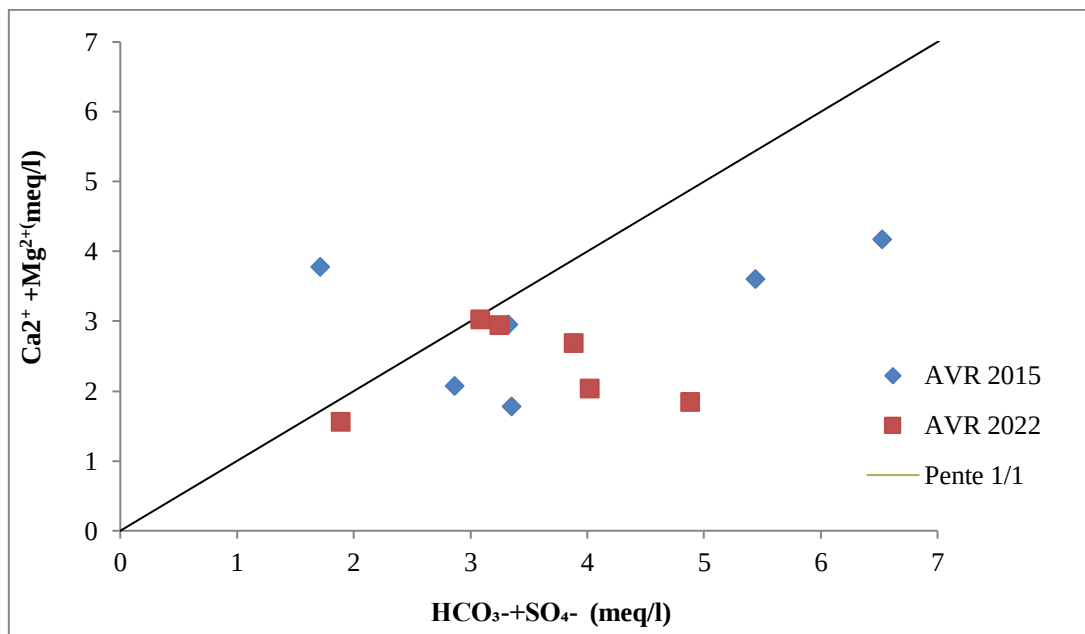


Figure III.15 : Rapport ionique $r(Ca+Mg)/r(HCO_3+SO_4)$.

III.5 .Classification des eaux « Faciès chimique » :

III.5.1.Diagramme de Piper :

Le report des données physico-chimiques des eaux souterraines prélevées dans six puits (F1 à F6) en avril 2015 et avril 2022 (soit 12 échantillons) sur le diagramme de Piper (Fig.III.16) permet d'identifier plusieurs faciès hydrochimiques.

Campagne Avril 2015

La campagne de 2015 montre une grande homogénéité dans la composition chimique des eaux souterraines, dominée par l'influence des roches carbonatées.

- **Faciès Bicarbonaté Magnésien (66.7%)**

Ce faciès est le plus représentatif de la campagne 2015, concernant 4 stations sur 6 (F1, F3, F4, F5). Les eaux sont dominées par les ions Magnésium pour les cations (entre 52% et 61%) et par les Bicarbonates pour les anions (entre 62% et 80%). Cette signature indique des eaux relativement jeunes, dont la minéralisation provient principalement de la dissolution de roches carbonatées riches en magnésium (comme les dolomies) par l'action du CO_2 dissous.

- **Faciès Mixte Magnésien (33.3%)**

Ce faciès concerne 2 stations sur 6 (F2, F6). Bien que le Magnésium reste le cation dominant (67% à 72%), il n'y a pas d'anion clairement dominant (>50%). On observe un équilibre relatif entre les Bicarbonates, les Chlorures et les Sulfates. Ces eaux conservent l'empreinte de la roche mère carbonatée (dominance du Mg).

Campagne d'Avril 2022

La campagne de 2022 révèle une évolution significative et une forte hétérogénéité du système hydrogéologique, avec l'apparition de nouveaux faciès.

- **Faciès Bicarbonaté Mixte (33.3%)**

Ce faciès concerne 2 stations sur 6 (F1, F2). Les Bicarbonates restent l'anion dominant (54% à 73%), mais aucun cation ne dépasse le seuil de 50. Ces eaux sont en transition, l'influence carbonatée persiste (Bicarbonates), mais les échanges cationiques (probablement libération de Ca et Na au détriment du Mg) modifient l'équilibre des cations.

- **Faciès Bicarbonaté Calcique (16.7%)**

Ce faciès concerne 1 station sur 6 (F5). Il est caractérisé par la dominance du Calcium (51%) et des Bicarbonates (52%), c'est une signature classique d'une eau ayant circulé dans des calcaires purs. C'est une évolution par rapport au faciès magnésien de 2015 pour cette même station.

- **Faciès Sulfaté Calcique (16.7%)**

Ce faciès concerne 1 station sur 6 (F4). Dominance marquée du Calcium (51%) et des Sulfates (60%). Ce faciès indique un changement majeur de la source de minéralisation. Il traduit généralement la dissolution de minéraux évaporitiques (comme le gypse CaSO_4) ou peut résulter d'une pollution anthropique spécifique (engrais sulfatés).

- **Faciès Mixte Calcique (16.7%)**

Ce faciès concerne 1 station sur 6 (F6). Le Calcium est le cation dominant (61%), mais les anions sont répartis sans dominance claire (Bicarbonates 42%, Sulfates 26%, Chlorures 24%). L'eau est influencée par des formations calcaires, mais subit des apports variés en anions, reflétant un mélange d'eaux ou des processus d'altération multiples.

- Faciès Mixte Mixte (16.7%)

Ce faciès concerne 1 station sur 6 (F3). Aucun ion (ni cation, ni anion) ne dépasse les 50%. On note cependant une forte proportion de Sodium+Potassium (44%) et de Chlorures (40%). C'est le stade d'évolution le plus complexe. L'absence de dominance indique un mélange important ou des temps de résidence longs favorisant de multiples échanges ioniques. La forte présence de Na et Cl suggère une tendance vers une salinisation (intrusion saline ou lessivage de sols salés).

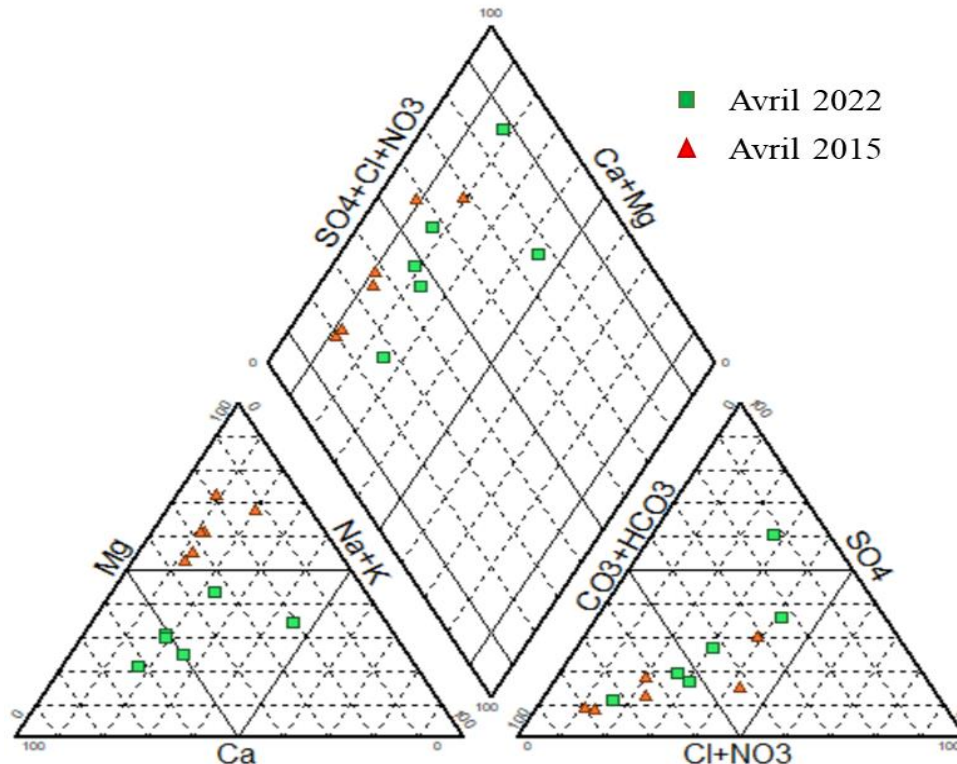


Figure III.16 : Caractéristiques chimiques des eaux de souterraine de la plaine d'Oued EL Nil.

