

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique Université 8 Mai 1945 Guelma



Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et Sciences de la Terre et de l'Univers
Département d'Ecologie et Génie de l'Environnement
Laboratoire de domiciliation Laboratoire de Biologie, Eau et Environnement (LBEE)

THÈSE

En Vue de L'Obtention du Diplôme de
Doctorat en Troisième Cycle

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie Filière : Ecologie et Environnement

Spécialité : Eco-éthologie

Présentée par

MAHDID Benaïssa

Intitulée

Effet de la qualité des eaux d'irrigation sur le sol et les plantes des terres agricoles au Nord-est Algérien (Cas de Oued k'sob région de M'sila)

Soutenue le : 19 Décembre 2024

Devant le Jury composé de :

Nom et Prénom	Grade		
Mr. HOUHAMDI Moussa	Prof.	Univ. de Guelma	Président
Mr. GUEROUI Yassine	MCA	Univ. de Guelma	Encadreur
Mr. GUETTAF Mohamed	MCA	Univ. de Guelma	Co-encadreur
Mme. BOUALLEG Chahinez	Prof.	Univ. de Souk Ahras	Examinatrice
Mr. GHRIEB Lassaad	Prof.	Univ. de Guelma	Examinateur
Mme. BENOSMANE Sana	MCA	Univ. de Guelma	Examinatrice

Année Universitaire : 2024-2025

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je remercie profondément le bon Dieu, le Tout-Puissant, pour m'avoir accordé la foi, le courage, la santé et la volonté nécessaires pour entreprendre et mener à bien cette thèse. Ce travail est le fruit de cinq années d'efforts intenses, au cours desquelles j'ai eu la chance de rencontrer des personnes dont l'aide et les encouragements ont été déterminants.

Je remercie particulièrement les professeurs et maîtres de conférences qui ont accepté de faire partie du jury de soutenance : Monsieur Moussa HOUHAMDI, professeur à l'Université de Guelma, qui a bien voulu présider le jury, et Madame Chahinez BOUALLEG, professeur à l'Université de Souk Ahras, pour l'honneur qu'il m'a fait en évaluant ce travail. Mes remerciements s'adressent également à Monsieur Lassaad GHRIEB, professeur à l'Université de Guelma, au Dr. Sana BENOSMANE, maître de conférences (A) à l'Université de Guelma, et à pour leur précieuse contribution à l'examen de cette thèse.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude aux Messieurs Yassine GUEROUI et Mohamed GUETTAF, Maîtres de conférences (A) à la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Sciences de la Terre et de l'Univers à l'Université 8 Mai 1945 de Guelma, qui m'ont fait l'honneur de diriger cette thèse et ont grandement contribué à sa réussite. Vos précieux conseils ont guidé et éclairé ce travail, et je vous adresse ici l'expression de ma reconnaissance, de mon profond respect et de ma sincère gratitude.

Je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance aux messieurs Pr. Ammar MAOUI, Dr. Sofiane BOUDALIA et Dr. Aissam BOUSBIA, enseignants à la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Sciences de la Terre et de l'Univers à l'Université 8 Mai 1945 de Guelma pour leurs aide précieuse, ses encouragements et ses qualités humaines et professionnelles qui ont grandement facilité mon travail de thèse.

Enfin, je remercie vivement Pr. Nouidjem YASSINE, Pr. Mouslim BARA, Dr. Zehba RABAH et mon frère Dr. Hassen TOUATI pour leurs soutiens et ses encouragements tout au long de ce travail.

Je tiens à exprimer mes plus sincères remerciements à toute ma famille, en particulier à mes parents qui m'ont soutenu face aux difficultés rencontrées durant ma période d'études, à mes frères et sœurs.

Résumé

En Algérie, la qualité médiocre des eaux et le manque de ressources en eau pour l'irrigation représentent un défi majeur pour préserver la production agricole, surtout dans les régions arides et semi-arides du pays. Une étude a été menée dans la région de K'sob, près de M'sila, où les terres agricoles sont irriguées par les eaux de l'Oued K'sob, alimenté par le barrage de K'sob. Des échantillons d'eau et du sol ont été prélevés dans dix stations d'eau et quatre parcelles du sol, en suivant trois cultures : fève, tomate, poivron, afin d'étudier la qualité physicochimique des eaux d'irrigation, les caractéristiques des sols de la région, ainsi que leurs effets sur la croissance et la productivité des cultures. Les résultats obtenus montrent une forte salinité des eaux (0.1 % - 3.9 %), une minéralisation élevée (TDS 794-4 120 mg/l, CE 1 589-7 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et une pollution marquée par les nitrates et nitrites. Selon le diagramme de Piper, les eaux de l'Oued K'sob présentent un faciès chimique chloruré sodique et potassique ou sulfatée sodique. Ainsi, les concentrations en (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^-) présentent des valeurs élevées, ce qui confirme la dominance du faciès chloruré sodique et potassique. L'analyse granulométrique montre que le sol présente une fraction limono-argileuse dominante et une faible fraction limono-sableuse. La salinité est bien marquée et le pH oscille entre alcalin et très alcalin, alors que la teneur en matière organique est élevée. Les bases échangeables montrent une forte concentration de ($\text{Ca}^{+2} > 20\%$) et ($\text{K}^{+2} > 0,4\%$) et des valeurs modérées pour (Mg^{+2} , Na^+). L'analyse des éléments des traces métalliques (ETM) montrent que les concentrations en fer, cuivre, aluminium, manganèse et cobalt dépassent les normes établies par l'OMS, tandis que les niveaux de zinc, chrome, titane et nickel restent conformes aux normes. D'autre part, l'impact des eaux d'irrigation sur le rendement des plantes cultivées dans la région de K'sob montre que les cultures de fèves sont les mieux adaptées, présentant des résultats proches de ceux de l'échantillon témoin avec un bon rendement. Les poivrons, bien que moins performants, montrent des rendements acceptables, tandis que les tomates affichent les rendements les plus faibles. Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude soulignent la nécessité d'améliorer la gestion des eaux de surface dans une optique de développement durable, pour garantir une meilleure qualité d'eau d'irrigation, optimiser les rendements des cultures et diminuer la pollution.

Mots clés : Eau d'irrigation, Oued K'sob, Région de M'sila, Pollution de l'eau, Salinité de l'eau, Sol agricole, Pollution des sols, Plantes cultivées, Nord-Est Algérie.

Abstract

In Algeria, poor water quality and lack of water resources for irrigation represent a major challenge for preserving agricultural production, especially in arid and semi-arid areas. The present study was carried out in the K'sob region, near M'sila, where farmland is irrigated by water from the Oued K'sob, fed by the K'sob dam. Water and soil samples were taken from ten water stations and four soil plots, following three crops: broad bean, tomato and bell pepper, in order to study the physicochemical quality of irrigation water, soil characteristics, and their effect on crop growth and productivity. The results obtained show high water salinity (0.1% - 3.9%), high mineralization (TDS 794-4 120 mg/l, EC 1,589-7 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$) and marked nitrate and nitrite pollution. According to Piper diagram, Oued K'sob water has a sodium chloride and potassium or sodium sulfate chemical facies. Thus, the concentrations of (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^-) show high values, confirming the dominance of the sodium-potassium chloride facies. Granulometric analysis shows that the soil has a dominant silty-clay fraction and a low silty-sandy fraction. Salinity is well marked and pH fluctuates between alkaline and very alkaline, while organic matter content is high. Exchangeable bases show high concentrations of ($\text{Ca}^+ > 20\%$) and ($\text{K}^+ > 0.4\%$) and moderate values for (Mg^{+2} , Na^+). Analysis of trace metal elements (TME) shows that concentrations of iron, copper, aluminum, manganese and cobalt exceed WHO standards, while levels of zinc, chromium, titanium and nickel remain within acceptable averages. On the other hand, the impact of irrigation water on crop yields in the K'sob region shows that broad bean crops are the best adapted, presenting results close to those of the control sample with good yields. Peppers, although less successful, show acceptable yields, while tomatoes show the lowest yields. The results obtained in this study emphasize the need to improve surface water management with a view to sustainable development, in order to guarantee better irrigation water quality, optimize crop yields and reduce pollution.

Keywords: Irrigation water, Oued K'sob, M'sila region, Water pollution, Water salinity, Agricultural soil, Soil pollution, Cultivated plants, North-east Algeria.

ملخص

في الجزائر، تشكل نوعية المياه الرديئة ومحدودية الموارد المائية للري في الجزائر عقبة رئيسية أمام الحفاظ على الإنتاج الزراعي، خاصة في المناطق الجافة وشبه الجافة في البلاد. في هذا الصدد، أجرينا دراسة في منطقة القصب بالقرب من المسيلة، حيث تُروى الأراضي الزراعية بمياه وادي القصب التي يغذيها سد القصب. أُخذت عينات من المياه والتربة من عشر محطات للمياه وأربع قطع أرضية للتربة، مع متابعة ثلاثة محاصيل: الفول الطماطم والفلفل، من أجل دراسة وتحديد الجودة الفيزيائية والكيميائية لمياه الري، خصائص تربة المنطقة، وتأثيرها على نمو المحاصيل وإنتاجيتها. أظهرت النتائج ارتفاع نسبة ملوحة المياه (0.1% إلى 3.9%)، ارتفاع نسبة المعادن في مياه الري (4120 - 794 mg/l TDS)، EC (1.589 - 7100 $\mu\text{S/cm}$)، بالإضافة إلى تلوث ملحوظ بالنترات والنترات. وفقاً لمخطط Piper، فإن المياه في وادي قصب هي من النوع الكيميائي كلوريد الصوديوم والبوتاسيوم أو كبريتات الصوديوم. بالنسبة للعناصر الكيميائية، فإن تركيزات (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^-) مرتفعة، مما يؤكد هيمنة النوع الكيميائي كلوريد الصوديوم والبوتاسيوم. يُظهر تحليل حجم الجسيمات أن التربة هي في الغالب طينية وجزء منها رملي طيني. الملوحة مرتفعة ودرجة الحموضة تتراوح بين القلوية والقلوية جداً، في حين أن محتوى المادة العضوية مرتفع. تظهر القواعد القابلة للتبديل تركيزات عالية من ($\text{Ca}^+ > 20\%$) و ($\text{K}^+ > 0.4\%$) وقيم معتدلة لـ (Na^+ , Mg^{+2}). أيضاً، يُظهر تحليل المعادن الثقيلة أن تركيزات الحديد والنحاس والألومنيوم والمنغنيز والكوبالت تتجاوز معايير منظمة الصحة العالمية، بينما تظل مستويات الزنك والكروم والتيتانيوم والنيكل والتيتانيوم والنيكل ضمن هذه المعايير. من ناحية أخرى، يُظهر تأثير مياه الري على المحاصيل المزروعة في منطقة وادي قصب أن محاصيل الفول هي الأفضل تكيفاً، حيث تظهر نتائج التحاليل قريبا من نتائج تحليل عينة التحكم مع محصول جيد في العموم. أما الفلفل، على الرغم من أنه أقل نجاحاً، إلا أنه يُظهر محصول زراعي مقبول، بينما تُظهر الطماطم أنها الأقل مردودية. تسلط النتائج المتحصل عليها في هذه الدراسة الضوء على الحاجة إلى تحسين إدارة المياه السطحية بهدف تحقيق التنمية المستدامة، وهذا من أجل ضمان جودة أفضل لمياه الري، تحسين مردودية المحاصيل الزراعية والحد من التلوث.

كلمات مفتاحية: مياه الري، وادي قصب، منطقة المسيلة، تلوث المياه، ملوحة المياه، التربة الزراعية، تلوث التربة، المحاصيل المزروعة، شمال شرق الجزائر.

Liste des abréviations

- ACP:** Analyse en Composantes Principales.
- ANRH :** Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.
- BBA:** Bordj Bou Arreridj.
- CAH:** Classification hiérarchique sur composantes principales.
- DBO5:** Demande Biochimique en Oxygène.
- DCO:** Demande Chimique en Oxygène.
- ETM:** Eléments des Traces Métalliques.
- ETP:** Evapotranspiration Potentielle.
- ETR:** Evapotranspiration Réelle.
- FAO:** Food and Agriculture Organization.
- Hm³:** Hectomètre cube.
- IWQI:** Indice de la qualité des eaux d'irrigation.
- JORA:** Journal Officielle de la République Algérienne.
- MES:** Matière En Suspension.
- MO:** Matière Organique.
- OMS:** Organisation Mondiale de la Santé.
- RFU:** Réserve en eau Facilement Utilisable.
- SAR:** Sodium Adsorption Ratio.
- TDS:** Total Dissolved Solids.
- WHO:** World Health Organization.
- XRF:** X-Ray Fluorescence.

Liste des figures

Figure 1. Situation géographique de la wilaya de M'sila.	4
Figure 2. Carte des réseaux hydriques de la Wilaya de M'sila.	6
Figure 3. Localisation géographique de la commune de M'sila.	7
Figure 1. Situation géographique et la répartition des échantillons dans la zone d'étude.	31
Figure 2. Relief de la zone d'étude.	32
Figure 6. Géologie de la zone d'étude.	11
Figure 7. Pédologie de la zone d'étude.	12
Figure 8. Températures moyennes mensuelles annuelles des minimales, moyennes et maximales de la température (°C) de la station de M'sila (1988-2018).	15
Figure 9. Evaporation moyenne mensuelle annuelle de station du M'sila (1988-2018).	16
Figure 10. Vitesse Moyennes mensuelles Annuelles de la station de M'sila (1988-2018).	17
Figure 11. Variation des Moyennes mensuelles annuelles de l'humidité de la station de M'sila (1988-2018).	18
Figure 12. Nombre de jours mensuelle interannuelle de gelée de station M'sila (1988-2018).	19
Figure 13. Moyennes mensuelles et annuelles de la durée d'insolation de la station de M'sila (1988-2018).	20
Figure 14. Variation des précipitations moyennes mensuelles de la station de M'sila.	21
Figure 15. Coefficient de variation des précipitations moyennes mensuelles de Station de M'sila (1988-2018).	22
Figure 16. Variation interannuelle des précipitations de la station de M'sila (1988-2018). ...	23
Figure 17. Variation du coefficient pluviométrique de la Station de M'sila.	24
Figure 18. Répartition saisonnière des précipitations pour la station de M'sila (1988-2018). ...	25
Figure 19. Bilan d'eau par la méthode de Cw.Thornthwaite de la station de M'sila (1988-2018).	28
Figure 20. Diagramme Ombrothermique de la station de M'sila (1988-2018).	29
Figure 21. Climagramme d'Emberger station de M'sila (1988-2018).	31
Figure 22. Variation de la température entre les compagnes et les stations.	37
Figure 23. Variation du pH entre les compagnes et les stations.	38
Figure 24. Variation de la conductivité électrique entre les compagnes et les stations.	39

Figure 25. Variation de la salinité entre les compagnes et les stations.....	40
Figure 26. Variation de TDS entre les compagnes et les stations.	41
Figure 27. Variation de la turbidité entre les compagnes et les stations.....	42
Figure 28. Variation de l'oxygène dissous entre les compagnes et les stations.....	43
Figure 29. Variation de Ca^{2+} entre les compagnes et les stations.	44
Figure 30. Variation de Mg^{2+} entre les compagnes et les stations.	45
Figure 31. Variation de HCO_3^- entre les compagnes et les stations.	46
Figure 32. Variation de Cl^- entre les compagnes et les stations.....	47
Figure 33. Variation de SO_4^{2-} entre les compagnes et les stations.	48
Figure 34. Variation de taux de Na^+ entre les compagnes et les stations.	49
Figure 35. Variation de taux de K^+ entre les compagnes et les stations.....	50
Figure 36. Variation de NH_4^+ entre les compagnes et les stations.	51
Figure 37. Variation de PO_4^- entre les compagnes et les stations.	51
Figure 38. Variation de NO_3^- entre les compagnes et les stations.....	52
Figure 39. Variation de NO_2^- entre les compagnes et les stations.....	53
Figure 40. Variation de silicium entre les compagnes et les stations.	54
Figure 41. Variation de la DCO entre les compagnes et les stations.....	55
Figure 42. Diagrammes de Piper des eaux de oued k'sob (2020-2021).....	56
Figure 43. Classification des eaux pour les stations (1, 2, 3,4 et 5) selon Schoeller-Berkaloff.	57
Figure 44. Classification des eaux pour les stations (6, 7, 8,9 et 10) selon Schoeller-Berkaloff.	58
Figure 45. Classification des eaux d'irrigation selon le diagramme de Riverside.	60
Figure 46. Classification des eaux d'irrigation de Oued K'sob selon Wilcox.....	61
Figure 47. Corrélation des composantes principales par la méthode de l'ACP.....	65
Figure 48. Dendrogramme de l'analyse hiérarchique montrant les groupes identifiés.....	66
Figure 49. Carte factorielle pour les groupes identifiés de Oued K'sob.	67
Figure 50. Prise d'échantillon du sol (périmètre de K'sob).	70
Figure 51. Préparation des échantillons pour les analyses XRF.	72
Figure 52. Teneurs des analyses granulométriques des sols dans le périmètre de K'sob avant et après l'irrigation.	74
Figure 53. Variation de pH du sol dans le périmètre de K'sob avant et après irrigation.	75
Figure 54. Variation de la conductivité électrique du sol dans le périmètre de K'sob avant et après irrigation.	76

Figure 55. Variation de la salinité du sol dans le périmètre de K'sob avant et après irrigation.	77
Figure 56. Taux de carbone organique du sol dans le périmètre de K'sob avant et après irrigation.....	78
Figure 57. Variation de la matière organique dans les sols du périmètre de K'sob avant et après irrigation.....	79
Figure 58. Tenures du soufre dans les sols du périmètre de K'sob avant et après irrigation...	81
Figure 59. Variation des teneurs en phosphore total dans les sols du périmètre de K'sob avant et après irrigation.....	82
Figure 60. Variation du calcium dans les sols du périmètre de K'sob avant et après irrigation.	83
Figure 61. Variation du magnésium dans les sols du périmètre de K'sob avant et après irrigation.....	84
Figure 62. Taux de potassium dans les sols du périmètre de K'sob avant et après irrigation.	85
Figure 63. Variation du sodium dans les sols du périmètre de K'sob avant et après irrigation.	86
Figure 64. Variation du fer dans les sols du périmètre de K'sob avant et après irrigation.....	88
Figure 65. Variation du zinc dans les sols du périmètre de K'sob avant et après irrigation...	89
Figure 66. Variation du cuivre dans les sols du périmètre de K'sob avant et après irrigation.	89
Figure 67. Variation d'aluminium dans les sols du périmètre de K'sob avant et après irrigation.	90
Figure 68. Variation de chrome dans les sols du périmètre de K'sob avant et après irrigation.	91
Figure 69. Variation de titane dans les sols du périmètre de K'sob avant et après irrigation.	92
Figure 70. Variation de manganèse dans les sols du périmètre de K'sob avant et après irrigation.	93
Figure 71. Variation du nickel dans les sols du périmètre de K'sob avant et après irrigation.	93
Figure 72. Variation d'arsenic dans les sols du périmètre de K'sob avant et après irrigation.	94
Figure 73. Variation de scandium dans les sols du périmètre de K'sob avant et après irrigation.	95
Figure 74. Variation de strontium dans les sols du périmètre de K'sob avant et après irrigation.	96
Figure 75. Variation du cobalt dans les sols du périmètre de K'sob avant et après irrigation.	97
Figure 76. Paramètres physico-chimiques du sol avant et après irrigation.....	98

Figure 77. Bases échangeables du sol avant et après irrigation.	99
Figure 78. Eléments des traces métalliques (ETM) avant et après irrigation.	100
Figure 79. Corrélation des composantes principales des sols par la méthode de l'ACP.	102
Figure 80. Dendrogramme de l'analyse hiérarchique montrant les groupes identifiés des sols.	103
Figure 81. Distribution des échantillons choisis dans chaque parcelle étudiée.	108
Figure 82. Vitesse de croissance de fève.	110
Figure 83. Hauteur final de la plante de fève.	111
Figure 85. Nombre moyen de fleurs par plante de fève.	113
Figure 86. Nombre moyen de fruits par plante de fève.	114
Figure 87. Vitesse de croissance de la tomate.....	115
Figure 88. Hauteur final de la plante de tomate.	116
Figure 91. Nombre moyen de bouquets par plante de la tomate.....	119
Figure 92. Nombre moyen de fleurs par plante de tomate.....	120
Figure 93. Nombre moyen de fruits par plante de tomate.	121
Figure 94. Vitesse de croissance de poivron.	122
Figure 95. Hauteur final de la plante de poivron.....	123
Figure 96. Longueur final des racines de la plante de poivron.	123
Figure 98. Nombre moyen de fruits par plante de poivron.	125

Liste des tableaux

Tableau 1. Station météorologique utilisé dans l'étude du climat de la zone de K'sob.	14
Tableau 2. Moyennes mensuelles et annuelles des températures de la station de M'sila.	14
Tableau 3. Moyennes mensuelles et annuelles de l'évaporation de station de M'sila.	15
Tableau 4. Moyennes mensuelles et annuelles de la vitesse du vent m/s.	16
Tableau 5. Moyenne mensuelles et annuelles de l'humidité relative de station de M'sila.	17
Tableau 6. Nombre de jours mensuels interannuel de gelée.	18
Tableau 7. Moyennes mensuelles et annuelles de la durée d'insolation (M'sila).	19
Tableau 8. Précipitations moyennes mensuelles de la station de M'sila.	20
Tableau 9. Répartition saisonnière des précipitations de la station de M'sila.	24
Tableau 10. L'ETR par la formule de Turc (annuel) station de M'sila.	26
Tableau 11. Bilan d'eau par la méthode C.W Thornthwaite de la station de M'sila.	27
Tableau 12. Résultats de ruissellement par la formule de Tixeront-Berkaloff.	28
Tableau 13. Classement de climat en fonction de l'indice d'aridité de Martonne.	30
Tableau 14. Valeurs de Q2 de la région de M'sila (1988-2018).	30
Tableau 15. Normes de potabilité de l'eau.	34
Tableau 16. Normes de qualité pour les eaux destinées à l'irrigation.	34
Tableau 17. Campagnes d'échantillonnage dans la zone d'étude.	35
Tableau 18. Pourcentage des faciès chimiques des stations de oued k'sob selon Schoeller-Berkaloff.	57
Tableau 19. Valeurs admissible de SAR pour les eaux d'irrigation.	59
Tableau 20. Résultat de SAR pour les eaux de Oued K'sob.	59
Tableau 21. Classes du Diagramme de Riverside.	59
Tableau 22. Interprétation des résultats des classes de Riverside.	60
Tableau 23. Résultats de IWQI des eaux de Oued K'sob.	62
Tableau 24. Qualité des eaux d'irrigation selon les stations de Oued K'sob.	62
Tableau 25. Composantes principales, valeurs propres et variance total.	64
Tableau 26. Valeurs moyennes du paramètre physico-chimique pour les groupes déterminées par le CAH.	66
Tableau 27. Points d'échantillonnage des sols de la zone d'étude.	70
Tableau 28. Classes de texture de notre parcelles du périmètre de K'sob.	73

Tableau 29. Classification du sol selon le pH d'après (Soltner, 1981).	75
Tableau 30. Types des sols selon leur conductivité d'après (Durand, 1983).	76
Tableau 31. Types des sols selon leur salinité d'après (FAO, 1976).	78
Tableau 32. Types des sols selon leur MO% d'après (Gauchers G, 1968).	80
Tableau 33. Normes d'interprétation pour le phosphore total d'après (Bray, 1945).	81
Tableau 34. Norme d'interprétation pour les éléments échangeables selon (FAO, 1976).	82
Tableau 35. Valeurs maximales pour les (ETM) dans le sol selon FAO et l'OMS.....	87
Tableau 36. Composantes principales, valeurs propres et variance total pour le sol.	101
Tableau 37. Sites d'échantillonnage des plantes dans la zone d'étude.	105
Tableau 38. Période du suivi pour les plantes choisies.	109

Table des matières

Table des matières

Résumé

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Table des matières

Introduction Générale

Chapitre I : Cadre physique de la zone d'étude

A. Description de la zone d'étude.....	4
1. Bref Aperçu sur la wilaya de M'sila.....	4
1.1. Situation géographique.....	4
1.2. Caractéristiques physiques.....	4
1.2.1. Climat.....	4
1.2.2. Relief.....	4
1.2.3. Réseau hydrographique.....	5
2. Présentation de la commune de M'sila.....	6
2.1. Localisation géographique.....	6
2.2. Aperçu historique sur la commune de M'sila.....	7
2.3. Données socio-économiques.....	7
2.4. Emploi.....	7
B. Présentation de la zone de k'sob.....	8
1. Situation géographique.....	8
2. Caractéristiques physiques de la région de k'sob.....	8
2.1. Relief.....	8
2.2. Géologie.....	10
2.3. Pédologie.....	10
2.4. Hydrologie et l'hydrographie.....	12
2.5. Végétation de la région de k'sob.....	13
C. Caractéristiques climatiques de la zone d'étude.....	13
1. Température.....	14
2. Evaporation.....	15
3. Vent.....	16

4. Humidité relative	17
5. Gelée	18
6. Insolation.....	19
7. Précipitations	20
7.1. Précipitations moyennes mensuelles	20
7.2. Précipitations moyennes annuelles.....	22
7.3. Répartition saisonnière des précipitations	24
8. Evapotranspiration.....	25
8.1. Formule de Turc (moyenne annuelle)	25
8.2. Méthode de l'eau de Cw.Thornthwaite.....	26
9. Ruissellement	27
10. Rythme climatique.....	28
10.1. Diagramme pluviothermique (ombrothermique)	28
10.2. Indice de De. Martonne	29
10.3. Climagramme d'EMBERGER.....	30
Conclusion	

Chapitre II : Étude physico-chimique des eaux d'irrigation de la zone d'étude

1. Introduction	33
2. Méthodologie.....	33
2.1. Techniques d'échantillonnage et méthodes d'analyse	33
2.2. Prélèvements	35
2.3. Méthodes d'analyse.....	35
3. Résultats et interprétations	36
3.1. Paramètres physico-chimiques.....	36
3.1.1. Paramètres physiques	36
✚ Température.....	36
✚ Potentiel hydrogène	37
✚ Conductivité électrique	38
✚ Salinité.....	39
✚ Total des solides dissous (TDS)	40
✚ Turbidité.....	41
✚ Oxygène dissous (O ₂).....	42

3.1.2. Paramètres chimiques	43
✚ Calcium (Ca^{2+}).....	43
✚ Magnésium (Mg^{2+}).....	44
✚ Bicarbonates (HCO_3^-)	45
✚ Chlorures (Cl^-)	46
✚ Sulfates (SO_4^{2-}).....	47
✚ Sodium (Na^+).....	48
✚ Potassium (K^+).....	49
✚ Ammonium (NH_4^+).....	50
✚ Phosphore (PO_4^-)	50
3.1.3. Substances indésirables	52
✚ Nitrates (NO_3^-).....	52
✚ Nitrites (NO_2^-).....	53
✚ Silicium (Si).....	53
3.1.4. Matières organiques	54
✚ Détermination de la demande chimique en oxygène D.C.O	54
3.2. Faciès chimique des eaux	55
3.2.1. Diagramme de Piper	55
3.2.2. Diagramme de Schoeller-Berkaloff	57
3.2.3. Taux d'absorption du Sodium (SAR)	58
3.2.4. Diagramme de Riverside.....	59
3.2.5. Classification de Wilcox	61
3.2.6. Indice de qualité des eaux d'irrigation (IWQI)	61
3.2.7. État de la qualité des eaux en vue d'un usage agricole	63
4. Analyse statistiques des données physico-chimiques	63
4.1. Analyse en composantes principales (ACP)	64
4.2. Classification hiérarchique sur composantes principales (CAH)	65
Conclusion	

Chapitre III : Étude des caractéristiques du sol de la zone d'étude

1. Introduction	69
2. Méthodologie	69
2.1. Choix des points d'échantillonnage.....	69

2.2. Prélèvement	70
2.3. Méthodes d'analyse	71
3. Résultats et interprétations	72
3.1. Caractéristiques physico-chimiques du sol	72
✚ Granulométrie	72
✚ Potentiel hydrogène	74
✚ Conductivité électrique	75
✚ Salinité.....	77
✚ Carbone organique	78
✚ Matière organique	79
✚ Soufre	80
✚ Phosphore total (P ₂ O ₅)	80
3.2. Bases échangeables	82
✚ Calcium (Ca ²⁺).....	83
✚ Magnésium (Mg ²⁺).....	83
✚ Potassium (K ⁺).....	84
✚ Sodium (Na ⁺).....	85
3.3. Eléments des traces métalliques (ETM)	86
✚ Fer (Fe).....	87
✚ Zinc (Zn)	88
✚ Cuivre (Cu).....	88
✚ Aluminium (Al)	90
✚ Chrome (Cr).....	90
✚ Titane (Ti).....	91
✚ Manganèse (Mn)	92
✚ Nickel (Ni).....	92
✚ Arsenic (As).....	94
✚ Scandium (Sc).....	94
✚ Strontium (Sr)	95
✚ Cobalt (Co).....	96
4. Analyse statistiques des données des sols	97
4.1. Statistique descriptive	97
4.2. Analyse en composantes principales (ACP)	101

4.3. Classification hiérarchique sur composantes principales des sols (CAH) 102

Conclusion

Chapitre IV : Étude des effets de la qualité des eaux d'irrigation sur la culture et le rendement de quelques plantes cultivée dans la zone d'étude

1. Introduction	105
2. Méthodologie	105
2.1. Choix les sites des échantillonnages	105
2.2. Choix les espèces végétales étudiées	105
2.3. Description morphologique des plantes	106
2.3.1. Fève	106
2.3.2. Tomate	107
2.3.3. Poivron	107
2.4. Méthodes du suivi	108
3. Résultats et interprétations	109
3.1. Fève	109
3.1.1. Vitesse de croissance de la plante	109
3.1.2. Hauteur final de la plante	109
3.1.3. Longueur final des racines de la plante	111
3.1.4. Nombre moyen de fleurs par plante	112
3.1.5. Nombre moyen de fruits par plante	113
3.2. Tomate	114
3.2.1. Vitesse de croissance de la plante	114
3.2.2. Hauteur final de la plante	115
3.2.3. Longueur final des racines de la plante	116
3.2.4. Diamètre finale de la tige principale	117
3.2.5. Nombre moyen de bouquets par plante	118
3.2.6. Nombre moyen des fleurs par plante	119
3.2.7. Nombre moyen de fruits par plante	120
3.3. Poivron	121
3.3.1. Vitesse de croissance de la plante	121
3.3.2. Hauteur final de la plante	122
3.3.3. Longueur final des racines de la plante	122

3.3.4. Nombre moyen de fleurs par plante.....	124
3.3.5. Nombre moyen de fruits par plante	125
Conclusion	
Conclusion générale et perspectives.....	127
Références bibliographiques.....	130

Introduction Générale

Introduction Générale

L'eau est une ressource naturelle vitale, nécessaire à toutes les activités humaines et faisant partie du patrimoine naturel du pays et considérées comme un facteur déterminant pour le développement à long terme (**Singh & Noori, 2022**).

Par conséquent, l'irrigation joue un rôle fondamental dans l'alimentation des populations mondiales croissante des dernières années, et les cultures irriguées augmentent considérablement la productivité de la production agricole et assurent la sécurité alimentaire dans différentes parties du monde, surtout dans les régions arides et semi-arides (**Orsini et al., 2013; Bozdağ, 2016 ; El Behairy et al., 2021**). Les eaux destinées à l'irrigation ont un impact sur la production, la croissance, le rendement des cultures ainsi que sur le sol, qui peut devenir inutilisable si l'eau est de mauvaise qualité (**Islam & Shamsad, 2009; Akkan et al., 2018**). Quelle que soit l'origine de ces eaux, elles doivent être évaluées et répondre à certains indices empiriques nécessaires à la mise en place de systèmes d'irrigation et, par conséquent, leur qualité doit être vérifiée avant la plantation des cultures (**Almeida et al., 2008**).

La qualité des eaux est aujourd'hui considérée comme une contrainte majeure pour l'irrigation, car elle s'est détériorée ces dernières années en raison de la surexploitation des ressources, de l'émission industrielle et urbaine incontrôlée et de l'utilisation intensive d'engrais chimiques dans les terres agricoles (**Benrabah et al., 2013 ; Kükreer & Mutlu, 2019**).

L'évaluation de la qualité des eaux est devenue un enjeu majeur à l'échelle mondiale ces dernières années. De nombreuses études ont été réalisées pour évaluer la qualité des eaux d'irrigation et leur effet sur le sol ou sur les plantes. Dans ce contexte, Au Cap-Vert, **Palacios-Diaz et al., (2023)**, ont étudié la gestion de l'irrigation et l'effet de la qualité des eaux sur le sol et le rendement de la plante (*Sorghum bicolor Payenne*). En Éthiopie, **Awol & Adugna, (2021)**, ont évalué l'effet des effluents industriels sur la qualité des eaux d'irrigation et sur le sol agricole près de la ville de Kombolcha. En Inde, **Giri et al., (2022)**, ont évalué les caractéristiques hydrochimiques et qualitatives des eaux d'irrigation en haute altitude transhimalayenne dans les régions de Leh, Ladakh. En Arabie saoudite, **Al-Ghobari , (2011)** a mené une étude sur l'effet de la qualité des eaux d'irrigation sur les propriétés du sol dans les systèmes d'irrigation à pivot central du pays. En Turquie, **Yesilnacar et Gulluoglu, (2008)** ont étudié les caractéristiques hydrochimiques et les effets de l'irrigation sur la qualité des eaux souterraines dans la plaine d'Harran. De plus, en Italie, **Aiello et al., (2007)** ont évalué les effets de l'irrigation par les eaux usées récupérées sur le sol et les cultures de tomates dans la région de Sicile. En Serbie, **Surdyk**

et al., (2010) ont analysé l'impact de l'irrigation avec les eaux traitées de mauvaise qualité sur la teneur en métaux lourds du sol et des cultures. En Algérie, **Bouaroudj et al., (2019)** ont évalué la qualité des eaux du barrage Beni Haroun et les effets de l'irrigation sur les caractéristiques des sols des terres agricoles . Aussi, **Kachi et al., (2016)** , étudiée l'effet de l'agriculture irriguée sur la qualité des eaux et des sols dans la région de Guelma .

En Algérie, les eaux de surface sont de plus en plus utilisées ces dernières années pour les besoins de l'agriculture, de l'alimentation et de l'industrie. D'autre part, l'agriculture exploite une grande quantité d'eau dans les pays au climat aride et semi-aride, avec de faibles précipitations et un besoin accru d'eau d'irrigation (**Singh & Kumar, 2017; Shil et al., 2019**). Les mauvaises pratiques d'irrigation ont modifié la fonctionnalité des sols en augmentant le risque de salinité. La salinité est un problème majeur dans de nombreux pays du monde, notamment en Algérie où plus de 20 % des sols irrigués souffrent de problèmes de salinité (**Bradaï et al., 2008**).

Le cas de cette étude présente le périmètre agricole de K'sob dans la région de M'sila, qui est irrigué par les eaux de Oued K'sob. Dans la partie de M'sila, celle-ci est alimentée à la fois par le barrage de K'sob et par les eaux usées de la région, qu'elles soient domestiques ou industrielles. En raison de cela, la qualité de ces eaux est réduite, ce qui a une incidence sur le sol et les cultures irriguées dans notre région.

L'objectif de ce travail est de déterminer l'impact de la qualité de l'eau d'irrigation sur le sol et les plantes des terres agricoles au Nord-est algérien (le cas de Oued K'sob, région de M'sila). Le manuscrit est structuré en quatre chapitres :

Chapitre I : Présentons le cadre physique et naturel de la région de M'sila, telles que les caractéristiques géographiques, géomorphologiques, géologiques et aussi les caractéristiques climatiques.

Chapitre II : Basé sur l'étude physico-chimique des eaux d'irrigation de la zone d'étude, la méthodologie de travail ainsi que les principaux résultats et interprétations des paramètres physico-chimiques.

Chapitre III : Porte sur l'étude des caractéristiques du sol de la zone d'étude à savoir les caractéristiques physico-chimiques et les éléments des traces métalliques (ETM) dans le sol.

Chapitre IV : Expose l'effet de la qualité des eaux d'irrigation sur la culture et le rendement de quelques plantes cultivées dans la zone d'étude.

Enfin, une conclusion générale présente une synthèse des résultats obtenus. De plus, nous abordons quelques perspectives d'avenir dans la recherche scientifique appliquée sur l'agriculture dans la région de M'sila.