III.5. 2 Diagramme de Schoeller-Berkaloff :

Campagne d'Avril 2015

- Facies Bicarbonatés Magnésiens (66.7%)

Les courbes des stations F1, F3, F4, F5 présentent des concentrations élevées en Magnésium et Bicarbonates, avec des niveaux plus faibles pour les autres ions. Les profils sont relativement plats ou légèrement décroissants de Mg vers Na, et de HCO_3 vers Cl/SO_4 . Ces profils confirment la dominance du faciès bicarbonaté magnésien, typique des eaux peu minéralisées ayant interagi avec des roches carbonatées (dolomies). La faible pente des courbes suggère une minéralisation modérée.

- Facies Mixtes Magnésiens (33.3%)

Les stations F2 et F6 montrent des profils où le magnésium est toujours prédominant, mais avec des concentrations en chlorures et sulfates relativement plus importantes par rapport aux

bicarbonates, créant des courbes plus irrégulières. Ces profils indiquent une eau plus évoluée que le faciès précédent, avec des apports anioniques diversifiés, mais conservant l'empreinte de la dissolution des roches magnésiennes.

Campagne d'Avril 2022

Les profils de 2022 sont plus dispersés et montrent des concentrations ioniques généralement plus élevées, reflétant une évolution et une diversification des types d'eaux (Fig. III.17).

- **Faciès Bicarbonatés Mixtes (33.3%)**

Les stations F1 et F2 présentent des profils où les bicarbonates sont les anions les plus concentrés, mais les cations (Ca, Mg, Na) sont plus équilibrés, sans dominance très marquée d'un seul. Ces profils traduisent une eau en transition, où l'influence carbonatée est toujours forte, mais des processus d'échange de bases ou de mélange avec d'autres eaux modifient l'équilibre cationique.

- **Facies Bicarbonatés Calciques (16.7%)**

La station F5 montre des concentrations élevées en calcium et bicarbonates, avec une augmentation notable par rapport à 2015. Ce profil est caractéristique des eaux ayant circulé dans des formations calcaires, avec une dissolution prédominante de la calcite.

- **Facies Sulfatés Calciques (16.7%)**

La station F4 présente un profil avec des concentrations très élevées en calcium et sulfates, dépassant les autres ions. Ce profil est fortement indicatif de la dissolution de minéraux évaporitiques (comme le gypse) ou d'une influence anthropique importante (par exemple, apports d'engrais sulfatés).

- **Profils Mixtes Calciques (16.7%)**

La station F6 montre une dominance du calcium, mais avec des concentrations anioniques plus équilibrées entre bicarbonates, chlorures et sulfates. Ce profil suggère une eau ayant interagi avec des formations calcaires, mais également soumise à des apports variés en anions, indiquant des processus géochimiques complexes ou des mélanges.

- **Facies Mixtes Sodiques-Chlorurés/Sulfatés (16.7%)**

La station F3 présente un profil avec des concentrations élevées en Sodium, Chlorures et Sulfates, et une forme de courbe très différente des profils de 2015. Ce profil est le plus évolué et indique une salinisation des eaux. Il peut être le résultat d'une intrusion saline, d'un lessivage de sols salés, ou de temps de résidence très longs favorisant les échanges de bases et l'enrichissement en ions Na^+ et $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$.

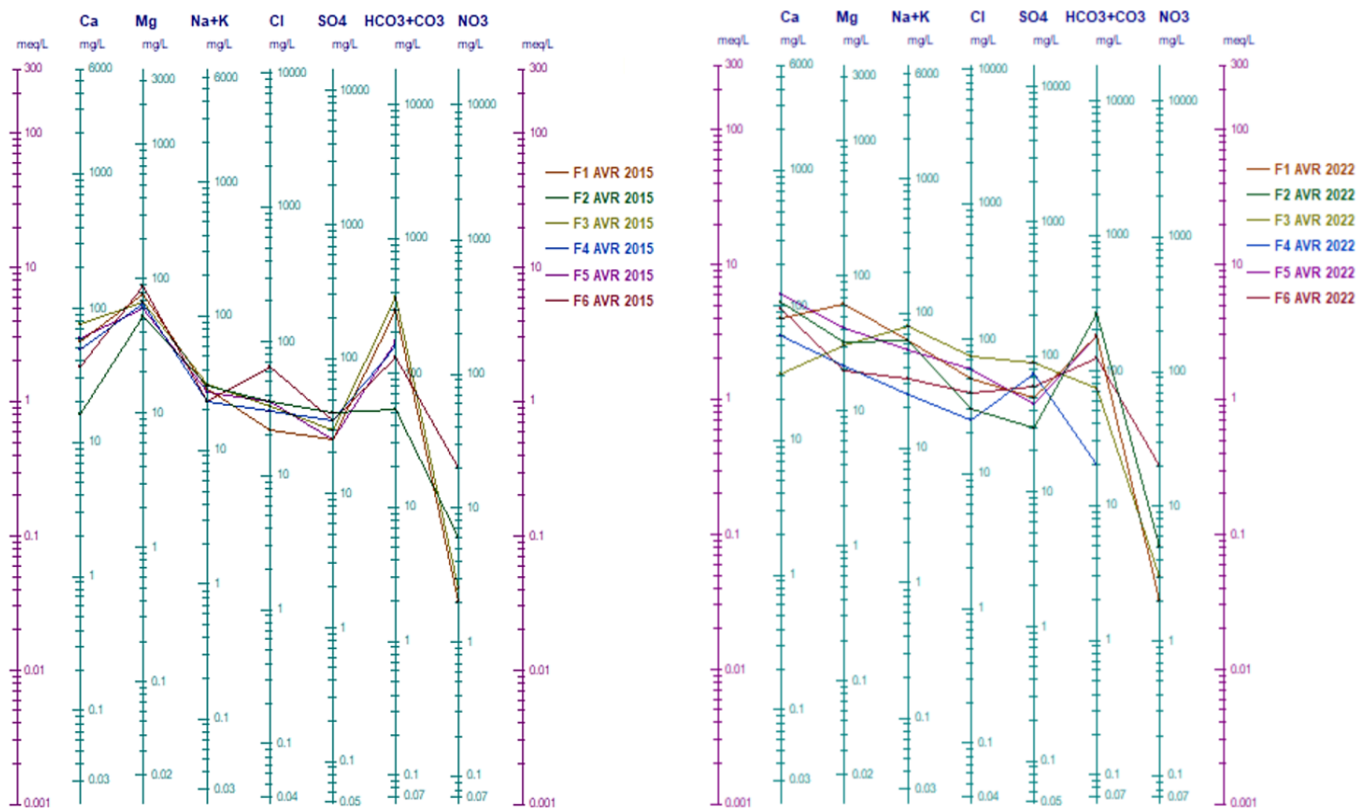


Figure III.17 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff des eaux de souterraine de l'Oued El Nil.

III.6 Discussion :

L'analyse comparative des eaux souterraines de la plaine alluviale d'Oued El Nil entre Avril 2015 et Avril 2022 révèle une dégradation marquée de la qualité physico-chimique, sous l'effet conjugué des pressions anthropiques et des processus géochimiques induits.

La conductivité électrique (CE) augmente très fortement sur l'ensemble des puits (F1 : 590 → 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$; F2 : 420 → 1100 $\mu\text{S}/\text{cm}$), traduisant une minéralisation croissante liée aux engrais et aux rejets domestiques. Le pH se normalise sur certains points (F2, F6) mais s'acidifie localement à F3 (8,0 → 5,44), sortant des normes, probablement sous l'effet des engrais azotés et des matières organiques.

Les éléments majeurs confirment cette tendance. Le calcium augmente très fortement (F2 : 16 → 106 mg/L), signant l'impact du chaulage agricole et des eaux usées. À l'inverse, le magnésium diminue dans tous les puits (F6 : 87 → 19,9 mg/L), expliqué par la précipitation de la dolomite. Le sodium augmente fortement, cinq puits sur six dépassant la norme de 200 mg/L en 2022, traduisant une contamination par les eaux usées (lessives, détergents). Les sulfates enregistrent une hausse généralisée (F3 : 30 → 90 mg/L), liée aux engrais sulfatés (K_2SO_4) et aux détergents. Les nitrates restent faibles et stables (< 20 mg/L), suggérant une dénitrification active.

L'évolution des rapports ioniques confirme ces tendances. Le rapport Na/Cl s'accroît (pic à F2 : 3,07), signant un enrichissement en sodium anthropique. Le rapport Ca/Mg bascule : tous les puits < 1 en 2015 (dominance naturelle du Mg), quatre puits > 1 en 2022 (inversion cationique au profit du Ca). Le rapport $(\text{Ca}+\text{Mg})/(\text{HCO}_3+\text{SO}_4)$ reste > 1 mais tend à baisser, sous l'effet de la hausse des sulfates.