***Chapitre I : Cadre
physique de la zone
d'étude***

Chapitre I : Cadre physique de la zone d'étude

A. Description de la zone d'étude

1. Bref Aperçu sur la wilaya de M'sila

1.1. Situation géographique

La wilaya de M'sila est située dans la zone semi-aride du pays, où la pluviométrie est inférieure à 250 mm/an et couvre une superficie de 18 175 km². Selon leur géographie, elle se situe en zone de transition entre le Nord et le Sud du pays, ainsi que l'Est et l'Ouest. Elle est limitée au Nord par les wilayas de Bordj Bou Arreridj, Bouira, et Sétif, et dans le Sud par les wilayas de Djelfa et Biskra, l'Est par les wilayas de Batna et Biskra, et à l'Ouest par les wilayas de Djelfa et Médéa (Fig. 1).

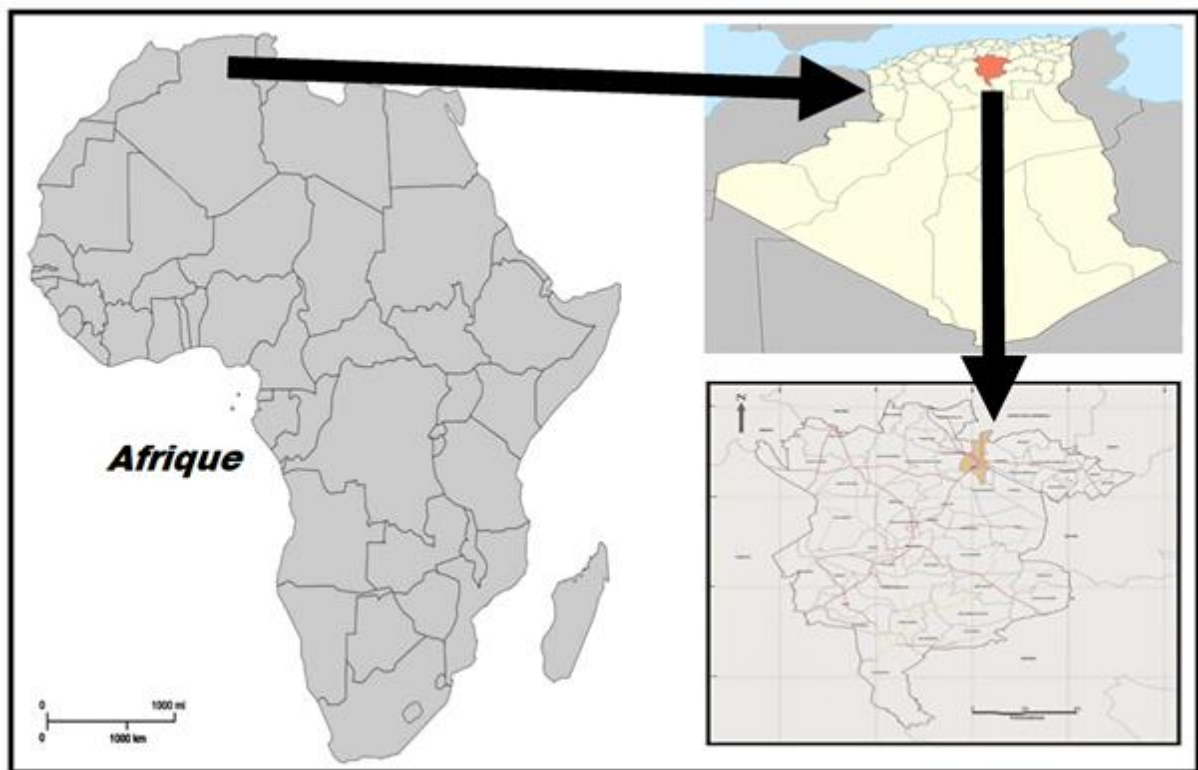


Figure 3. Situation géographique de la wilaya de M'sila.

La population de la wilaya de M'sila, qui comprend 47 communes regroupées en 15 daïras, est de 1 029 447 habitants, avec une densité de 57 habitants/Km².

1.2. Caractéristiques physiques

1.2.1. Climat

La wilaya de M'sila se caractérise par un climat continental avec des effets de courants maritimes réduits, présentant un gradient climatique Nord-Sud. Ce gradient est influencé par la

topographie de la région, avec des régions montagneuses dont le point culminant est à 1 800 m d'altitude et des régions présahariennes dont l'altitude est inférieure à 300 m. D'autre part, le climat de la wilaya de M'sila se caractérise par une longue saison estivale sèche et chaude, et une saison hivernale pluvieuse et froide. Les taux de précipitations sont faibles et variables d'une année à l'autre. Les régimes thermiques se traduisent par un climat continental, relativement homogène.

1.2.2. Relief

Le territoire de la wilaya de M'sila présente une structure physique particulièrement variée. Cette diversité se manifeste à travers trois régions naturelles nettement définies (**Saoudi & Aïcha, 2017**).

- ❖ La région des steppes couvre la majeure partie du territoire et se caractérise par une végétation clairsemée, ce qui témoigne du niveau de dégradation des zones des pâturages.
- ❖ La région de la plaine du Hodna concentre une part significative des activités agricoles de la wilaya, incluant la culture de céréales, les cultures maraîchères et l'arboriculture.
- ❖ La région montagneuse est réservée à une forme extensive d'agriculture de montagne, avec des massifs forestiers épars, situés entre les deux chaînes de montagnes : l'Atlas Saharien et l'Atlas Tellien.

En outre, le relief est caractérisée au Nord par les monts de Hodna, au Sud l'Ouest par les monts d'Oulades N'aïle, au Sud-Est par les monts de M'zab, et au Sud par Djebel Ezerga et Mimouna.

1.2.3. Réseau hydrographique

Le territoire de la wilaya de M'sila se présente comme un vaste bassin de collecte des eaux pluviales, bénéficiant de l'apport de divers cours d'eau provenant des bassins locaux ainsi que de ceux des wilayas voisines, principalement au Nord (Bouira et Bordj Bou Arreridj).

Selon **Hadbaoui, (2013)**, les réserves en eau sont évaluées à environ 540 millions/m³, dont 320 millions/m³ correspondent aux sources d'eau en surface (représentant ainsi 59.25% de la capacité totale), tandis que les eaux souterraines en comptent 220 millions/m³ (équivalent à 40.74%).

Le réseau de cours d'eau est particulièrement dense dans la wilaya, étant principalement constitué des Oueds à débit constant qui totalisent environ 320 millions/m³ d'écoulement

annuel. Parmi les nombreux cours d'eau, les plus significatifs incluent Oued K'sob, Oued M'Cif, Oued Maïtar, Oued Boussaâda, Oued Elham et Oued M'sila, dont la plupart se dirigent vers le chott El Hodna en tant que principal exutoire (Fig. 2).



Figure 4. Carte des réseaux hydriques de la Wilaya de M'sila.

2. Présentation de la commune de M'sila

2.1. Localisation géographique

La ville de M'sila est située à 256 Km au Sud-est d'Alger (Fig. 3). La commune de M'sila s'étend sur une superficie de 234 Km². Elle est limitée par :

- Au Nord par la commune d'El Euch (BBA) ;
- À l'Est par la commune M'tarfa ;
- À l'Ouest par la Commune d'Oueled Mansour ;
- Au Sud par la commune d'Oueled Madhi ;
- Au Sud-est par commune d'Elsouamaa.

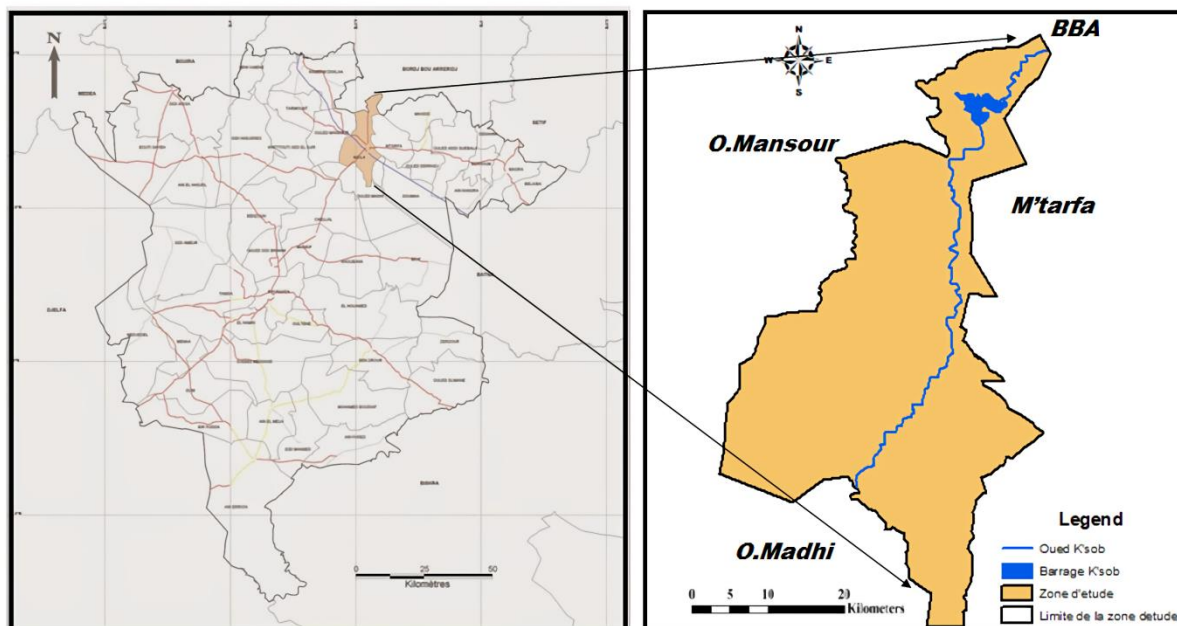


Figure 5. Localisation géographique de la commune de M'sila.

2.2. Aperçu historique sur la commune de M'sila

La commune de M'sila est passée par plusieurs époques dans son histoire à savoir l'époque romaine et l'époque des Fatimides, l'époque des Hammadides, l'époque des Almoravides, l'époque pré-ottomane, l'époque ottomane, l'époque de la colonisation française, et enfin l'époque de l'indépendance.

2.3. Données socio-économiques

La localité de M'sila est reconnue comme le centre ou la capitale de la région de Hodna et fonctionne comme un pôle d'activités à la fois industrielles et agricoles. De plus, dans les environs du bassin du Hodna, en particulier du côté Nord, la pratique de la polyculture prédomine, principalement en raison de la disponibilité des ressources en eau pour l'irrigation. Les cultures légumières et fruitières sont principalement menées le long des rives des cours d'eau, tandis que la culture de céréales s'implante principalement dans les zones découvertes (Bourenane et al., 2019). La commune de M'sila compte une superficie agricole globale d'environ 19250 hectares, cependant, seulement environ 2000 hectares de ces terres sont consacrés à l'irrigation. La population animale se compose de 29000 bovins et de 774 ovins, illustrant ainsi la prédominance de l'activité agricole dans cette zone (Bourenane et al., 2019).

2.4. Emploi

La population de la ville de M'sila a connu une croissance significative au cours des dernières années. En effet, elle est passée d'un effectif de 115 490 résidents en 1998 à 149 016 en 2008.

Selon les données de la Direction de l'Environnement de la Wilaya de M'sila, les autorités municipales ont évalué le taux de croissance de la population de la ville à 2.8%. Cette estimation prévoit une augmentation de la population à environ 177 800 habitants en 2015, pour ensuite atteindre le nombre de 217 900 habitants d'ici 2025 (**Bourenane et al., 2019**).

La plupart des résidents de la région de M'sila exercent leurs activités professionnelles dans les domaines du commerce ainsi que dans le secteur public, tandis que le reste de la population se consacre aux métiers liés à l'agriculture et à l'élevage pastoral.

B. Présentation de la zone d'étude

1. Situation géographique de la zone de k'sob

La zone du K'sob a été choisie comme zone d'étude pour plusieurs raisons. Tout d'abord, il s'agit d'un ancien périmètre irrigué datant d'avant 1962 qui a été peu étudié. Ensuite, les travaux de réaménagement des années 1980 (**Rezag, 2010**).

Le K'sob ou le périmètre du K'sob est une zone agricole localisée au nord de la commune de M'sila. Elle fait partie intégrante du grand bassin hydrographique du Hodna. Elle est située en aval du plan d'eau du barrage K'sob, ce qui en fait le prolongement naturel de l'Oued K'sob et par conséquent une partie du bassin inférieur de M'sila.

L'Oued K'sob constitue le principal cours d'eau de la région du Hodna. Il s'étend entre les monts des Bibans (Madjana) jusqu'à Chott el Hodna (M'sila), à travers la wilaya de Bordj Bou Arreridj (BBA) et la wilaya de M'sila.

La zone d'étude comprend dix stations destinées au prélèvement et à l'échantillonnage des eaux, ainsi que quatre stations ou quatre parcelles destinées aux prélèvements de sols et de plantes (Fig. 4).

2. Caractéristiques physiques de la région de k'sob

2.1. Relief

Le relief joue un rôle important sur l'hydrologie d'un bassin versant ; il détermine les types de terrains au ruissellement, l'infiltration et la vaporisation. Le relief est l'ensemble des irrégularités de l'altitude qui se mesurent par rapport au niveau de la mer. Ces reliefs forment une barrière naturelle qui joue un rôle climatique et hydrologique important (**Makhzoum & Mahdid, 2019**).

La région de K'sob est divisée en deux unités géomorphologiques avec une altitude entre 404 m et 829 m :

- ❖ La région montagneuse ; les chaînes montagneuses au Nord.
- ❖ La région des plaines ; les plaines et les plateaux au Sud (Fig. 5).

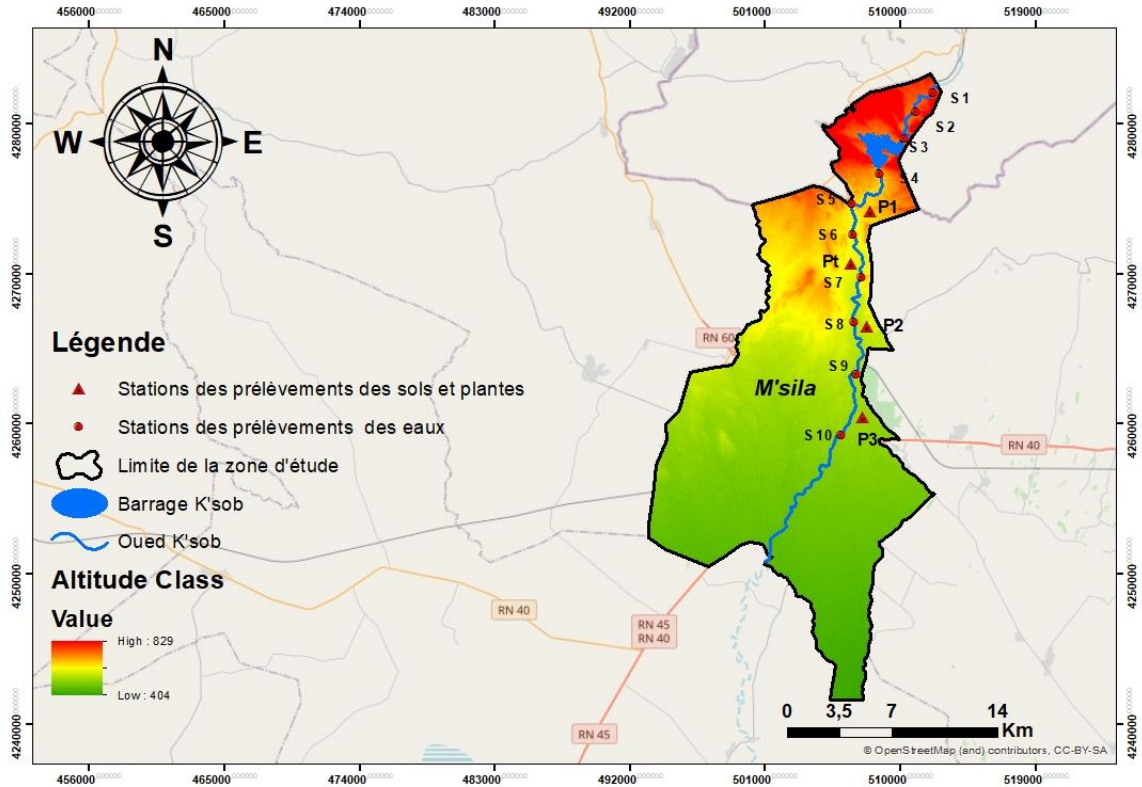


Figure 6. Situation géographique et la répartition des échantillons dans la zone d'étude.

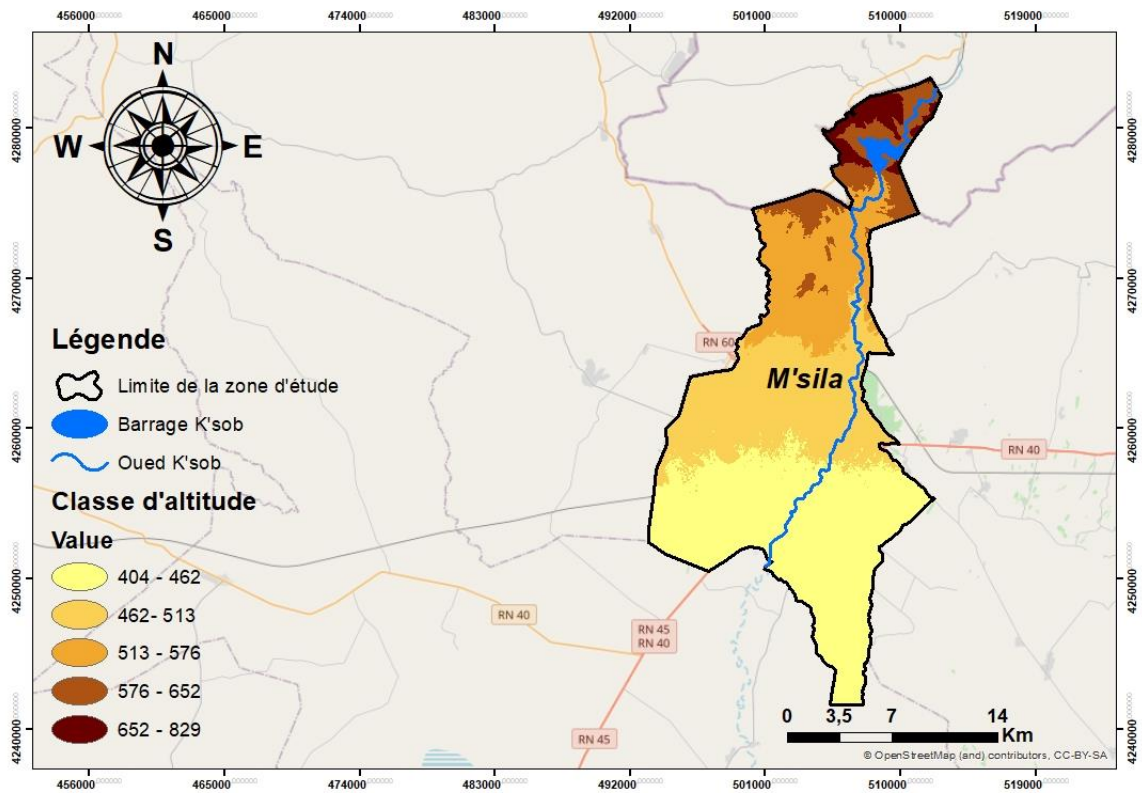


Figure 7. Relief de la zone d'étude.

2.2. Géologie

La zone de K'sob est liée à la géologie du bassin du Hodna, en particulier dans sa partie Nord de ce dernier. Le bassin du Hodna appartient à un domaine dit pré Atlasique, situé au croisement de systèmes structuraux très différents, L'Atlas Tellien à la partie Nord et l'Atlas Saharien à la partie Sud. La géologie de la zone d'étude présente les formations suivantes (Fig. 6) (Guiraud, 1973) :

❖ Le secondaire

Trias : présente une lithologie composée de marnes et sels ;

Jurassique : apparait à cause des d'accidents majeurs dans la partie orientale des monts des Hodna, il est caractérisé par la présence de calcaire ;

Crétacé : présente une alternance de faciès marno-gréseux et argilo-gréseux de fortes épaisseurs.

❖ Le tertiaire

Eocène : les formations paléogènes apparaissent sous la forme d'une bande plus ou moins parallèle au plan méridional des monts du Hodna. Elles sont composées de grès rouge, d'argiles variées, de calcaires et de conglomérats ;

Oligocène continental : il est composé de conglomérats, de grès fins friables et de marnes rougeâtres ;

Miocène : il est formé par l'alternance de marnes gypseuses avec des grès et des calcaires.

❖ Le quaternaire

C'est l'époque à laquelle ont été formés les hauts plateaux et le Sahara. Le quaternaire dans la région de K'Sob contient des roches calcaires et des alluvions actuelles ou récentes, notamment sur le fond de l'oued K'Sob ou sur ses berges, ainsi que des cailloutis, des sables calcaires et parfois de la vase.

2.3. Pédologie

Les sols salés et sableux très abondants dans les pays du Maghreb, sont liés aux conditions arides ou semi-arides de la plupart des régions de cette zone. Le potentiel d'évaporation y est important et les précipitations peu abondantes. On y observe également la présence fréquente de dépôts géologiques salifères et de nappes phréatiques salées (Aubert, 1976).

Dans notre zone d'étude et selon les travaux pédologiques anciens réalisés en Algérie ou dans le bassin du Hodna, la classification des sols divise ces derniers en deux classes principales.

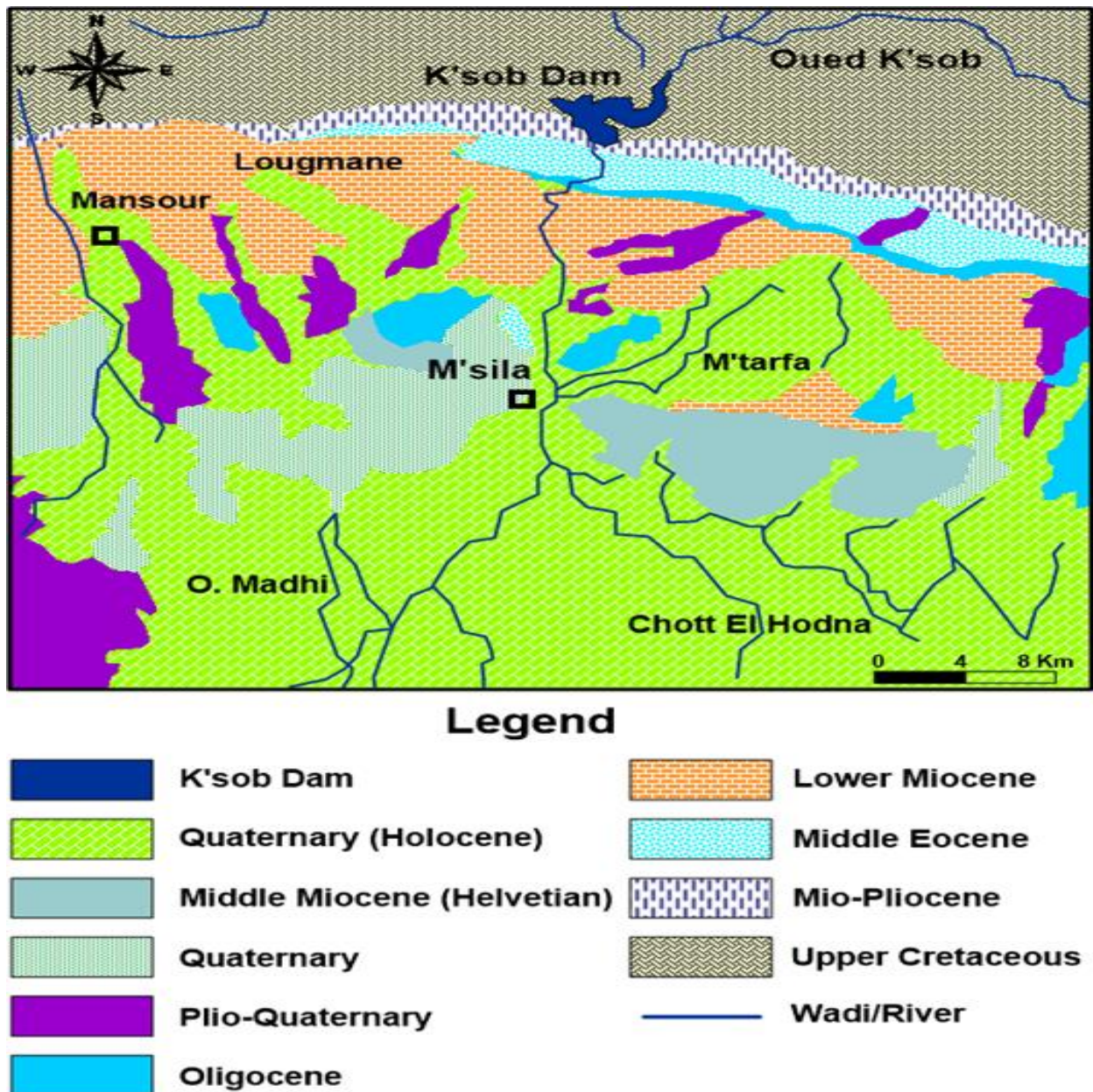


Figure 8. Géologie de la zone d'étude.

❖ **Première classe**

Composé par les sols peu évolués d'apport alluvial (peu steppiques, calcimorphes, hydromorphes) d'origine climatique, groupe des sols gris subdésertiques. Ces sols de profil de type AC (horizons du sol) sont pauvres en matières organiques et de structure granuleuse ou polyédrique, avec une conductivité inférieure à 4 $\mu\text{s}/\text{cm}$ et une abondance de carbonate de calcium tout au long du profil (FAO, 1996).

❖ Deuxième classe

Contient des sols halomorphes, une sous-classe des sols à structure non dégradée. Ils présentent un profil peu évolué de type AC, une structure généralement polyédrique, une conductivité supérieure à 4 $\mu\text{s}/\text{cm}$, une quantité de carbonate de calcium et un pH autour de 8, et souvent plus élevé (FAO, 1996).

Ces sols sont d'une grande importance pour l'agriculture et sont très répandus dans la plaine de M'sila et le périmètre de K'sob. Le sol est composé d'une structure massive, d'une texture hétérogène, très poreuse, d'une bonne aération superficielle et d'une matière organique très acceptable. En revanche, des différences dans la croûte superficielle du sol sont observées le long des rives de l'Oued K'sob et des zones environnantes, en raison de l'érosion hydrique ou des effets anthropiques passés et actuels (Fig. 7).

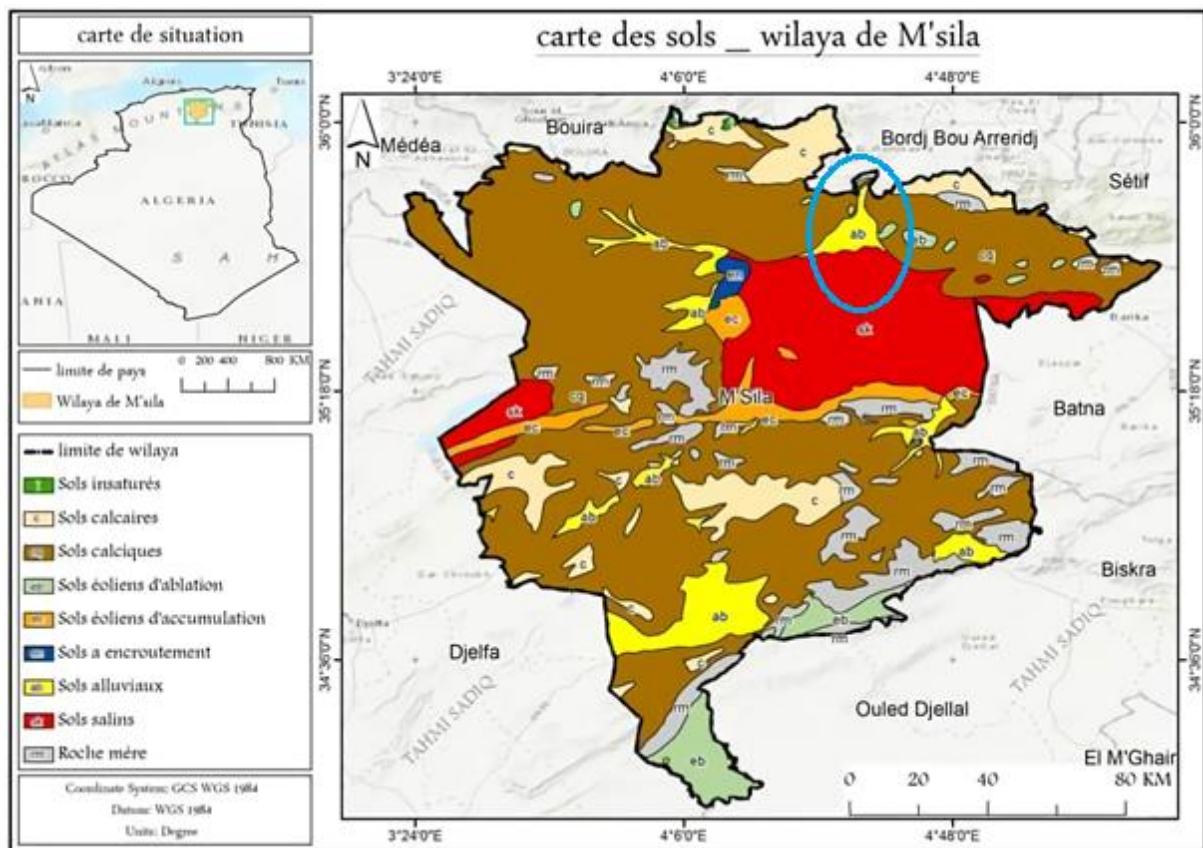


Figure 9. Pédologie de la zone d'étude.

2.4. Hydrologie et l'hydrographie

Selon plusieurs travaux hydrologiques réalisés au niveau du bassin du Hodna, il est constaté qu'il est divisé en huit 08 sous-bassins hydrographiques principaux. Le bassin hydrographique de K'sob est l'un de ces bassins, s'étend à travers la wilaya de (BBA) et la wilaya de M'sila, et divisé en deux parties. Une partie située à (BBA) et l'autre partie à M'sila. L'hydrologie de la

partie de (BBA) est liée directement à l'hydrologie et l'écoulement de Oued k'sob et les autres oueds tels que, Oued Soulit, Oued Rabta et Oued Medjez, et aussi Oued Toubou, Oued Rhafistane, Oued Mezroug. Cette partie du bassin se jette directement dans le barrage de K'sob avec un débit annuelle moyenne de 60 millions/m³ soit un coefficient d'écoulement moyen de 11%. La densité moyenne du réseau hydrographique est extrêmement forte (5,45 km/km²), cette zone n'est pas loin du barrage (**Tatar, 1985**). En contrepartie, l'hydrologie de la partie de M'sila est liée à l'écoulement de Oued K'sob entre le barrage de K'sob et leur exutoire de chott el Hodna.

2.5. Végétation de la région de k'sob

La couverture végétale dans la région de K'sob est liée à l'agriculture et aux surfaces irriguées de cette région. Les agriculteurs du K'sob ont adopté un système de production basé sur la culture maraîchère, parfois associée à l'arboriculture ou à la céréaliculture. Le système végétal du périmètre de K'sob est divisé en deux régions selon la répartition des cultures :

- La partie Nord du périmètre dans les régions de Boukhmissa, Lebkhata, Oulades Slama, M'sila vert contient des cultures de maraîchage et d'arboriculture.
- La partie Sud du périmètre dans les régions Mezrir, Sbaa el guebli contient des cultures de céréales.

Les céréales occupent une place importante dans le système agricole du périmètre du K'sob. En effet, elles représentent près de 65 % de la superficie irrigable du périmètre et jouent un rôle important dans la vie de l'agriculteur. Elles constituent en effet une sécurité alimentaire pour les agriculteurs et un aliment essentiel pour le bétail (**Rezag, 2010**).

L'abricotier est la culture emblématique de la plaine du K'sob, en particulier dans sa partie Nord, qui abrite des variétés très appréciées. L'arboriculture fruitière, à elle seule, couvre plus de 20% de la surface irrigable. Cette zone représente le principal pôle de production d'abricots pour toute la région du centre de l'Algérie (**Rezag, 2010**).

C. Caractéristiques climatiques de la zone d'étude

Dans les pays méditerranéens, le climat est un facteur limitant et crucial pour la création, l'organisation et le maintien des écosystèmes. Il influence considérablement la répartition des êtres vivants dans cette région et il est étroitement lié à divers éléments tels que les précipitations, la température, le vent, l'humidité, l'évaporation et l'évapotranspiration. Parmi ces facteurs, les précipitations et la température revêtent une importance particulière.

Afin d'étudier le climat de la zone d'étude, nous avons utilisé une série d'observations de données climatiques sur une longue période, entre 1988 et 2018, provenant de la station météorologique de M'sila (Tab. 1).

Tableau 1. Station météorologique utilisé dans l'étude du climat de la zone de K'sob.

Station	Coordonnées			Paramètres Mesurée	Période d'observation
	Latitude	Longitude	Altitude (m)		
M'sila	35°67° N	4°50° E	441	Précipitation	1988-2018
				Température	
				Evaporation	
				Vitesse du vent	
				Humidité	

1. Température

La température constitue un facteur climatique très important, elle joue un rôle dominant dans l'estimation de l'évapotranspiration. En plus, la température influe aussi sur d'autres paramètres tels que l'enneigement et sa durée ainsi que la répartition de la végétation (**Gueroui, 2014**).

Tableau 2. Moyennes mensuelles et annuelles des températures de la station de M'sila.

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jui	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	Annuelle
T° min	5.1	4.2	7.5	10.7	15	21.9	24.6	23	18.4	15.5	7.4	5.5	13.23
T° max	14.3	16.1	20.4	23.7	28.6	34.0	38.8	39.2	33.4	25.1	18.1	15.8	25.6
T° moy	9.7	10.15	13.95	17.2	21.8	27.95	31.7	31.1	25.9	20.3	12.75	10.65	19.42

Source : station météorologique de M'sila (2020).

À l'échelle annuelle, la température moyenne est estimée à 19.42°C. A l'échelle mensuelle, la variation des températures moyennes mensuelles montre que le mois le plus froid est le mois de Janvier avec une valeur de (9.7 °C) et le mois le plus chaud est le mois de Juillet avec une valeur de (31.7 °C).

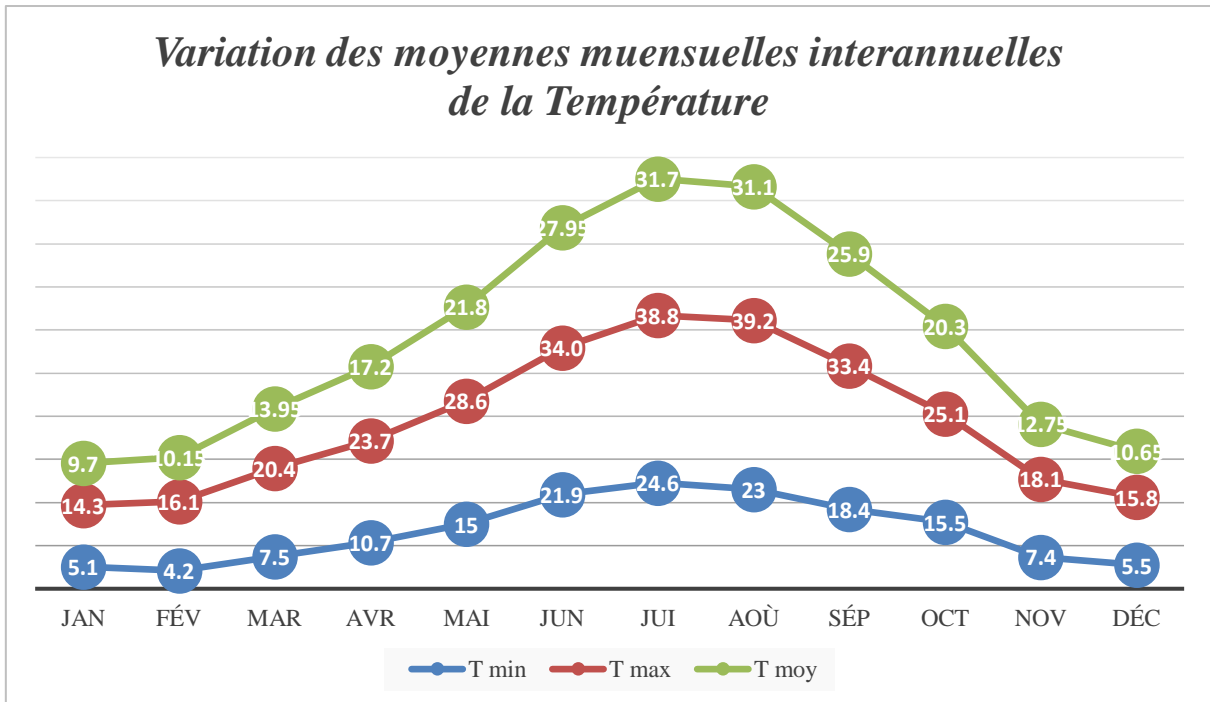


Figure 10. Températures moyennes mensuelles annuelles des minimales, moyennes et maximales de la température (°C) de la station de M'sila (1988-2018).