Les faciès chimiques évoluent d'un état naturel bicarbonaté magnésien (66,7 % en 2015) et mixte magnésien (33,3 %) vers un état anthropisé dominé par les faciès bicarbonaté mixte (33,3 %), bicarbonaté calcique (16,7 %), sulfaté calcique (16,7 %), mixte calcique (16,7 %) et mixte sodiques-chlorurés/sulfatés (16,7 %). Cette évolution traduit l'impact du chaulage agricole, des engrais (KCl, K₂SO₄) et des rejets domestiques, et justifie des mesures correctives urgentes.

En synthèse, les eaux souterraines de l'aquifère alluvial d'Oued El Nil montrent entre 2015 et 2022 une dégradation généralisée : minéralisation croissante, salinisation progressive, inversion cationique (Mg → Ca) et basculement vers des faciès anthropisés, sous l'effet conjugué de l'agriculture intensive (engrais, chaulage) et des rejets domestiques (eaux usées, détergents). Cette évolution, résumée dans le tableau III.1, est préoccupante et justifie des mesures correctives urgentes.

Tableau III.1 : Synthèse des tendances évolutives des eaux souterraines (2015 – 2022).

Paramètre / Faciès	Avril 2015	Avril 2022	Évolution
CE (µS/cm)	337 – 700	450 – 1200	Très forte hausse
pH	5,4 – 8,0	5,44 – 7,9	Acidification à F3 (non conforme)
Ca²⁺ (mg/L)	16 – 76	31 – 118	Très forte hausse
Mg²⁺ (mg/L)	52 – 87	19,9 – 62,2	Baisse généralisée
Na⁺ (mg/L)	19 – 27	21 – 71	Très forte hausse (5/6 > norme 200)
SO₄²⁻ (mg/L)	25 – 40	30 – 90	Forte hausse
NO₃⁻ (mg/L)	0 – 19,5	0 – 19,5	Stable (conforme norme 50)
Rapport Ca/Mg	Tous < 1 (0,19– 0,69)	4 puits > 1 (1,65–2,86)	Inversion cationique
Faciès dominant (Piper)	Bicarbonaté magnésien (66,7 %) + Mixte magnésien (33,3 %)	Bicarbonaté mixte (33,3 %) + Bicarbonaté calcique (16,7 %) + Sulfaté calcique (16,7 %) + Mixte calcique (16,7 %) + Mixte mixte (16,7 %)	Disparition des faciès naturels, anthropisation générale

Conclusion :

Entre 2015 et 2022, les eaux souterraines de la plaine alluviale d'Oued El Nil montrent une évolution chimique modérée mais contrastée. La conductivité électrique augmente (max 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$) sans atteindre la norme (2800 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Le pH reste globalement conforme sauf à F3 (5,5, acide), seul paramètre non conforme. Pour les éléments majeurs, toutes les concentrations 2022 respectent les normes JORA 2011 : calcium (max 118 mg/L, norme 200), magnésium (max 64 mg/L, norme 150), sodium (max 75 mg/L, norme 200), chlorures (max 74 mg/L, norme 500), sulfates (max 90 mg/L, norme 400), nitrates (max 19,5 mg/L, norme 50) et potassium (max 8,5 mg/L, norme 12). Les rapports ioniques et les diagrammes de Piper/Schoeller révèlent une inversion cationique progressive ($\text{Mg} \rightarrow \text{Ca}$) et une anthropisation croissante (faciès bicarbonaté magnésien laissant place à des faciès mixtes calciques et sulfatés). Aucune pollution sévère ni dépassement réglementaire n'est constaté pour les ions majeurs, mais la tendance haussière généralisée (Ca^{2+} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-}) et l'acidification locale justifient une surveillance régulière et des actions préventives (réduction des engrais, traitement des eaux usées) pour préserver la ressource.

Chapitre 4.

**Évaluation de l'aptitude à l'irrigation et
synthèse comparative**

Introduction :

Dans la plaine alluviale de l'Oued El Nil (Jijel), l'agriculture dépend étroitement des eaux de surface et souterraines, de plus en plus menacées par les pressions anthropiques (engrais, rejets domestiques, urbanisation) et climatiques (sécheresses). La qualité de l'eau d'irrigation est très importante : une eau inadaptée dégrade les sols (salinisation, alcalinisation), nuit aux cultures et réduit les rendements. Les principaux indicateurs sont la conductivité électrique (CE), le Sodium Adsorption Ratio (SAR), les ions toxiques (Cl^- , Na^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-}) et les nutriments (NO_3^- , PO_4^{3-}). Ce chapitre évalue l'aptitude à l'irrigation des eaux de surface d'Oued El Nil et de sa nappe alluviale, afin de proposer des recommandations pour une agriculture durable dans la région de Jijel.

IV.1 Méthodologie d'évaluation :

L'évaluation de l'aptitude à l'irrigation des eaux de surface et souterraines repose sur plusieurs indicateurs complémentaires, chacun renseignant sur un risque spécifique : salinisation, alcalinisation ou toxicité ionique directe pour les cultures. Les méthodes utilisées ici sont celles couramment recommandées par la FAO et l'US Salinity Laboratory. (Bouakkaz, 2020).

IV.1.1 Risque de salinité :

La salinité d'une eau d'irrigation est principalement estimée par sa conductivité électrique (CE), exprimée en microsiemens par centimètre ($\mu\text{S}/\text{cm}$). La CE est proportionnelle à la concentration totale en sels dissous. L'irrigation avec des eaux riches en sels peut entraîner la fixation de sodium par le complexe adsorbant du sol, donc un processus de salinisation, avec ses conséquences éventuelles pour les propriétés du sol : tendance à la dispersion des argiles, à la dégradation de la structure, à la perte de perméabilité et à l'asphyxie des plantes (Richards, 1954 in Terchi, 2014).

Afin d'estimer l'influence de ces eaux sur le sol et sur certaines cultures pratiquées dans la région, nous allons essayer d'évaluer leur aptitude à l'irrigation. Pour cela, nous utilisons la méthode du SAR (Diagramme de Richards) afin de distinguer les différentes classes de l'eau. (Bouakkaz, 2020).

IV.1.2 Risque de sodification:

Le risque de sodification (ou d'alcalinisation) des sols correspond à l'accumulation excessive de sodium (Na^+) sur le complexe adsorbant du sol. Ce phénomène, distinct de la salinité, provoque la dispersion des argiles, la dégradation de la structure du sol, une réduction de sa perméabilité et une

asphyxie racinaire. (Richards, 1954 ; Loyer, 1993).

Pour évaluer ce risque, on utilise principalement le Sodium Adsorption Ratio (SAR). Cet indicateur exprime la proportion relative du sodium par rapport au calcium et au magnésium, tous exprimés en milliéquivalents par litre. Un SAR élevé traduit une prédominance du sodium susceptible d'alcaliniser le sol. La classification retenue est celle de Richards (1954), qui définit quatre classes : S1 (faible risque), S2 (risque moyen), S3 (risque élevé) et S4 (risque très élevé).

En complément, le pourcentage de sodium (%Na) est parfois utilisé. Il représente la part du sodium (et éventuellement du potassium) parmi l'ensemble des cations. Selon Wilcox (1955), un %Na inférieur à 60 % est généralement sans danger, tandis qu'au-delà de 70 % l'eau est considérée comme inadaptée à l'irrigation, sauf pour des cultures très tolérantes. (Richards, 1954).

Les formules de calcul du SAR et du %Na sont présentées dans la sous-section relative aux diagrammes de classification (IV.2.3), où ces indicateurs sont combinés à la conductivité électrique pour qualifier les eaux d'irrigation.

IV.1.3 Diagrammes de classification :

➤ *Diagramme de Richards :*

Ce diagramme est essentiellement utilisé pour évaluer le risque de salinisation des sols. Il utilise pour cela la conductivité électrique (CE) ou la charge totale dissoute, toutes deux relative à la salinité de l'eau, et l'indice d'adsorption du sodium (SAR) aussi appelé "pouvoir alcalisant" qui est une mesure du risque de la sodisation du sol du fait de l'irrigation.

Le diagramme est découpé en quatre classes de salinité (axe des abscisses) et quatre classes de risques de sodisation (axe des ordonnées) (Tab. IV.1, Fig. IV.1). Le SAR est donné par la formule ci-dessous (Bouakkaz .2020):

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

Ou

SAR : Sodium Adsorption Ratio

Na⁺, Ca²⁺ et Mg²⁺ : concentrations exprimées en meq/l.