2. Evaporation

Le terme « évaporation » fait référence au passage d'un état liquide à un état gazeux ; elle est également connue sous le nom d'« évaporation physique ». Les solides (glaces) les plus courants dans la vapeur sont les plans d'eau et le couvert végétal. Le rayonnement solaire est le facteur le plus important contrôlant l'évaporation (**Gueroui, 2014**).

Les données d'évaporation mensuelle interannuelle sont des valeurs moyennes mensuelles mesurées dans la station de M'sila. Ces valeurs sont présentées dans le tableau 03, leur répartition est illustrée dans la figure 9. Ces derniers montrent que la quantité d'évaporation la plus élevée apparaît dans le mois de juillet avec une valeur de 0.52 hm³, alors que la valeur la plus faible de l'évaporation apparaît dans le mois de Décembre avec une valeur de 0.11 hm³. Aussi la moyenne annuelle de l'évaporation remarquée dans la station est notée de 0.27 hm³.

Tableau 3. Moyennes mensuelles annuelles de l'évaporation de station de M'sila.

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jui	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	Annuelle
EV(Hm ³)	0.14	0.13	0.23	0.26	0.35	0.37	0.52	0.44	0.29	0.33	0.14	0.11	0.27

Source : station météorologique de M'sila (2020).

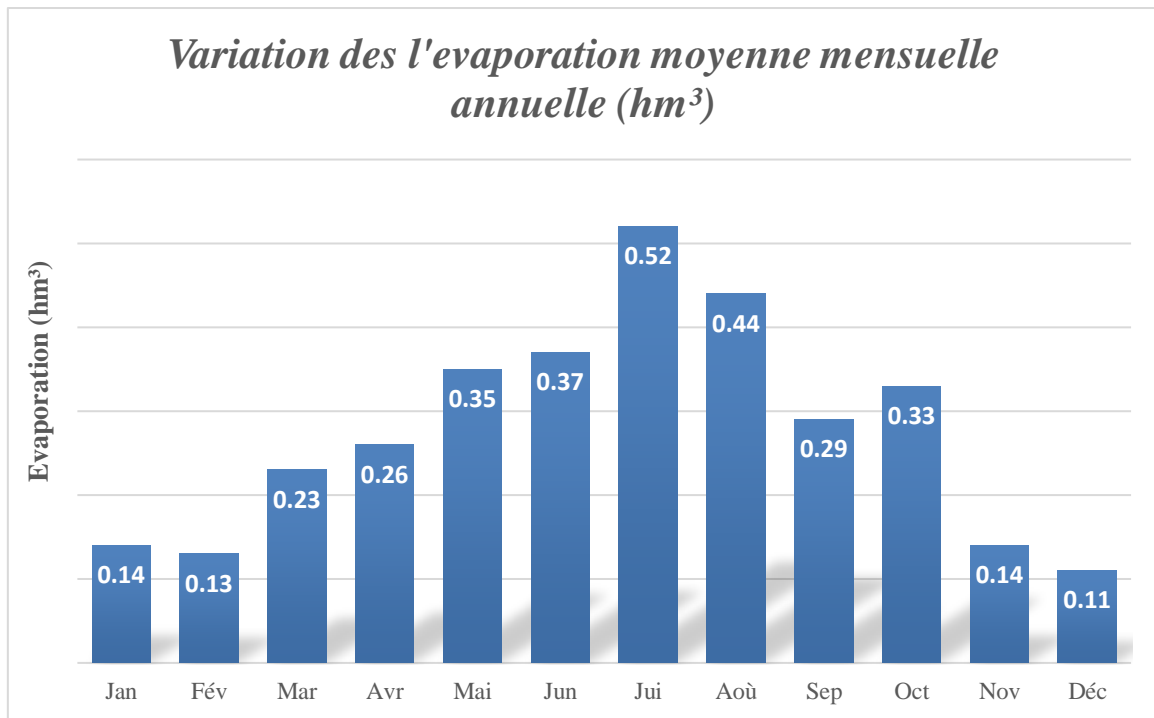


Figure 11. Evaporation moyenne mensuelle annuelle de station du M'sila (1988-2018).

3. Vent

Le vent joue un rôle principal dans la détermination du régime des précipitations, de l'évaporation et, de manière générale, du climat. Il influe sur le taux d'érosion, de transport et d'accumulation, ainsi que sur le niveau d'ensablement (Rezag, 2010).

Les vents prédominants dans la région de M'sila comprennent : le vent de l'ouest, le plus pluvieux, qui prédomine en automne, hiver et printemps ; le vent du nord, moins fréquent mais froid et sec ; et enfin, le sirocco, un vent chaud et sec du sud, qui accentue l'évapotranspiration des céréales (Rezag, 2010).

La variation de la vitesse moyenne mensuelle et annuelle du vent dans notre région montre que ; le mois d'Avril présente une valeur maximale estimée à 5.1 m/s, bien que le mois de Novembre affiche une valeur minimale estimée à 3.6 m/s. De plus, le sirocco apparaît de façon épisodique durant les mois de juillet et août, ce qui a pour effet d'augmenter la température.

Tableau 4. Moyennes mensuelles annuelles de la vitesse du vent m/s.

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jui	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Annuelle
Vent (m/s)	3.7	4.1	4.3	5.1	4.5	4.6	4.4	3.9	4.1	3.7	3.6	3.8	4.15

Source : Station météorologique de M'sila (2020).

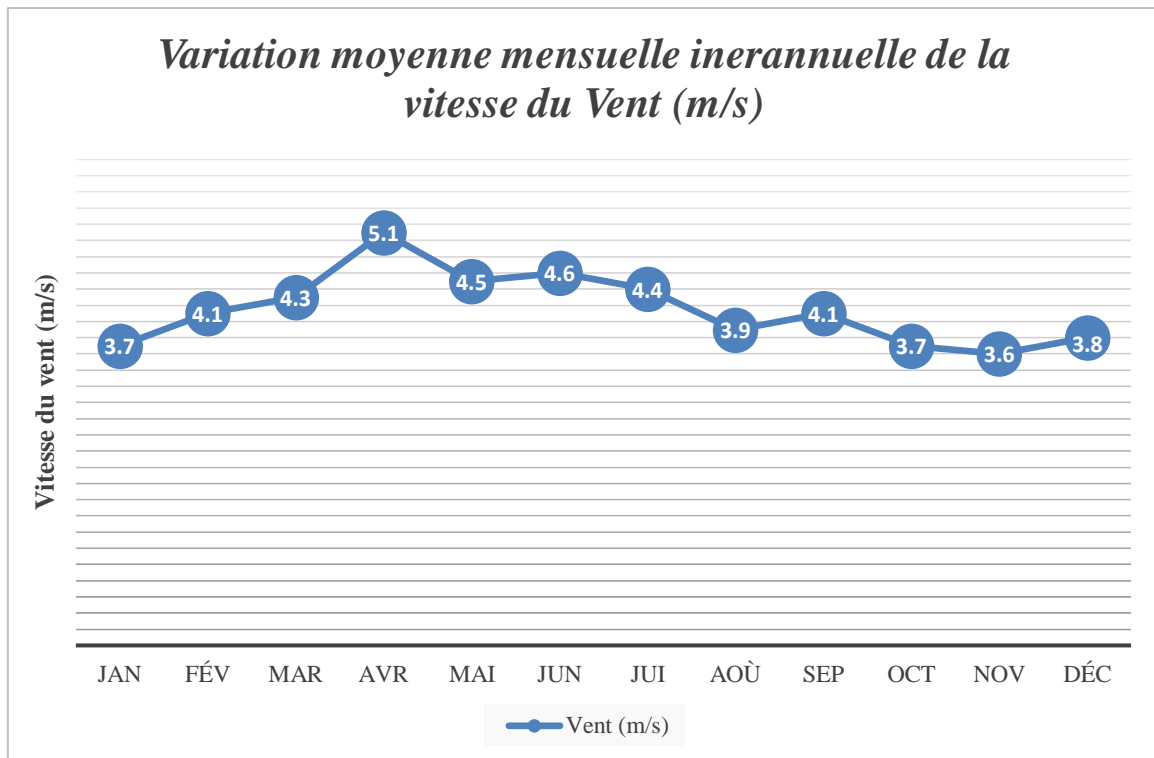


Figure 12. Vitesse Moyennes mensuelles Annuelles de la station de M'sila (1988-2018).

4. Humidité relative

L'humidité relative, également appelée degré hygrométrique, est une mesure quantitative de l'humidité de l'air qui compare la pression partielle de vapeur contenue dans l'air à la pression saturée de vapeur qui existerait si l'air était à la même température. Elle est considérée comme un facteur d'influence important dans le processus d'évaporation (Gueroui, 2014).

Le tableau 5 et la figure 10 révèlent une humidité plus élevée pendant la saison froide, atteignant une valeur de (76.1 %) au mois de Janvier. En revanche, la valeur la plus basse est enregistrée pendant la saison sèche, avec un taux de (35 %) au mois de Juillet. La moyenne annuelle de l'humidité dans la zone de M'sila s'établit à (56.9 %).

Tableau 5. Moyenne mensuelles et annuelles de l'humidité relative de station de M'sila.

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jui	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	Annuelle
H (%)	76.1	65.2	58.3	55.7	48.7	40.3	35	39.4	55.1	63.1	70.4	75.7	56.9

Source : Station météorologique de M'sila (2020).

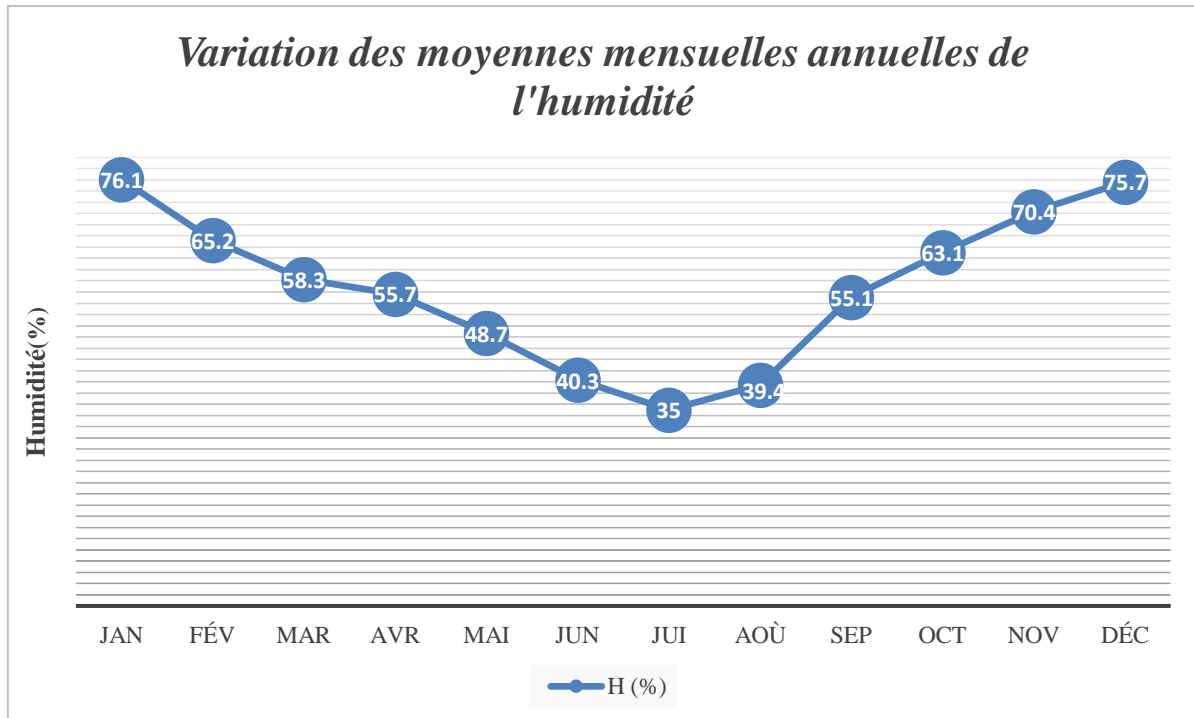


Figure 13. Variation des Moyennes mensuelles annuelles de l'humidité de la station de M'sila (1988-2018).

5. Gelée

D'après (Seltzer, 1946), la gelée est un phénomène climatique qui influe négativement sur la composition du sol (obstruction de l'aération). Le risque de la gelée blanche commence lorsque la température diminue à moins de 10 °C.

Selon le tableau ci-dessous et l'analyse des données (1988-2018), la gelée dans la région de M'sila se manifeste à la fin du mois de Novembre, et leur risque persiste durant les mois de Décembre, Janvier et Février, avec une moyenne de 12 jours par an.

Tableau 6. Nombre de jours mensuels interannuel de gelée.

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jui	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Annuelle
Gelée (jours)	6.2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	2.9	11.6

Source : Station météorologique de M'sila (2020).

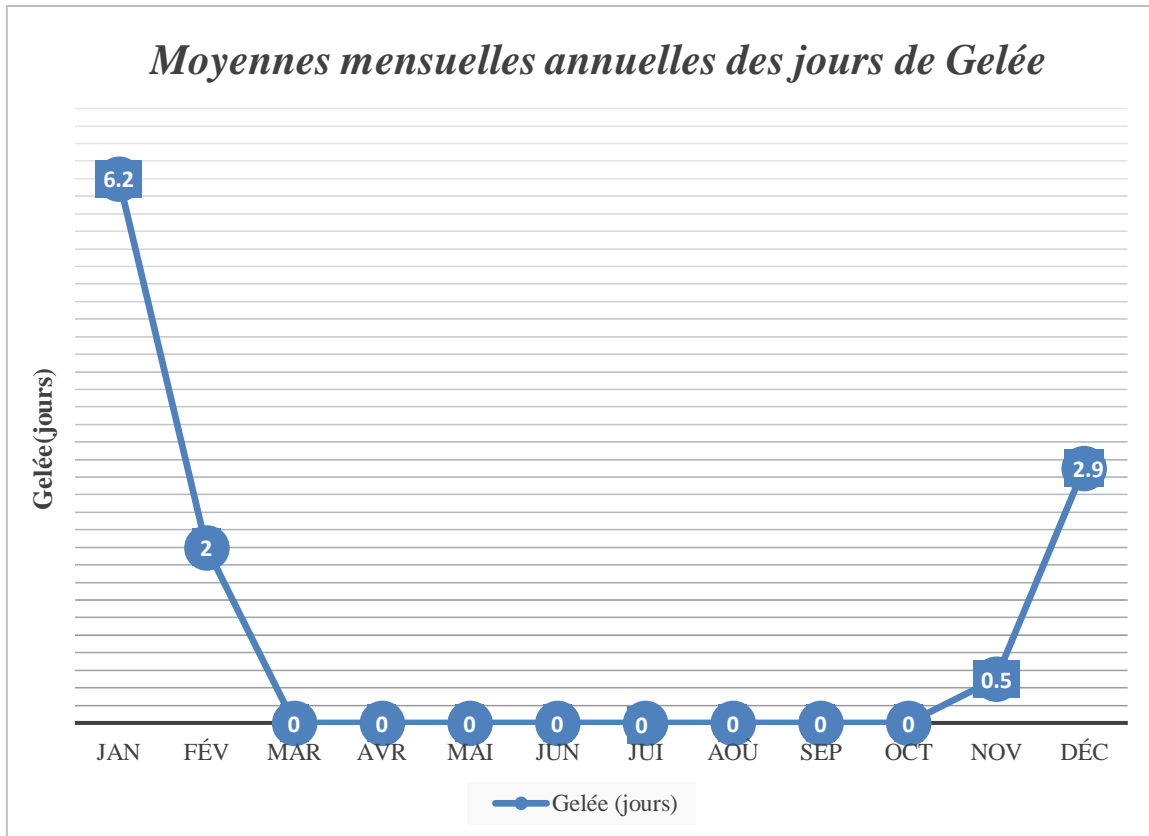


Figure 14. Nombre de jours mensuelle interannuelle de gelée de station M'sila (1988-2018).

6. Insolation

Le temps d'ensoleillement par jour est déterminé par l'intervalle entre le lever et le coucher du soleil, cet intervalle variant au fil des saisons.

La durée d'insolation dans la région de M'sila est très variable d'une saison à l'autre. Le tableau suivant donne une moyenne journalière d'insolation de 11.3 heures par jour, avec une valeur maximale atteinte au mois de Juillet. En revanche, la valeur minimale est de 5.7 heures par jour en Décembre, avec une moyenne annuelle de 8.55 heures par jour.

Tableau 7. Moyennes mensuelles et annuelles de la durée d'insolation (M'sila).

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jui	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	Annuelle
Insolation h/jour	6.2	8	8.4	8.9	10.1	10.6	11.3	10.07	8.8	8	6.6	5.7	8.55

Source : Station météorologique de M'sila (2020).

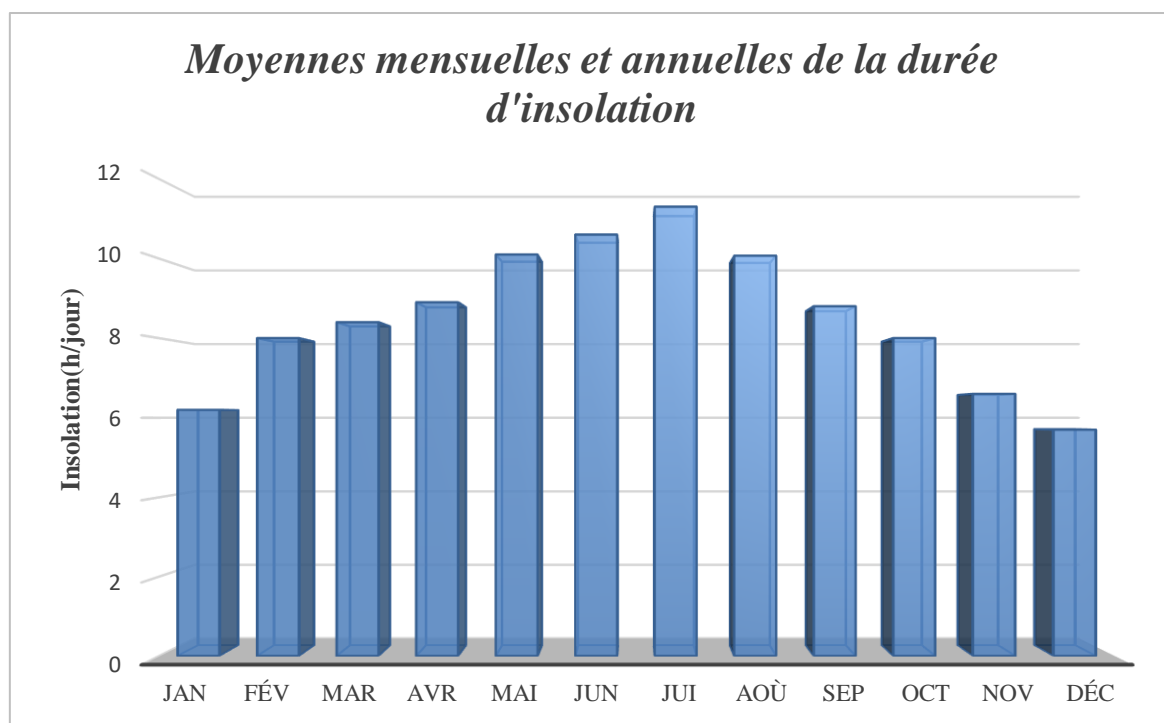


Figure 15. Moyennes mensuelles et annuelles de la durée d'insolation de la station de M'sila (1988-2018).

7. Précipitations

Les précipitations représentent l'ensemble des eaux météorologiques sous forme liquide (averses, bruine, pluie) ou solide (grêle, neige, grésil) qui tombent à la surface de la terre, ainsi que les précipitations qui se sont déposées ou occultées (gelée blanche, givre, rosée). Elles sont produites par un changement de pression ou de température (**Bounouira, 2007**).

7.1. Précipitations moyennes mensuelles

La répartition pluviométrique dans la région de M'sila joue un rôle crucial dans le cycle hydrologique local, ainsi que dans la recharge des nappes et le régime d'écoulement. Le tableau (8) et la figure (14) indiquent que le mois de Novembre est le plus pluvieux, enregistrant une valeur maximale de 19.67 mm, tandis que le mois de Juillet est le plus sec, avec une valeur minimale de 4.25 mm. Cette variation mensuelle de la quantité de pluie a eu un impact notable sur le climat de la région au cours des 30 dernières années.

Tableau 8. Précipitations moyennes mensuelles de la station de M'sila.

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jui	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc
Station (M'sila)	18.94	13.17	14.46	19.68	23.36	9.33	4.25	7.36	24.44	23.9	19.67	19.29

Source : Station météorologique de M'sila (2020).

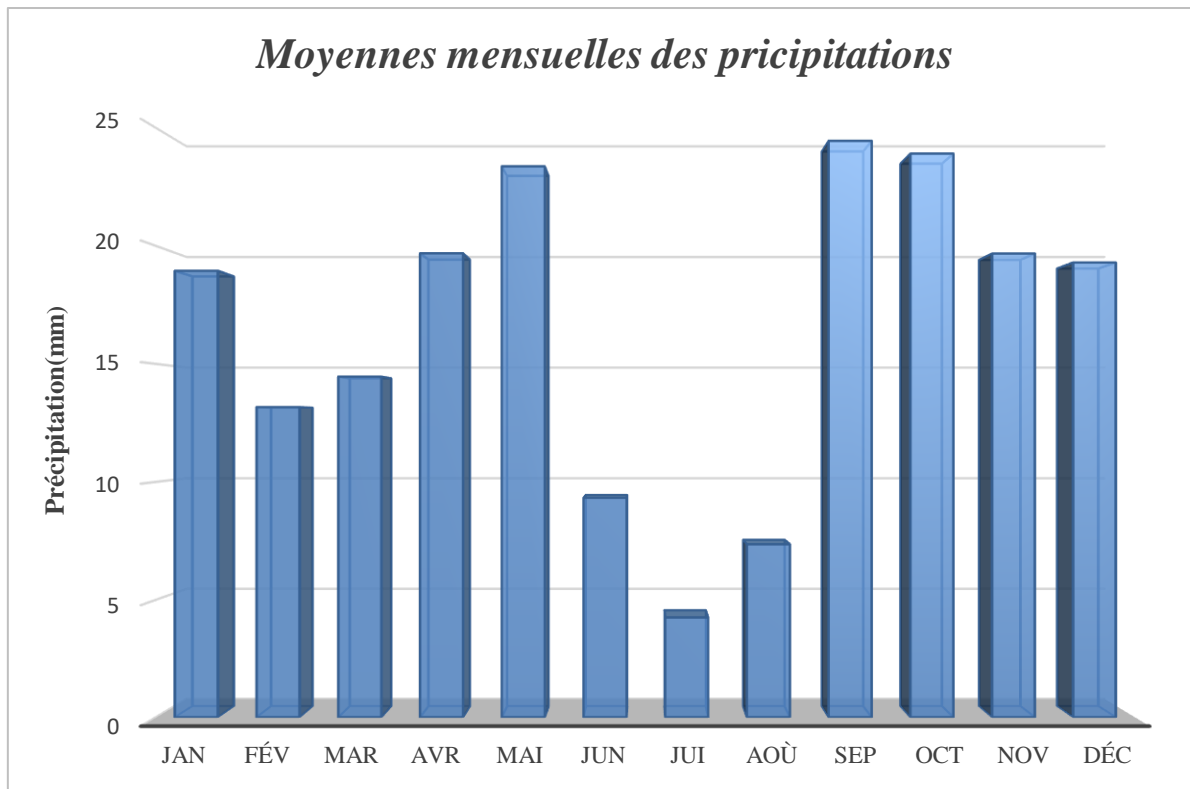


Figure 16. Variation des précipitations moyennes mensuelles de la station de M'sila.

Le coefficient de variation, défini comme le rapport entre l'écart type et la moyenne des précipitations enregistrées, permet de calculer la dispersion relative d'une série.

$$Cv = \frac{\sigma_x}{\bar{x}}$$

Avec :

Cv : Coefficient de variation.

σ_x : Écart –type de la série donnée.

\bar{x} : Pluviométrie moyenne pour une période de n année.

L'analyse du calcul du coefficient de variation de la série des précipitations de la région de M'sila montre que dans la saison la plus sèche, les valeurs les plus élevées atteignent leur pic au mois de Juillet avec une valeur maximale de 1.63. Cette fluctuation s'explique par les faibles précipitations pendant la période estivale. En revanche, la valeur la plus basse est observée au mois de Décembre avec un coefficient de variation de 0.69 (Fig. 15). Cette valeur suggère une certaine homogénéité des précipitations pendant la saison pluvieuse.

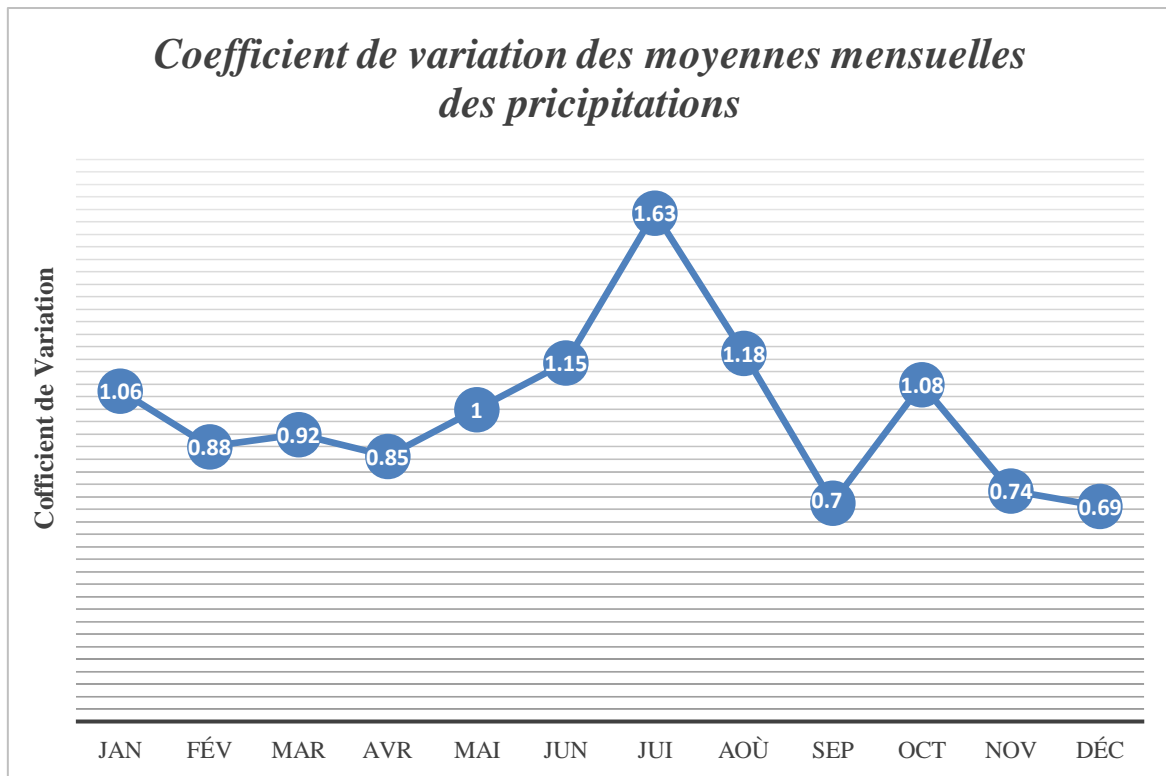


Figure 17. Coefficient de variation des précipitations moyennes mensuelles de Station de M'sila (1988-2018).

7.2. Précipitations moyennes annuelles

À partir des informations extraites de la courbe des variations interannuelles des précipitations de la station de M'sila pour la période 1988-2018 (Fig. 16), on peut déduire que:

- L'année 2004 est considérée comme la plus pluvieuse, avec une valeur maximale de 348 mm/an.
- En revanche, l'année 2003 est la plus sèche, avec une valeur minimale estimée à 105 mm/an.
- La moyenne annuelle des précipitations enregistrées pour la station de M'sila est de 197 mm/an.

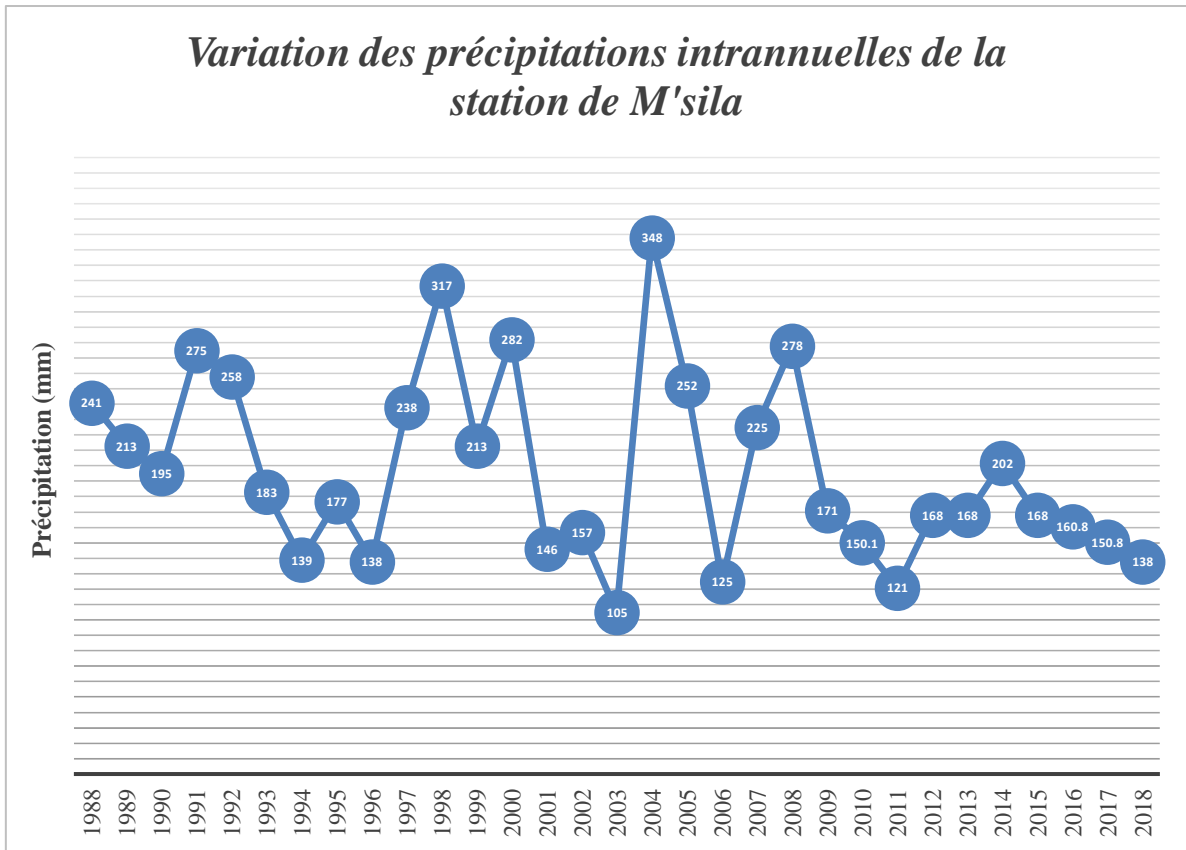


Figure 18. Variation interannuelle des précipitations de la station de M'sila (1988-2018).

Le coefficient pluviométrique est défini comme le rapport entre la précipitation d'une année sur la précipitation moyenne pour un lieu donné. Plus le coefficient ($H > 1$) est élevé, plus l'année est exceptionnelle (**Maoui, 2007**). La représentation mathématique, selon l'équation suivante :

$$H = \frac{H_i}{\bar{H}}$$

Avec :

H : Coefficient pluviométrique.

H_i : Pluviométrie de l'année donnée.

\bar{H} : Pluviométrie moyenne pour une période de n année.

La figure (17) montre que l'année la plus excédentaire de la région de M'sila, est l'année de 2004, avec un coefficient pluviométrique $H = 1.76$. Aussi, l'année la plus déficitaire en précipitations est l'année de 2003, avec une valeur du coefficient pluviométrique $H = 0.6$ ou $H < 1$.

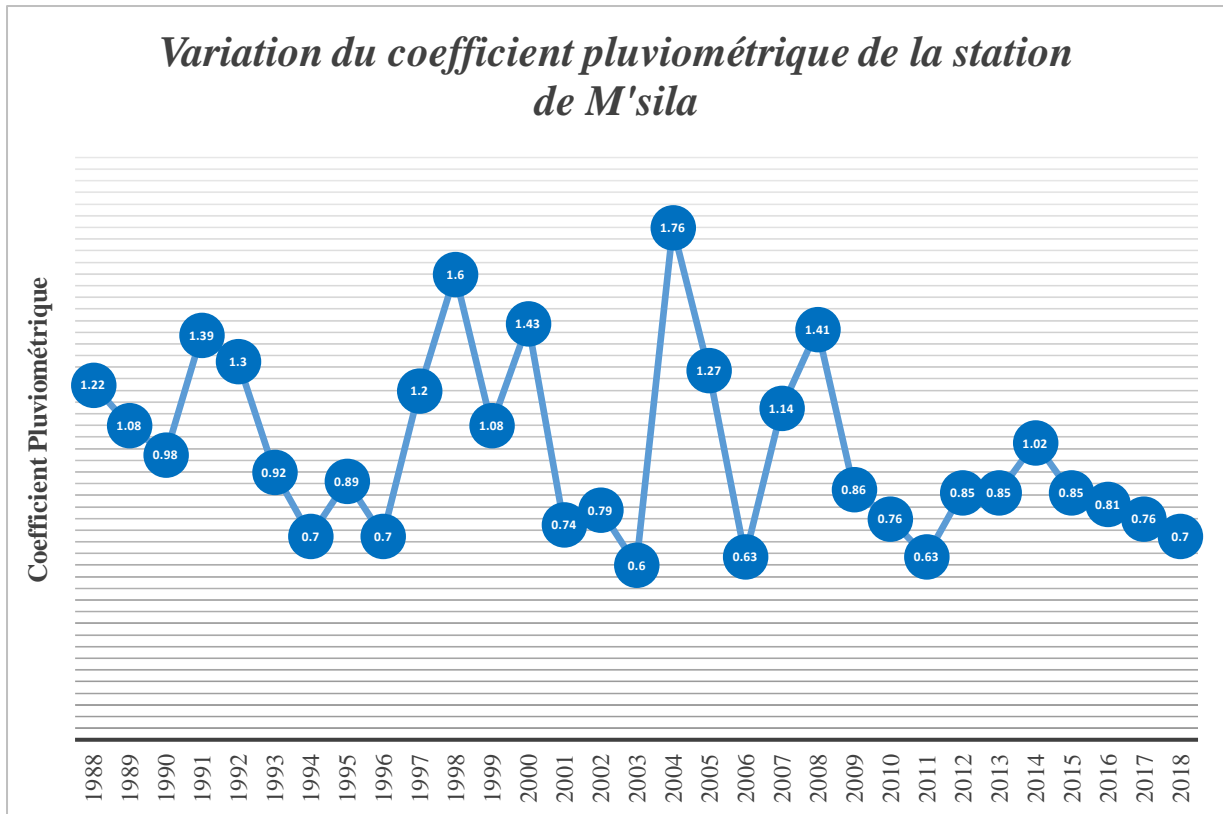


Figure 19. Variation du coefficient pluviométrique de la Station de M'sila.