Tableau IV.1 : Classification des eaux d'irrigation à partir de ses qualités (Bouakkaz, 2020).

	Qualités	Classes	L'état d'utilisation
1 ^{ère}	Excellente	C ₁ S ₁	Eaux utilisables sans danger pour l'irrigation pour la plupart des cultures, sur la plupart des sols.
2 ^{ème}	Bonne	C ₂ S ₁ C ₁ S ₂	En général, eau pouvant être utilisée sans contrôle particulier pour l'irrigation des plantes moyennement tolérantes aux sels sur sol.
3 ^{ème}	Admissible	C ₃ S ₁ C ₂ S ₃ C ₃ S ₂	En général, eau convenant à l'irrigation des cultures tolérantes aux sels sur sol bien drainés. L'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée.
4 ^{ème}	Médiocre	C ₄ S ₁ C ₄ S ₂ C ₃ S ₃	Eau fortement minéralisée pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes aux sels sur sol et bien drainés.
5 ^{ème}	Mauvaise	C ₃ S ₄ C ₄ S ₃ C ₄ S ₄	Eau ne convenant pas généralement à l'irrigation mais pouvant être utilisée sous certaines conditions : sol très perméable, bien lessivé, plantes tolérantes aux sels.

➤ **Diagramme de Wilcox :**

Le pourcentage de sodium (% Na) est basé sur la concentration totale des sels dissous et le pourcentage de sodium par rapport aux autres sels dans l'eau (Fig. IV.2). Il est calculé par la formule suivante (Wilcox 1955) :

$$\%Na^{+} = \frac{(Na^{+} + K^{+})}{(Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^{+} + K^{+})}$$

Où toutes les concentrations, d'ions doivent impérativement être exprimées en milliéquivalents par litre (méq/l).

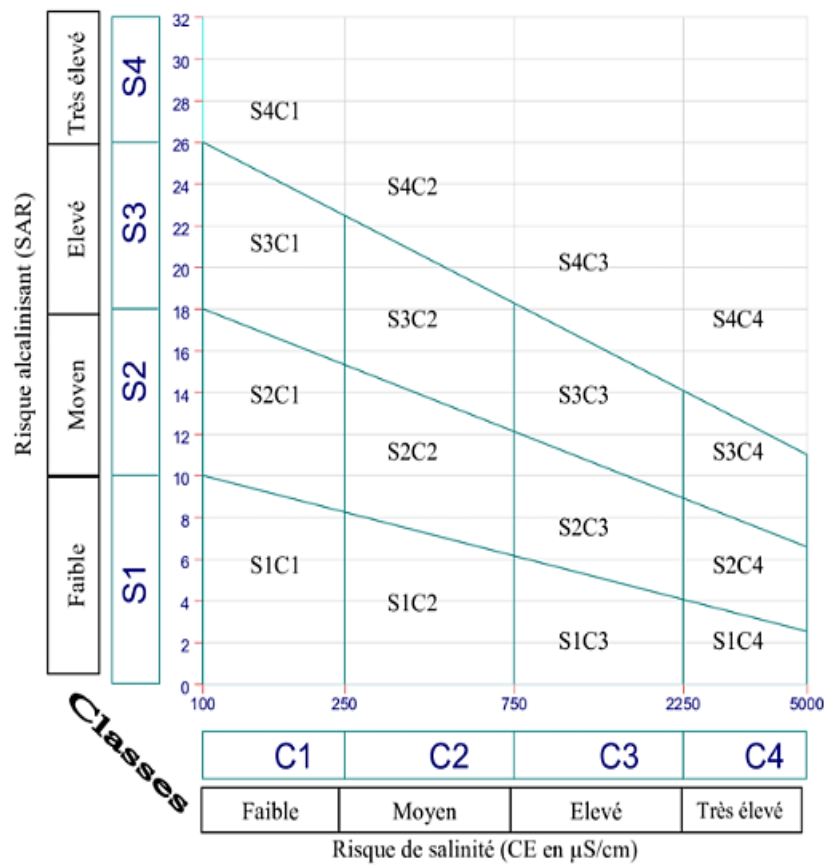


Figure IV.1 : Diagramme de Riverside (Richards, 1954).

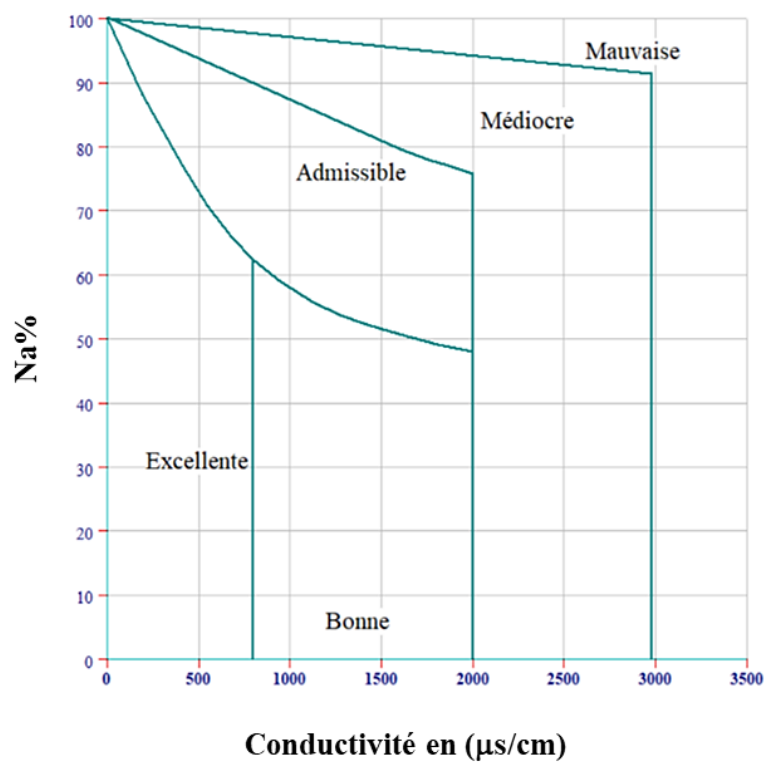


Figure IV.2 : Diagramme de Wilcox (Wilcox, 1955).

IV.1.4. Résultats de l'aptitude à l'irrigation :

La région d'étude est caractérisée par un climat méditerranéen, qui a contribué à la diversité des cultures dans la région, ce développement a contribué à étendre les zones agricoles à l'intérieures de la plaine, comme il a atteint en 2014 à 5172 ha (Hammadi et Harendi, 2015).

Les différentes pratiques agricoles et la mise en place de nombreux systèmes d'irrigation ont eu un effet sur la qualité des eaux souterraines, particulièrement celle qui regagnent la nappe par l'irrigation, il est à noter que les sels minéraux contenus dans l'eau ont un impact sur le sol (sa perméabilité et son aération), (Aouata, 2015). Dans cette optique, nous avons mis en évidence l'évaluation de l'aptitude des eaux à l'irrigation des eaux de surface d'Oued El Nil et sa nappe alluviale, à travers l'évaluation du risque de salinisation (concentrations des sels dissous) et de sodification des sols (pourcentage en sodium). (Bouakkaz, 2020).

IV.3.1 Les eaux de surface :

➤ Diagramme de Richards :

L'évaluation de l'aptitude à l'irrigation des eaux de surface, réalisée à l'aide du diagramme de Riverside (Fig. IV.3), a permis de classer les échantillons selon les normes du tableau IV.1.

- En Avril 2015, la majorité des points d'eau se situait dans la classe C2S1 (bonne qualité), avec des conductivités comprises entre 250 et 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et un SAR inférieur à 10, indiquant des eaux utilisables sans contrôle particulier pour l'irrigation des plantes moyennement tolérantes aux sels.
- En Avril 2022, on observe une évolution vers la classe C3S1 (qualité admissible) pour certains points, caractérisée par des conductivités plus élevées (750 à 2250 $\mu\text{S}/\text{cm}$) tout en conservant un faible risque alcalin ($\text{SAR} < 10$). Cette légère dégradation, bien que ne compromettant pas gravement l'usage agricole, impose désormais de réserver ces eaux aux cultures tolérantes aux sels et de veiller à un bon drainage des sols, avec un contrôle régulier de l'évolution de la salinité. Aucun échantillon n'a atteint les classes médiocres (C4) ou mauvaises (S2 à S4). Cette tendance à la hausse de la minéralisation reflète probablement l'impact des activités anthropiques (engrais, lessivage des sols, rejets domestiques) et justifie une surveillance périodique pour préserver la ressource à long terme.

➤ Diagramme de Wilcox:

D'après les résultats de la localisation des échantillons d'eau de surface sur le diagramme de Wilcox pour l'irrigation (Fig. IV.4), il apparaît :

- Campagne d'Avril 2015 : les points correspondants (probablement les numéros les plus bas) montrent des valeurs de CE modérées (entre 200 et 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et des % Na très faibles (< 40 %), ce qui confirme une excellente qualité pour l'irrigation.
- Campagne d'Avril 2022 : les points (numéros plus élevés) présentent une légère augmentation de la CE (jusqu'à environ 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et du % Na (jusqu'à près de 60 %), mais restent toujours dans la classe « Excellente à bonne ». Cette évolution traduit une légère dégradation, sans toutefois sortir du domaine de bonne qualité.

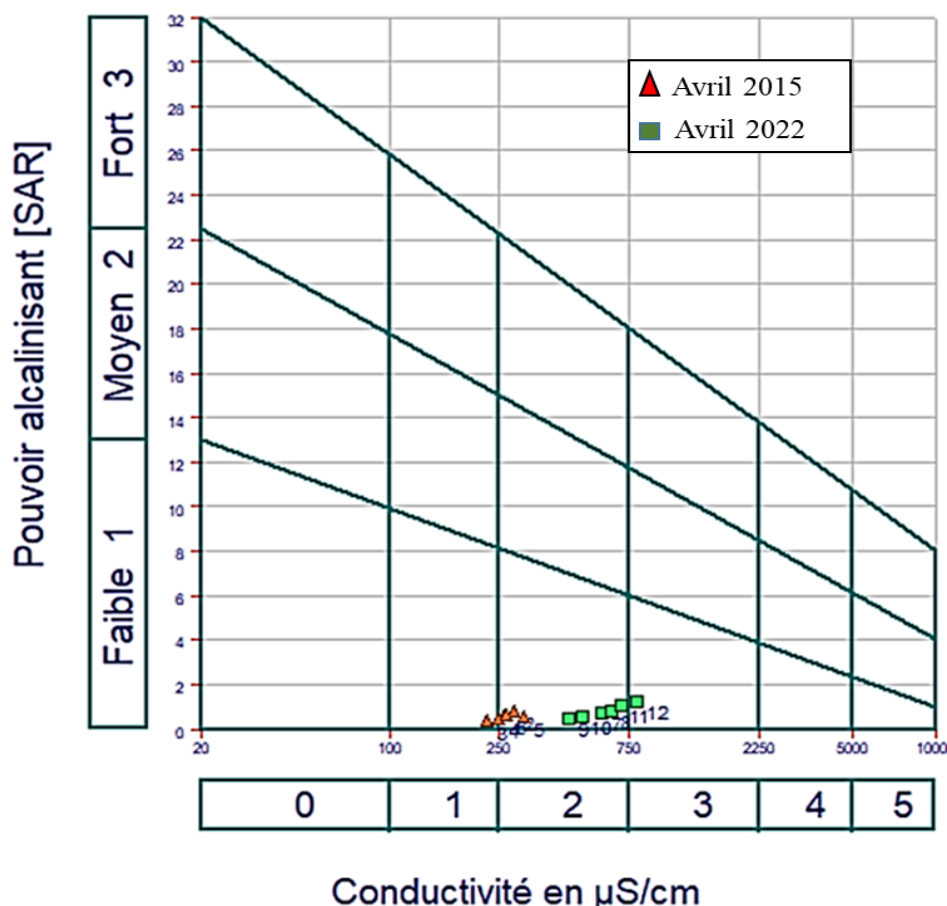


Figure IV.3 : Classification des eaux de surface d'Oued El Nil selon le schéma de Riverside.

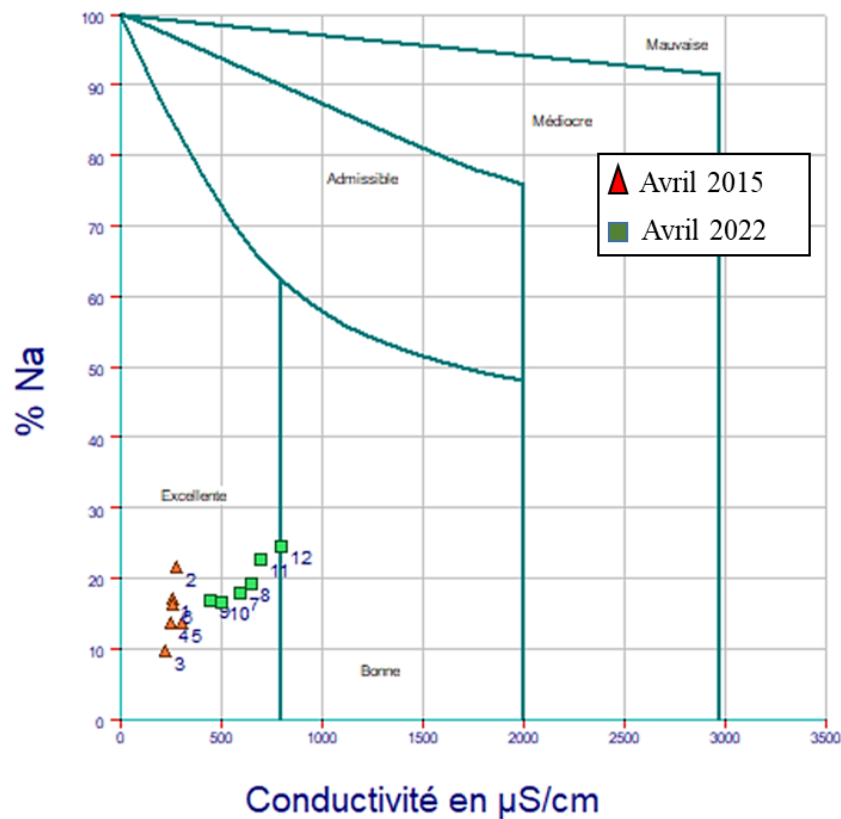


Figure IV.4 : Classification des eaux surface selon le diagramme de Wilcox.

IV.3.2. Les eaux souterraines :

➤ Diagramme de Richards :

L'aptitude à l'irrigation des eaux de souterraine de la plaine alluviale d'Oued El Nil a été évaluée à l'aide du diagramme de Riverside (Fig. IV.5). La majorité des échantillons se situe dans la zone C2S1 (bonne qualité) : ils présentent une CE comprise entre 250 et 750 $\mu\text{S/cm}$ et un SAR inférieur à 10, ce qui correspond à des eaux utilisables sans contrôle particulier pour l'irrigation des plantes moyennement tolérantes aux sels. Deux points se placent dans la classe C3S1 (qualité admissible), avec une CE légèrement plus élevée (750 – 1500 $\mu\text{S/cm}$) mais un SAR toujours faible (S1) ; ces eaux ne conviennent qu'aux cultures tolérantes aux sels et nécessitent un bon drainage du sol ainsi qu'une surveillance régulière de la salinité.

Aucun point n'atteint des SAR dangereux (S2 ou S3), ce qui exclut tout risque d'alcalinisation des sols. En revanche, la conductivité électrique augmente nettement entre 2015 et 2022, faisant glisser certains points de la classe C2 vers la classe C3. Cette évolution traduit une légère dégradation de la qualité, avec un risque de salinisation progressive qui impose désormais de sélectionner des cultures tolérantes aux sels et de veiller à un bon drainage des sols.

➤ Diagramme de Wilcox :

L'évaluation de l'aptitude à l'irrigation des eaux souterraines, réalisée à l'aide du diagramme de Wilcox (Fig.IV.6) :

- En Avril 2015, la totalité des points se situe dans la zone « Excellente à bonne », avec une CE inférieure à 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et un %Na inférieur à 40 %. Ces eaux étaient alors parfaitement adaptées à l'irrigation sans restriction.
- En Avril 2022, on observe un déplacement net de plusieurs points vers des conductivités plus élevées (jusqu'à 1 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et des %Na atteignant 60 %, tout en restant encore majoritairement dans la classe « Excellente à bonne ». Un seul point (probablement F3) s'approche de la zone « Admissible », signalant une légère dégradation.

Ainsi, les eaux souterraines restent globalement aptes à l'irrigation, mais la tendance à la hausse de la salinité et du sodium justifie une surveillance régulière.