7.3. Répartition saisonnière des précipitations

La pluviométrie dans la région de M'sila varie d'une saison à l'autre au cours d'une année de pluies. Le tableau (9) et la figure (18) indiquent que :

- ✓ La saison la plus pluvieuse est l'automne, avec des précipitations estimées à 68.01 mm/an, représentant 34 % de la pluviométrie totale.
- ✓ Les saisons de pluviométrie moyenne sont l'hiver et le printemps, avec des précipitations d'environ 51.4 mm/an et 57.5 mm/an respectivement, représentant 26 % et 29 % du total.
- ✓ En revanche, la saison la plus sèche avec les précipitations les plus faibles est l'été, avec une valeur de 20.94 mm/an, ce qui représente 10 % de la pluviométrie totale.

Tableau 9. Répartition saisonnière des précipitations de la station de M'sila.

Saisons		Automne		Hiver		Printemps		Été	
Stations	Période	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
M'sila	1988-2018	68	34.38	51.4	25.98	57.5	29.07	20.94	10.58

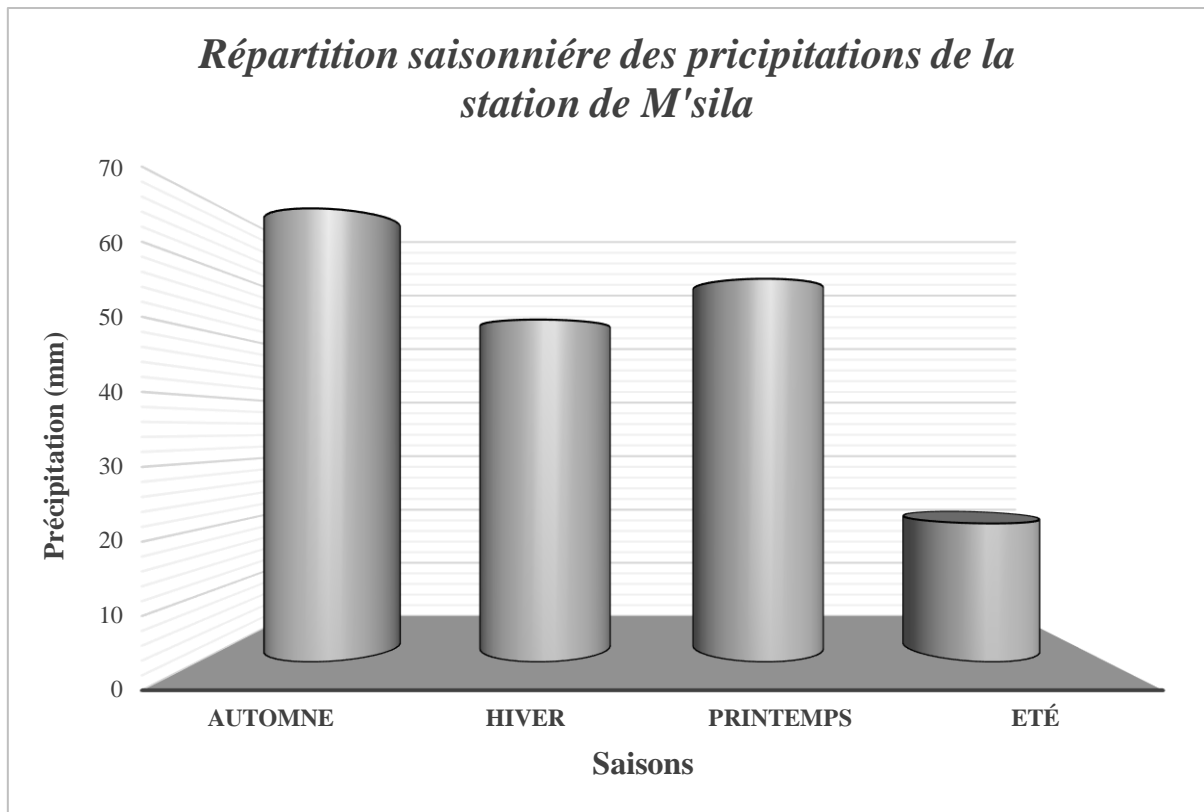


Figure 20. Répartition saisonnière des précipitations pour la station de M'sila (1988-2018).

8. Evapotranspiration

L'évapotranspiration est l'élément le plus important dans le processus du cycle hydrologique, qui désigne l'ensemble de l'évaporation directe des sols humides et d'autres surfaces d'eau, ainsi que de la transpiration des plantes. Selon (Gueroui, 2014) on distingue :

- ❖ L'évapotranspiration réelle, qui est la quantité des eaux perdue sous forme de vapeur.
- ❖ L'évapotranspiration potentielle, qui fait référence à l'eau qui peut être perdue dans les mêmes conditions, lorsqu'elle n'est plus un facteur limitant.

Le calcul et la détermination de ces paramètres à travers les formules suivantes :

8.1. Formule de Turc (moyenne annuelle)

Cette méthode calcule l'évapotranspiration réelle annuelle d'une certaine région en fonction de la quantité de précipitations annuelles en (mm) et de la température moyenne annuelle.

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Avec :

P : précipitations moyennes mensuelles.

$$L = 300 + 25 T + 0.05 T^3.$$

T : température moyenne annuelle (°C).

ETR : évapotranspiration réelle (mm).

Le calcul de l'évapotranspiration de la région de M'sila est illustré dans le tableau suivant :

Tableau 10. L'ETR par la formule de Turc (annuel) station de M'sila.

Station	P (mm)	T °C	L	ETR (mm/an)
M'sila	197	19.42	1151.7	202

8.2. Méthode de l'eau de Cw.Thornthwaite

Cette méthode a été créée par Thornthwaite pour calculer le bilan hydrologique à partir de l'utilisation de la réserve en eau facilement utilisable (RFU) exprimée en mm. L'hypothèse de cette méthode est que le sol peut stocker une certaine quantité d'eau (RFU), qui peut ensuite être absorbée par les plantes et utilisée dans le processus d'évaporation.

Thornthwaite a reconnu que le sol est saturé lorsqu'il absorbe une lame d'eau de 100 mm. Dans les zones arides ou semi-arides, le sol n'est pas toujours saturé et cette valeur maximale peut être ramenée à 50 mm (Archambault et al., 1975).

Pour la région de M'sila on prend une RFU de 50 mm, du fait que le sol de cette région n'est pas toujours saturé.

Le calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR) par Thornthwaite a révélé deux cas (Aouissi, 2009) :

- Si pour un mois, $P \geq ETP$ on pose que l'ETP = l'ETR, la quantité d'eau restante ($P - ETR$) va alimenter la RFU jusqu'à son maximum de 100 mm, et si elle dépasse cette valeur il y aura un excédent (Ex) qui ira soit sous forme d'infiltration efficace (I) vers la nappe, soit sous forme de ruissellement (R).

- Si $P < ETP$, la valeur de $ETR = P + RFU$ jusqu'à égalisation avec l'ETP. Si la RFU est nulle, il va se produire un déficit agricole (Da) ; $Da = ETP - ETR$ qui représente alors le besoin des cultures en irrigation.

Donc :

➤ Si $P \geq ETP \Rightarrow ETR = ETP$

➤ Si $P < ETP \Rightarrow ETR = P + RFU$

Tableau 11. Bilan d'eau par la méthode C.W Thornthwaite de la station de M'sila.

Paramètres	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jui	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Total
P (mm)	18.94	13.17	14.46	19.68	23.36	9.33	4.25	7.36	24.44	23.9	19.67	19.29	196.87
T° C	9.7	10.15	13.95	17.2	21.8	27.95	31.7	31.1	25.9	20.3	12.75	10.65	19.43
ETP (mm)	10.8	12.5	26.8	49.4	98.3	168.2	215.3	190.8	116.4	69.1	19.07	12.1	989.37
RFU (mm)	50	50	37.66	20.8	0	0	0	0	0	4.8	50	50	263.2
ETR (mm)	10.8	12.5	26.8	49.4	23.36	9.33	4.25	7.36	24.44	69.1	19.07	12.1	268.5
Déficit (mm)	0	0	0	0	74.9	158.8	211.05	183.4	91.9	0	0	0	720.05

L'analyse du bilan hydrique de Thornthwaite pour la station de M'sila (Tab. 11, Fig. 19) montre que l'évapotranspiration atteint son maximum durant l'été, entre la fin du mois de Mai jusqu'à le début du mois de Septembre. Cette élévation de l'évapotranspiration provoque un déficit agricole. Ainsi, la recharge de la RFU se reconstitue pendant la saison hivernale ou pluvieuse, entre les mois d'Octobre à Avril.

9. Ruissellement

Le ruissellement c'est un processus physique qui représente l'eau d'écoulement irrégulier dans la surface de la terre après la pluie.

Tixeront et Berkloff en 1961, ont découvert une formule pour calculer le ruissellement à condition que les précipitations ne dépassent pas 600 mm.

$$R = \frac{P^3}{3ETP^2}$$

Avec :

R : ruissellement.

P : précipitations.

ETP : Evapotranspiration potentielle calculée par la méthode de Thornthwaite.

Cette méthode est modifiée par Romantchouk en 1974 comme suit :

$$R = \frac{P^3}{3}$$

Les résultats sont illustrés dans le tableau 12.

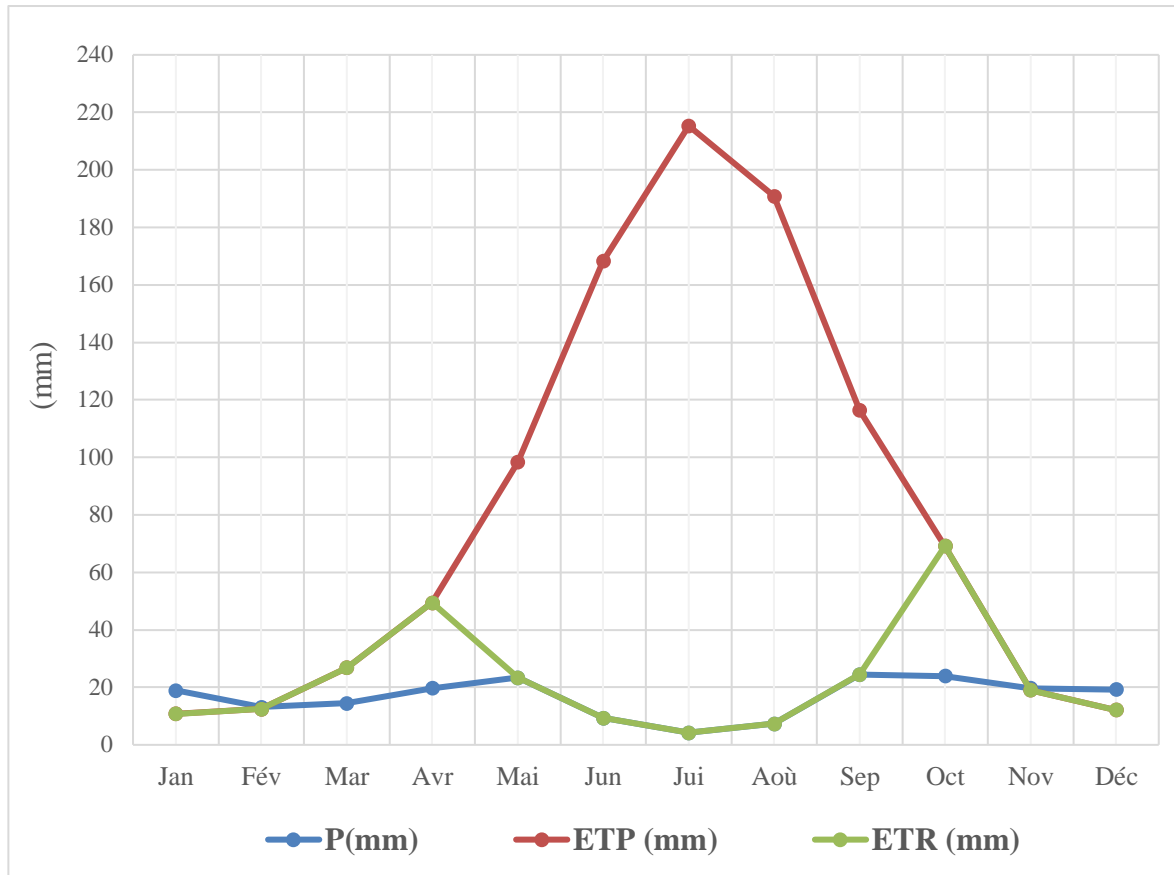


Figure 21. Bilan d'eau par la méthode de Cw.Thornthwaite de la station de M'sila (1988-2018).

Tableau 12. Résultats de ruissellement par la formule de Tixeront-Berkaloff.

Stations	Tixeront-Berkaloff (mm/an)	Tixeront-Berkaloff modifié (mm/an)
M'sila	2.60	2.54

10. Rythme climatique

10.1. Diagramme pluviothermique (ombrothermique)

Les travaux de Bagnouls et Gaussen sont les plus importants pour trouver la relation entre les végétaux et les données climatiques. Le bilan hydrique annuel joue un rôle fondamental et représente un facteur limitant pour les végétations. Il faut donc déterminer la longueur de la saison sèche. Ce diagramme représente la température moyenne mensuelle et les précipitations moyennes mensuelles sous le même graphe, en suivant la relation ($P \leq T$) (Bagnouls, 1953).

Le diagramme (Fig. 20) montre que le climat de la région de M'sila se divise en deux périodes distinctes. La première est chaude et sèche, s'étendant sur quatre mois de Mai à Août. Au cours de cette période, la température maximale dépasse les 38°C, atteignant son pic au

mois de Juillet. D'autre part, la deuxième période est froide et peu humide, couvrant huit mois de Septembre à Avril. Pendant cette période, la température moyenne minimale descend à 15°C, et les précipitations moyennes mensuelles atteignent environ 20 mm.

10.2. Indice de De. Martonne

Les scientifiques et climatologues du monde entier ont créé des indices spécifiques à la suite de leurs recherches afin de mieux comprendre le climat de la planète et d'estimer le type de climat ainsi que l'aridité de chaque zone du globe terrestre.

Actuellement l'indice le plus utilisé a été établi par (Martonne, 1923). Cet indice permet de déterminer l'aridité annuelle à travers la température et les précipitations annuelles. Le calcul se fait par la formule suivante :

$$I = \frac{P}{T + 10}$$

Avec :

P : précipitation moyenne annuelle (mm).

T : température moyenne annuelle (°C).

I : coefficient d'aridité.

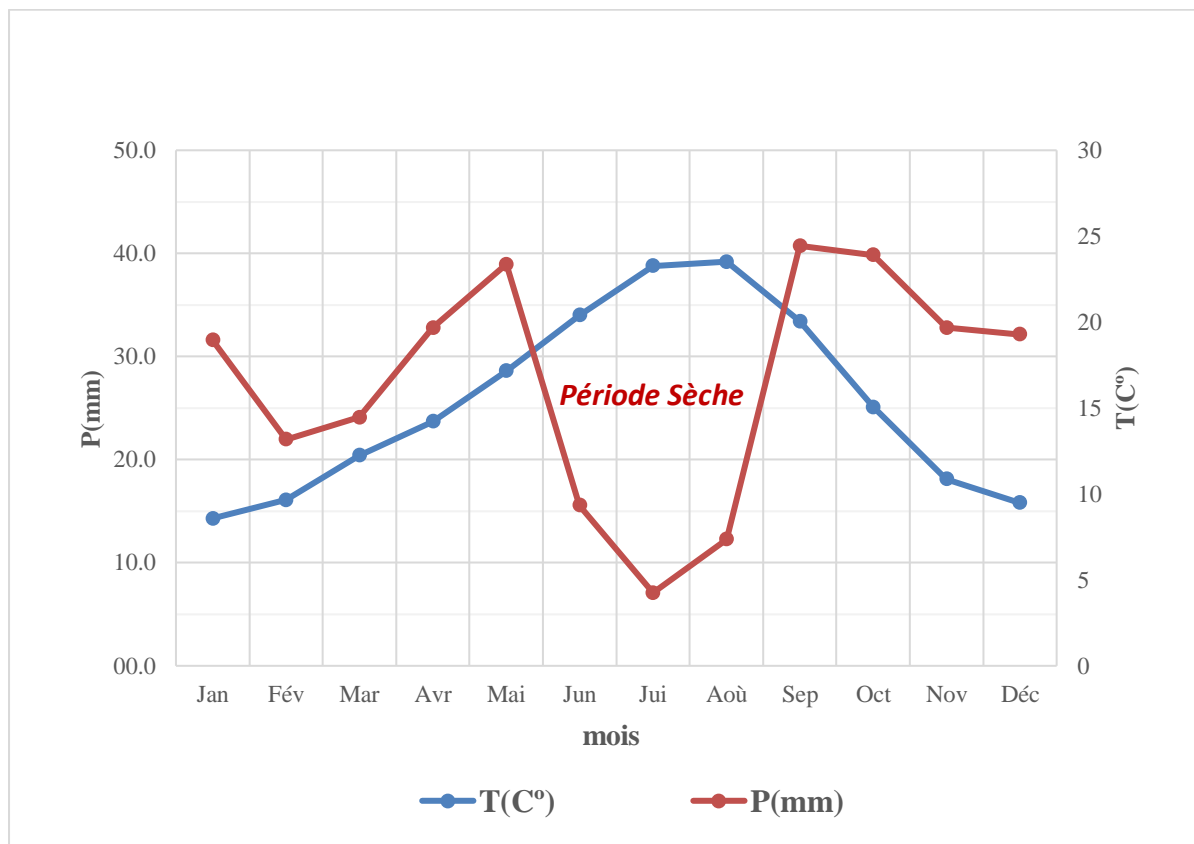


Figure 22. Diagramme Ombrothermique de la station de M'sila (1988-2018).

Tableau 13. Classement de climat en fonction de l'indice d'aridité de Martonne.

Type de Climat	Classement de l'Indice d'Aridité
Climat hyperaride	$I < 5$
Climat désertique	$5 < I < 7.5$
Climat steppique	$7.5 < I < 10$
Climat semi-aride	$10 < I < 20$
Climat tempéré	$20 < I < 30$

L'application numérique appliquée montre une valeur de 20.14 pour la région de M'sila. Après le calcul de l'indice de Martonne, on constate que le climat de la région de M'sila, pendant la période de (1988-2018) est de type de climat tempéré dans l'extrême du Nord et de type de climat semi-aride dans la partie Sud.