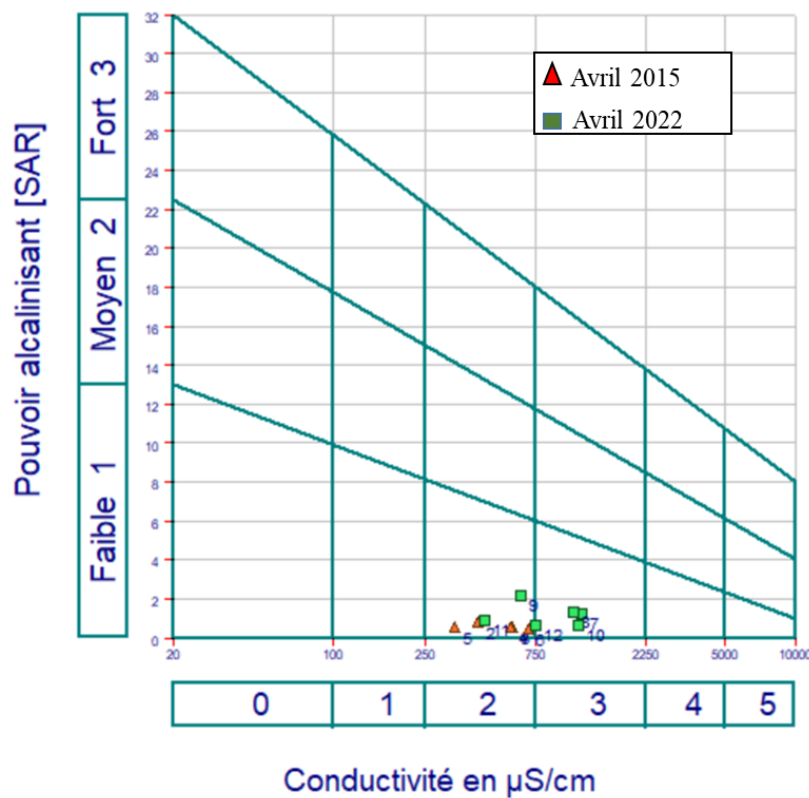


Figure IV.5 : Classification des eaux souterraines de la plaine alluviale d'Oued El Nil selon le diagramme de Riverside.

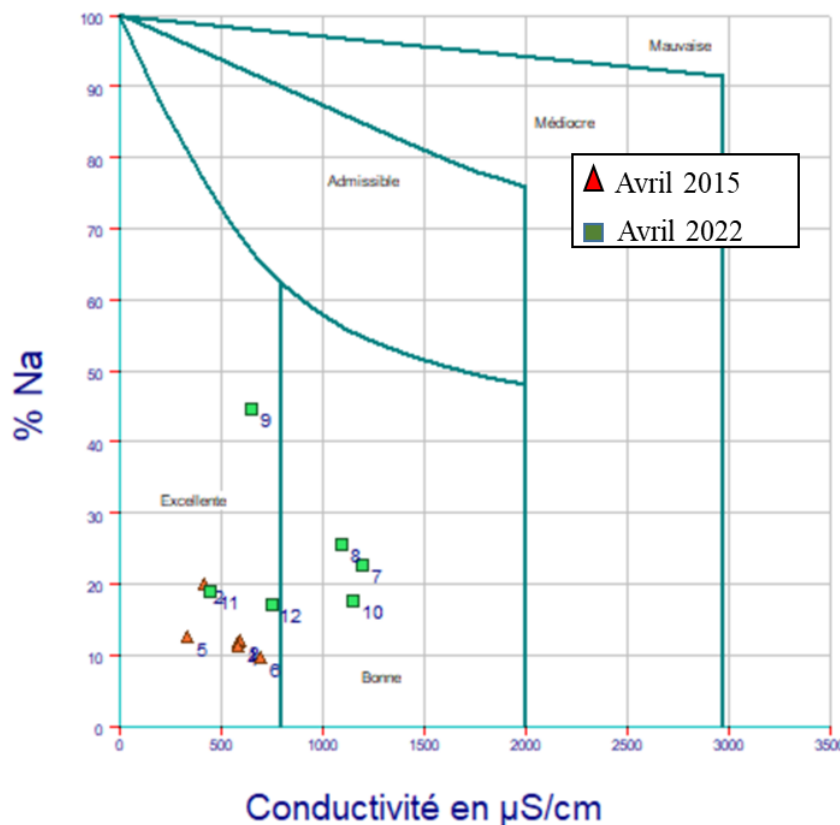


Figure IV.6 : Classification des eaux souterraines de la plaine alluviale d'Oued El Nil selon le diagramme de Wilcox.

IV.4.Relation entre eaux de surface et eaux souterraines :

L'analyse croisée des résultats obtenus sur les eaux de surface (chapitre 2) et sur les eaux souterraines (chapitre 3) de la plaine alluviale d'Oued El Nil met en évidence des trajectoires évolutives distinctes mais étroitement couplées, reflétant les interactions hydrologiques entre les deux compartiments.

- En 2015, les corrélations entre paramètres sont modérées à faibles (Fig. IV.7), avec des coefficients de Pearson (r) souvent compris entre 0,4 et 0,7. La conductivité électrique (CE) est bien corrélée avec le magnésium (Mg^{2+} , $r = 0,84$) et le potassium (K^+ , $r = 0,79$), ce qui traduit la dominance naturelle des roches métamorphiques magnésiennes (schistes, micaschistes) et de l'altération des argiles, conformément à la géologie décrite au chapitre 1. Les premiers signes d'influence anthropique apparaissent avec la corrélation CE/Cl^- ($r = 0,73$), mais ils restent encore limités. La corrélation négative entre le calcium et le magnésium (Ca^{2+}/Mg^{2+}) est faible ($r = -0,28$), indiquant que l'inversion cationique n'est pas encore marquée. Globalement, la signature naturelle domine encore largement en 2015.
- En 2022, les corrélations deviennent très fortes, avec des coefficients souvent supérieurs à 0,85 (Fig. IV.8). La conductivité électrique (CE) est fortement corrélée avec le calcium (Ca^{2+} , $r = 0,85$),

le sodium (Na^+ , $r = 0,86$), les chlorures (Cl^- , $r = 0,92$) et les sulfates (SO_4^{2-} , $r = 0,94$). Cette évolution indique que la minéralisation des eaux est désormais dominée par des apports anthropiques : engrais potassiques (KCl) et sulfatés (K_2SO_4 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$), rejets domestiques (lessives, eaux usées) et chaulage agricole. La corrélation très forte entre Na^+ et Cl^- ($r = 0,91$) confirme l'origine domestique de ces ions. Par ailleurs, la corrélation négative entre Ca^{2+} et Mg^{2+} atteint $r = -0,75$, traduisant une inversion cationique marquée par précipitation de la dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) en milieu alcalin, conformément aux processus géochimiques décrits au chapitre 1.

IV.4.1. Evolution entre 2015 et 2022 :

Entre 2015 et 2022, la structure des corrélations se réorganise complètement : on passe d'un système dominé par les processus naturels (altération des roches métamorphiques et carbonatées) à un système dominé par les pollutions anthropiques (engrais, eaux usées, chaulage). Les coefficients de corrélation augmentent fortement, et des groupes cohérents de paramètres (CE, Ca^{2+} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-}) apparaissent, signant une origine commune des éléments chimiques. L'inversion cationique ($\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ négative) s'accroît nettement, et le pH montre une tendance à l'alcalinisation sous l'effet des rejets. Cette évolution confirme une dégradation chimique rapide et généralisée des eaux de surface et souterraines de la plaine d'Oued El Nil entre 2015 et 2022.

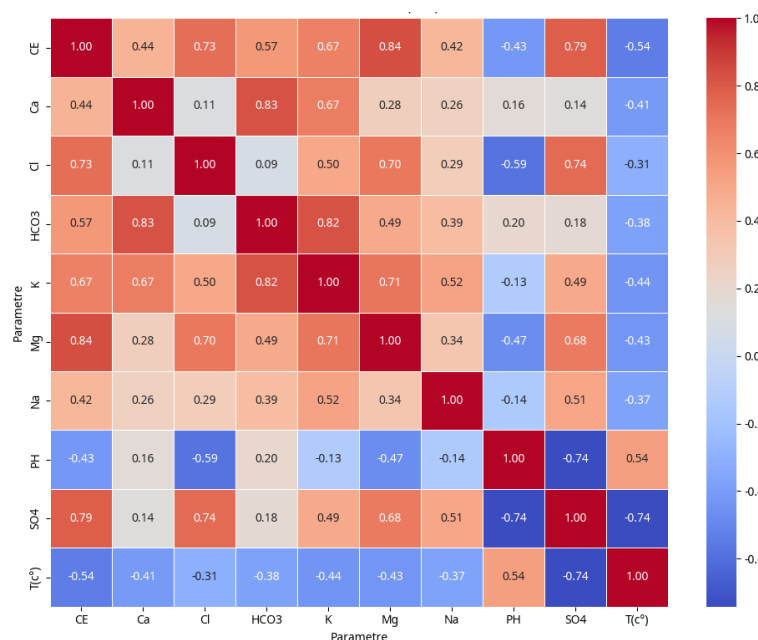


Figure IV.7 : Matrice de corrélation entre les paramètres physico-chimiques des eaux de surface et souterraines – Avril 2015.

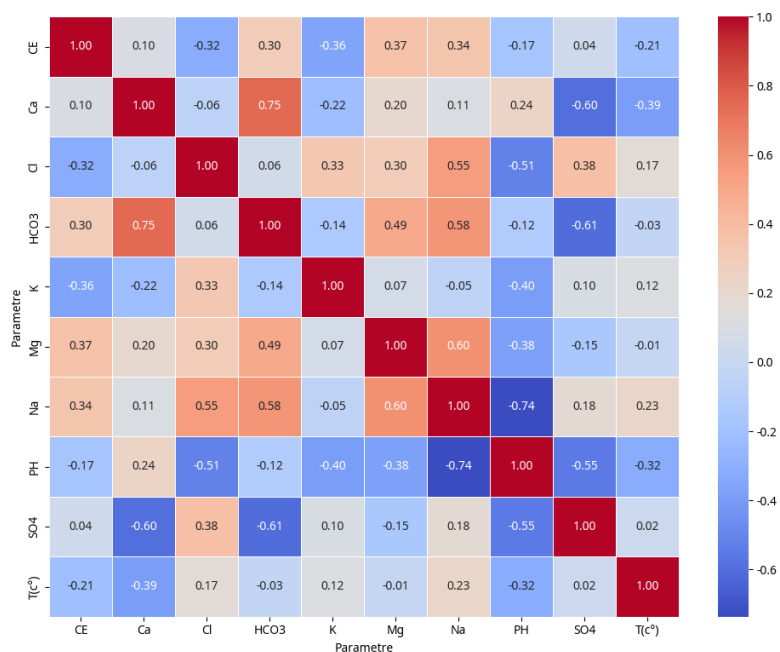


Figure IV.8 : Matrice de corrélation entre les paramètres physico-chimiques des eaux de surface et souterraines – Avril 2022.

IV.5. Schéma conceptuel des interactions :

Le schéma conceptuel ci-dessous (Fig. IV.9) résume les interactions entre les eaux de surface et les eaux souterraines de l'Oued El Nil.

IV.5.1. Sources de Pression (Bloc Orange) :

Cette étape représente les activités humaines qui exercent une pression significative sur l'environnement de la plaine alluviale d'Oued El Nil. L'agriculture intensive contribue par l'utilisation d'engrais et de pesticides, tandis que l'urbanisation et le développement industriel génèrent des rejets domestiques et industriels. Ces activités sont les principaux moteurs de la contamination des ressources en eau, comme le montrent les augmentations de la conductivité électrique et des concentrations ioniques entre 2015 et 2022.

IV.5.2. Milieux Aquatiques (Bloc bleu) :

Ce bloc illustre les deux principaux compartiments hydrologiques : les eaux de surface (Oued El Nil et ses affluents) et les eaux souterraines (nappe alluviale). Les eaux de surface reçoivent directement les apports polluants des activités humaines. Elles s'infiltrent ensuite préférentiellement vers la nappe souterraine, transférant ainsi une partie de leur charge polluante. L'aquifère joue un rôle tampon, diluant ou adsorbant certains polluants, mais les tendances de dégradation observées en surface se répercutent, bien qu'atténuées, dans la nappe.

IV.5.3. Impacts (Bloc rouge) :

Cette dernière étape met en évidence les conséquences de la dégradation de la qualité de l'eau. La contamination entraîne une dégradation de la qualité de l'eau elle-même, se manifestant par une salinisation et une alcalinisation des sols irrigués. Ces phénomènes ont des impacts directs sur les sols et les cultures, pouvant nuire à la croissance des végétaux et réduire les rendements agricoles. Une surveillance régulière et des ajustements des pratiques agricoles sont nécessaires pour atténuer ces effets.

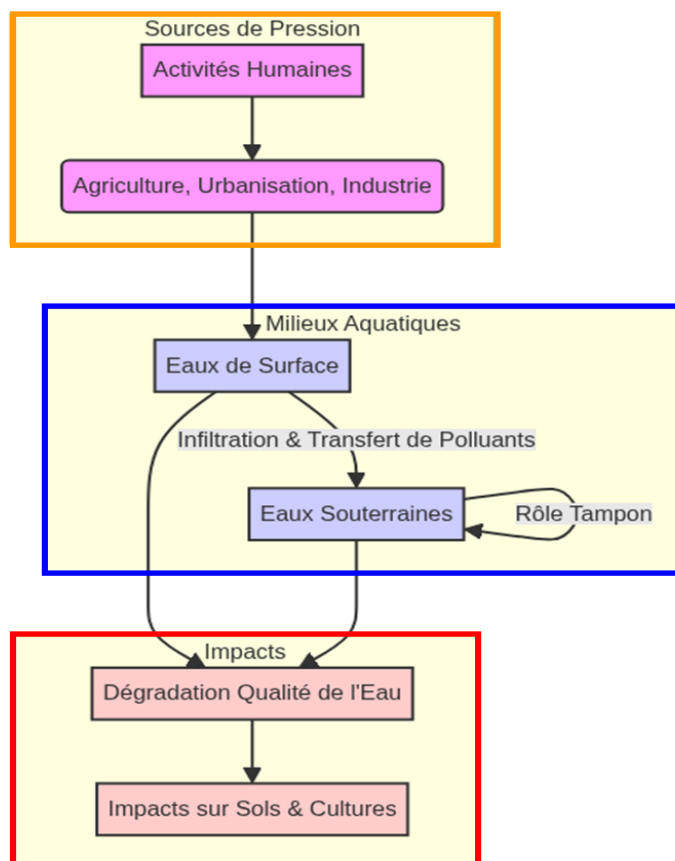


Figure IV.9 : Schéma conceptuel des interactions.

IV.6. Limites et perspectives :

Cette étude présente des limites qu'il convient de reconnaître afin d'orienter les recherches futures.

VI.6.1 .Limites des données disponibles :

- Seules deux campagnes (avril 2015 et avril 2022) ont été analysées, ce qui ne permet pas de distinguer les variations saisonnières des tendances pluriannuelles. Un suivi à pas de temps plus resserré (au moins 4-6 dates) est recommandé.

- L'absence de mesures de pesticides, de matières organiques, de métaux lourds (Cd, Pb, Cu, Zn) et de coliformes fécaux empêche d'évaluer les risques sanitaires et l'impact des effluents industriels spécifiques.
- Les débits des eaux de surface et les niveaux piézométriques n'ont pas été mesurés simultanément, limitant la quantification des flux de pollution et des temps de transfert.

VI.6.2. Perspectives de recherche :

- Modélisation hydrochimique : Utiliser des codes tels que PHREEQC pour simuler l'évolution de la chimie des eaux le long du trajet surface-nappe, en intégrant les réactions d'échange d'ions, de dissolution/précipitation des carbonates et de dénitrification.
- Traçage isotopique : Analyser les isotopes du nitrate ($\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{18}\text{O}$) pour discriminer les sources de pollution (engrais, lisiers, eaux usées) ; le strontium ou le bore pour identifier l'origine des sels.
- Observatoire permanent : Installer des stations automatiques de mesure en continu (CE, pH, température) sur l'Oued et dans quelques puits, avec prélèvements mensuels sur au moins trois ans.
- Étude d'impact sur les sols : Échantillonner les sols irrigués (profils 0-30, 30-60, 60-100 cm) pour mesurer le stock de sels (CE du sol, sodium échangeable) et évaluer l'état de dégradation physique (stabilité des agrégats, perméabilité).
- Cartographie du risque : Élaborer des cartes de vulnérabilité de la nappe (méthode DRASTIC) et des zones d'usage de l'eau pour l'irrigation, en croisant les classes de qualité avec les types de sols et les cultures existantes.

Malgré ces limites, ce travail fournit une base solide pour la gestion de la ressource en eau dans la plaine d'Oued El Nil. Les tendances claires de dégradation (particulièrement en surface) et l'interaction étroite entre les deux compartiments démontrée appellent à une action rapide et coordonnée. Les perspectives ouvertes permettront d'affiner les diagnostics et d'accompagner les décideurs vers une agriculture durable et une protection efficace des eaux souterraines.

Conclusion :

L'évaluation de l'aptitude à l'irrigation des eaux de surface et souterraines d'Oued El Nil (2015-2022) à l'aide des diagrammes de Riverside et Wilcox montre un basculement des eaux de surface de la classe C2S1 (bonne qualité) vers C3S1 (admissible) en 2022, lié à l'augmentation de la conductivité électrique (CE jusqu'à 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$) tandis que le SAR reste faible (<10), imposant l'usage de cultures tolérantes aux sels et un drainage efficace ; les eaux souterraines,

majoritairement C2S1, présentent quelques points en C3S1.

La contamination suit un sens univoque de la surface vers la nappe par infiltration à travers les alluvions, la nappe jouant un rôle tampon (dilution, échanges cationiques, précipitation des carbonates, dénitrification) mais enregistrant une dégradation chronique (hausse modérée mais persistante de Ca^{2+} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-}). En conséquence, une surveillance renforcée, une réduction des intrants agricoles (engrais KCl , K_2SO_4), un traitement des eaux usées et une protection des zones de recharge s'imposent, nonobstant les limites de l'étude (deux campagnes, absence de données sur pesticides et métaux lourds) qui appellent des recherches futures (modélisation hydrochimique, traçage isotopique, observatoire permanent).

Conclusion générale

Conclusion générale

L'analyse de l'évolution temporelle entre 2015 et 2022 de la qualité chimique des eaux de surface et souterraines de la plaine alluviale d'Oued El Nil (Jijel), fondée sur une recherche documentaire et l'exploitation de deux campagnes de prélèvement (six stations de surface P1-P6 et six puits F1-F6), a mis en évidence une dégradation marquée mais contrastée des deux compartiments hydrologiques.

Les eaux de surface ont subi une minéralisation très forte : la conductivité électrique a doublé ou triplé (jusqu'à 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$), les concentrations en calcium, chlorures, sulfates et sodium ont augmenté de manière spectaculaire (jusqu'à $\times 4$ pour les sulfates), tandis que le magnésium a chuté (jusqu'à -78% à P3). Le faciès hydrochimique a basculé d'un type bicarbonaté naturel (magnésien ou calcique) en 2015 vers un faciès mixte $\text{Ca}-(\text{HCO}_3\text{-Cl-SO}_4)$ en 2022, traduisant une contamination anthropique par les engrais (KCl , K_2SO_4 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) et les rejets domestiques et industriels. Les rapports ioniques (Na/Cl , Ca/Mg , $(\text{Ca}+\text{Mg})/(\text{HCO}_3+\text{SO}_4)$) et les diagrammes de Piper et Schoeller confirment cette inversion cationique ($\text{Mg} \rightarrow \text{Ca}$) et l'origine anthropique de la salinisation.

Les eaux souterraines présentent une évolution plus modérée mais qualitativement similaire : hausses modérées de Ca^{2+} (max 118 mg/L), Na^+ (75 mg/L), Cl^- (74 mg/L) et SO_4^{2-} (90 mg/L), baisse généralisée du Mg^{2+} . Tous les paramètres restent très inférieurs aux normes JORA 2011, le seul dépassement concernant le pH au puits F3 (5,5 acide). Les faciès évoluent d'un état bicarbonaté magnésien naturel vers des faciès mixtes, signe d'une anthropisation progressive.

L'aptitude à l'irrigation, évaluée par les diagrammes de Riverside (SAR/CE) et de Wilcox ($\%\text{Na}$), montre un basculement des eaux de surface de la classe C2S1 (bonne) vers C3S1 (admissible) en 2022, imposant l'usage de cultures tolérantes aux sels et un drainage efficace. Les eaux souterraines restent majoritairement C2S1, avec quelques points en C3S1. L'acidification locale nécessite un chaulage.

La comparaison des deux compartiments démontre une interdépendance étroite et un sens de contamination univoque de la surface vers la nappe, par infiltration à travers les alluvions perméables. L'aquifère joue un rôle tampon (dilution, échanges cationiques, précipitation des carbonates, dénitrification), mais la persistance des hausses (même modérées) de Ca^{2+} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} constitue un signal d'alerte précoce.

En conséquence, une surveillance renforcée (bimestrielle) des paramètres clés (CE , pH, ions majeurs, SAR) est indispensable. Les actions prioritaires incluent la réduction des intrants agricoles (engrais KCl , K_2SO_4), le traitement des eaux usées domestiques et industrielles, la protection des zones de recharge de la nappe, et la sensibilisation des agriculteurs. Les principales

limites de l'étude (deux campagnes seulement, absence de données sur pesticides, métaux lourds et débits) appellent des recherches futures : modélisation hydrochimique (PHREEQC), traçage isotopique, observatoire permanent, étude d'impact sur les sols et cartographie du risque.

Références bibliographiques

Références

- Bouakkaz, R et Zentout, W.(2020). Impact des activités agricoles sur l'environnement ; cas de la plaine alluviale d'oued Nil (Jijel N_E Algérien). Mémoire de Master, Université de Jijel.
- Bouazize, S et Djehinet, A. (2020). Contribution à l'étude de la contamination des eaux par les ETM et les pesticides. Cas de la plaine alluviale d'oued Nil (Jijel, N-E Algérien). Mémoire de Master, Université de Jijel.
- Boufenara, K. (2015). L'urbanisation des plaines littorales et ses impacts : cas de la plaine de Jijel. Thèse de Doctorat, Université de Constantine.
- Boussif, I. (2022). Qualité des eaux destinées à l'alimentation en eau potable de la nappe alluviale de l'oued el Nil (wilaya de Jijel), Mémoire de Master, Université de Jijel.
- Chambre d'Agriculture de la Wilaya de Jijel (CAW). (2012). Présentation de la wilaya : Hydraulique agricole. Récupéré sur le site officiel de la CAW Jijel.
- De Villers, J., Squilbin, M., & Yourassowsky, C. (2005). Qualité physico-chimique et chimique des eaux de surface : cadre général (Fiche n° 2). Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement (IBGE) / Observatoire des Données de l'Environnement, Bruxelles.
- Elie, P. (2005). Évaluation de la minéralisation et de la conductivité des eaux de boisson : Guide pratique de classification. Cemagref / Groupement de Bordeaux, Direction des Ressources en Eau.
- Fennourer, M et Mahmoud, K. (2020). Etude des processus hydrologiques et hydrochimiques des eaux de surface du bassin versant d'Oued Nil (Jijel N-E Algérien). Mémoire de Master, Université de Jijel.
- Later, L et Terki, T. (1998). Contribution à l'étude hydrogéologique et modélisation de la plaine de l'oued Djendjen (wilaya de Jijel). Mémoire d'ingénieur. Université de Constantine, Algérie.
- Loyer, J. Y. (1993). Les sols salés et les processus de salinisation. Editions de l'ORSTOM/IRD.
- Mahdid, S. (2015). Caractérisation hydrodynamique et hydrochimique de la plaine alluviale d'Oued Nil (wilaya de Jijel, N-E Algérien). Mémoire de Master, Université de Jijel.
- Mahmoud, I. (2020). Étude des processus hydrologiques et hydrochimiques des eaux de surface du bassin versant d'Oued Nil (Jijel N-E Algérien). Mémoire de Master, Université de Jijel.
- Meybeck, M. (1983). Contribution à l'étude hydrologique du bassin versant de l'Oued Nil. Thèse de Doctorat, Université de Constantine.
- Mimoune, M et Bourkoua, A. (2016). Fonctionnement hydrodynamique et hydrochimique des aquifères de la plaine alluviale de l'oued Nil (Wilaya de Jijel). Mémoire de Master, Université de Jijel.
- Richards, L. A. (1954). Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. United States

Department of Agriculture (USDA), Soil and Water Conservation Research Branch, Agricultural Research Service.

Rodier, J., Legube, B., Merlet, N., & coll. (2009). L'analyse de l'eau : Eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer(9e éd.). Dunod, Paris.

Wilcox, L. V. (1955). Classification and Use of Irrigation Waters. U.S. Department of Agriculture, Circular No. 969. Washington, D.C.

Site internet :

[DZ 18 Districts Numbers Of Jijel Province - Daïras de la wilaya de Jijel — Wikipédia](#)

Tableau de norme JORA 2011 :

Pareametre	Norme de JORA 2011
T(c°)	25 °c
PH	Min=6.5/ Max=9.5
CE	3000 (μS/cm)
Ca ²⁺	200 (mg/l)
Mg ²⁺	150 (mg/l)
Na ⁺	200 (mg/l)
K ⁺	12 (mg/l)
HCO ₃ ⁻	500 (mg/l)
Cl ⁻	500 (mg/l)
SO ₄ ²⁻	400 (mg/l)
NO ₃ ⁻	200 (mg/l)