10.3. Climagramme d'EMBERGER

Dans la zone Méditerranéenne, EMBERGER définit les étages bioclimatiques de cette zone à partir du calcul du quotient pluviothermique (Q2). Il divise le climat de la région en cinq étages bioclimatiques déterminés par le calcul de la moyenne annuelle des précipitations et des températures. Pour cette dernière, on prend la moyenne des maximums du mois le plus chaud (M) et la moyenne des minimums du mois le plus froid (m), selon la formule suivante :

$$Q_2 = 2000 \frac{P}{M^2 - m^2}$$

Avec :

Q2 : quotient pluviothermique d'Emberger.

P : précipitations moyennes annuelles (mm).

M : moyenne des températures maximales du mois le plus chaud (K).

m : moyenne des températures minimales du mois le plus froid (K).

L'expression de la température en Kelvin, (**K = T °C + 273.15**).

Tableau 14. Valeurs de Q2 de la région de M'sila (1988-2018).

Régions	P (mm)	M		M		Q2
		C°	K	C°	K	
M'sila	197	38.8	311.9	4.2	277.35	19.35

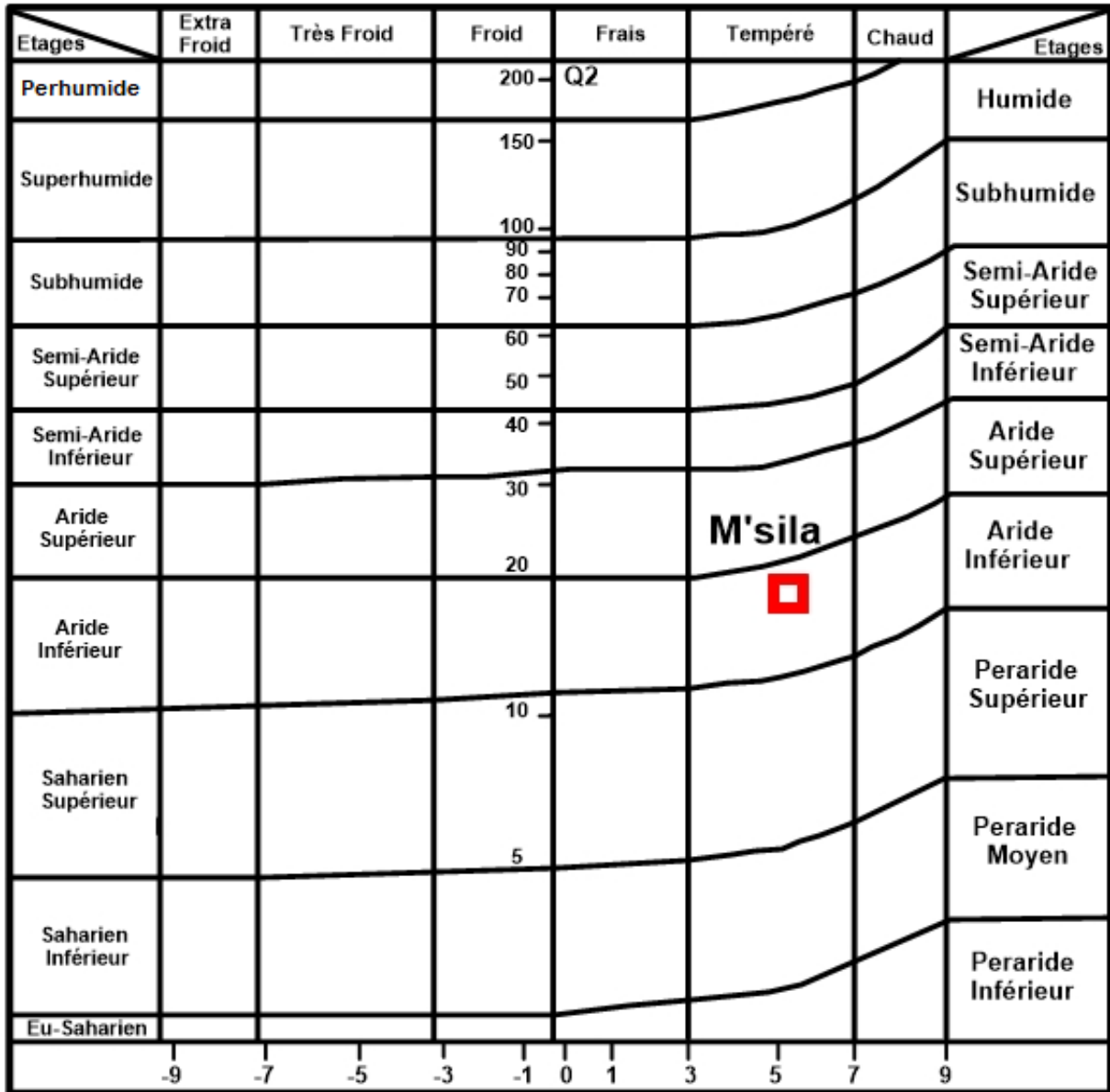


Figure 23. Climagramme d'Emberger station de M'sila (1988-2018).

Selon le tableau (Tab.14) et le Climagramme d'Emberger (Fig. 21), la région de M'sila se situe dans l'étage bioclimatique aride.

Conclusion

La région de K'sob est une zone agricole localisée aux Nord de la commune de M'sila et le Nord-est de la wilaya. Elle est située entre la région montagneuse au Nord et les régions des plaines au sud. La géologie de la région de K'sob est liée à celle du bassin du Hodna au Nord. Leurs formations géologiques sont constituées par le quaternaire composé de roches calcaires et d'alluvions actuelles ou récentes. On trouve sur le fond de l'oued K'sob ou sur ses berges, des cailloutis ou des sables calcaires, et parfois de la vase. D'autre part, les terres agricoles dans

le périmètre de K'sob sont divisées en deux régions : au Nord du périmètre, on trouve Boukhmissa, Lebkhata, Oulades Slama et M'sila Vert, où se pratiquent la culture maraîchère et l'arboriculture. Au sud du périmètre, dans les régions de Mezrir et Sbaa el Guebli, on trouve la céréaliculture. Le climat de la région de k'sob est un climat méditerranéen de type semi-aride caractérisé par deux périodes, une période chaude et sèche et une période froide et peu humide. La température moyenne annuelle est estimée à 19.42 °C, et les précipitations ne sont pas homogènes, avec une moyenne annuelle de 197 mm/an.

*Chapitre II : Étude
physico-chimique des
eaux d'irrigation de la
zone d'étude*

Chapitre II : Étude physico-chimique des eaux d'irrigation de la zone d'étude

1. Introduction

La qualité de l'eau est indispensable à la vie de tous les êtres vivants. Elle est également indispensable à toute activité économique, qu'elle soit agricole ou autre. La composition des éléments chimiques des eaux joue un rôle très important pour déterminer leur type d'utilisation et leur qualité. En Algérie, la qualité des eaux superficielles, des oueds et des plans d'eau se dégrade très rapidement ces dernières années. Ainsi, l'irrigation en Algérie représente le premier consommateur d'eaux superficielles. Dans la région de M'sila et surtout dans les zones nord et nord-est de la wilaya, l'irrigation est basée sur les eaux de l'oued K'sob. Ce chapitre est consacré à l'étude des caractéristiques physico-chimiques de ces eaux afin de déterminer leur type et leur fiabilité en tant qu'eau d'irrigation.

2. Méthodologie

2.1. Techniques d'échantillonnage et méthodes d'analyse

Les études relatives à la qualité des eaux destinées à la consommation ou à l'irrigation passent par plusieurs étapes à savoir :

- ✓ Le choix des points ou des stations de prélèvement : ils doivent être représentatifs dans la zone d'étude en repérant les coordonnées géographiques de chaque station choisie.
- ✓ Prélèvements : en utilisant des outils spécifiques d'échantillonnages avec le respect des normes requises.
- ✓ Méthodes d'analyse : basées aussitôt sur les analyses physico-chimiques des eaux avec le respect des normes en vigueur.
- ✓ Lecture des résultats : tout en les comparant aux standards de qualité des eaux (Tab. 15, Tab. 16).

Tableau 15. Normes de potabilité de l'eau.

Paramètres	Unités	Valeurs maximales admissibles	
		⁽¹⁾ Algérie	⁽²⁾ OMS
Température	°C	25	30
Concentration en ions			
hydrogène	Unité pH	≥ 6.5 et ≤ 9	≥ 6.5 et ≤ 8.5
Conductivité	(µs/m)	/	400
Salinité	%	1.5	/
TDS	mg/l	/	< 600
Oxygène dissous	mg/l	<5	<5
Turbidité	NTU	5	1
Calcium	mg/l	200	/
Magnésium	mg/l	/	50
Chlorures	mg/l	500	250
Sulfates	mg/l	400	250
Nitrates	mg/l de NO ₃	50	50
Nitrites	mg/l de NO ₂	0.2	3
Ammonium	mg/l	0.5	0.5
Phosphore	mg/l	5	5
Silices	mg/l	/	<10
Sodium	mg/l	200	200
Potassium	mg/l	12	12

1 : Selon le décret du 22 mars 2011 (JORA), Algérie.

2 : Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), 2011.

Tableau 16. Normes de qualité pour les eaux destinées à l'irrigation.

Paramètres	Unité	Concentration maximale admissible
pH	/	6.5 ≤ pH ≤ 8.5
MES	mg/l	30
Infiltration du SAR = 0 - 3 CE		0.2
3 - 6		0.3
6 - 12		0.5
12 - 20	ds/m	1.3
20 - 40		3
DBO5	mg/l	30
DCO	mg/l	90
Chlorures	mg/l	350
Bicarbonate (HCO ₃)	mg/l	518

Source : Selon le décret du 15 juillet 2012 (JORA), Algérie.

2.2. Prélèvements

Les prélèvements d'échantillons des eaux dans la zone d'étude de Oued K'sob sont répartis sur quatre campagnes d'échantillonnage avec une fréquence saisonnière. La première campagne a eu lieu en Octobre 2020, la deuxième en Janvier 2021, la troisième en Avril 2021 et la dernière campagne en Juillet 2021. Ainsi, dix (10) stations d'échantillonnage (S1 à S10) ont été choisies pour notre étude, réparties tout au long du Oued K'sob (Tab.17).

Tableau 17. Campagnes d'échantillonnage dans la zone d'étude.

Campagnes	1	2	3	4	
Date de Prélèvement	Octobre 2020	Janvier 2021	Avril 2021	Juillet 2021	Total
Nombre d'échantillons prélevés	10	10	10	10	40
	Points	Latitude	Longitude	Elévation (m)	
Cordonnées des points de prélèvement	1	35°51'53.84"N	4°36'6.85"E	623	
	2	35°51'41.94"N	4°35'33.39"E	612	
	3	35°51'13.91"N	4°35'10.16"E	606	
	4	35°49'39.97"N	4°34'4.53"E	569	
	5	35°49'7.07"N	4°34'15.22"E	554	
	6	35°48'46.96"N	4°33'36.57"E	546	
	7	35°48'30.46"N	4°33'9.24"E	538	
	8	35°46'58.91"N	4°33'31.38"E	518	
	9	35°46'2.66"N	4°33'21.32"E	512	
	10	35°44'28.36"N	4°33'29.91"E	494	

2.3. Méthodes d'analyse

Les analyses des eaux de Oued K'sob ont été réalisées en deux étapes, une étape pour les mesures in-situ et une autre étape relative aux analyses chimiques au laboratoire. Les mesures in-situ sont portées sur des paramètres physiques sensibles aux conditions externes à savoir la température, le pH, la conductivité électrique, TDS et la salinité, en utilisant un multiparamètre portable de marque (HI N : 9829). Aussi, un oxymètre de type (CelloX 325) a également été utilisé pour mesurer l'oxygène dissous. Ensuite, les échantillons sont prélevés dans des

bouteilles en polyéthylène de 1.5 L, conservés à une température de 4°C et transportés au laboratoire.

Les analyses chimiques ont été réalisées selon les guides de (AFNOR, 1979) , **Rodier, 2009, APHA, 1995** , au niveau du laboratoire de recherche de Génie Civil et Hydraulique (LGCH) à l'Université de 8 Mai 1945, Guelma. Pour déterminer la dureté totale ou titre hydrotimétrique (TH), la méthode complexométrique par titrage à l'EDTA a été utilisée avec une pincée de l'indicateur coloré (noir ériochrome) de couleur mauve et titrer jusqu'à l'obtention d'une couleur bleu. Le calcium est déterminé par la méthode complexométrique par titrage à l'EDTA avec une pincée d'indicateur Murexide et la présence de NaOH (2N) et la titration par l'EDTA jusqu'à l'obtention d'une couleur violet. La concentration en magnésium est obtenue directement par le calcul de la différence entre la dureté totale et la dureté calcique (**Rodier, 2009**). Les chlorures sont déterminés par volumétrie selon la méthode de Mohr par l'ajout de deux gouttes d'indicateur coloré K_2CO_4 (10 %) et titrer par $AgNO_3$ (0.01 N) jusqu'à l'obtention de coloration brunâtre. Le dosage des bicarbonates est réalisé par titrimétrie en utilisant une solution d'acide sulfurique (H_2SO_4) avec la présence d'un indicateur coloré (orange de méthyle). Le dosage du sodium et du potassium a été réalisé par spectrophotométrie d'émission de flamme. La Demande Chimique en Oxygène (DCO) est déterminée par l'oxydation du chromate de potassium, alors que la turbidité est mesurée par un turbidimètre de type (AL450T-IR). Les éléments en nitrates, en nitrites, en ammonium, en phosphates, en sulfates et en silice ont été déterminés par spectrophotomètre UV-visible (WTW) en utilisant des Kits spectroquants pour chaque paramètre. Pour la présente étude, la balance ionique est déterminée inférieure à 6 % pour toutes les campagnes. Les calculs hydrochimiques, les diagrammes de Piper et Wilcox pour les cations et anions ont été effectués à l'aide du programme DIAGRAMS (**Smiler, 2003**), rendu possible par le protocole PHREEQC (**Parkhurst & Appelo, 1999**).

3. Résultats et interprétations

3.1. Paramètres physico-chimiques

3.1.1. Paramètres physiques

✚ Température

La variation de la température de l'eau entre les saisons représente un facteur très important, elle modifie la qualité de l'eau en augmentant les activités entre les éléments chimiques, ou par des activités bactériennes, et parfois par l'évaporation. Cette variation de température est liée

aux conditions climatiques extérieures, à la nature de la région (hydrogéologie, géologie, pédologie) et parfois par l'effet anthropique (Guettaf, 2014).

Les valeurs de la température observées dans la zone d'étude sont illustrées dans la figure 22. La température varie entre un minimum de 7 °C enregistré pendant la deuxième campagne d'hiver et un maximum de 19 °C noté au cours de la quatrième campagne d'été. Par conséquent, la température de Oued K'sob présente une moyenne générale de 13.33 °C et tous les échantillons observés ne dépassent pas 25 °C respectant ainsi les normes de l'OMS (OMS, 2011).

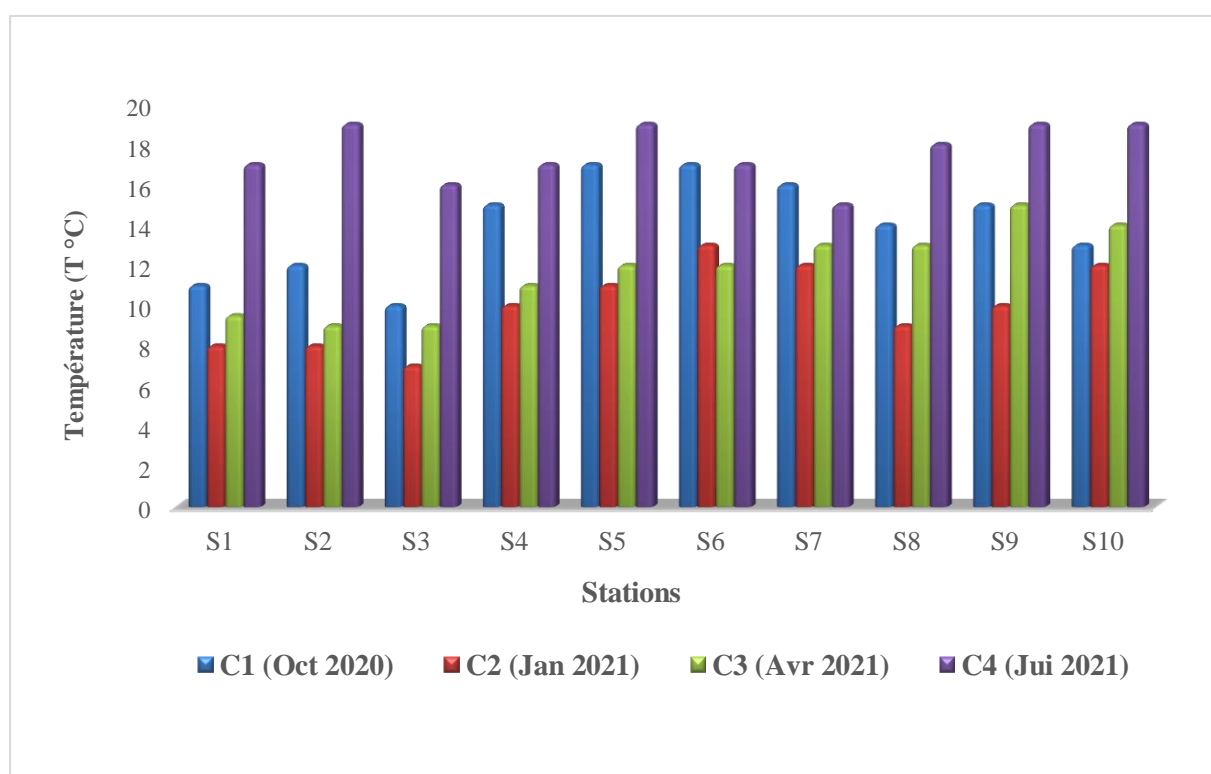


Figure 24. Variation de la température entre les campagnes et les stations.

✚ Potentiel hydrogène

Le pH est un élément ou paramètre essentiel et très important pour déterminer l'acidité et l'alcalinité de l'eau. Il joue un rôle principal pour déterminer l'effet des éléments toxiques dans l'eau comme le fer, le mercure, l'aluminium, et l'ammoniac ou les autres éléments chimiques, par le changement de l'état de l'eau (Gaujous, 1995).

Les résultats obtenus du pH pour toutes les campagnes (saisons) montrent des valeurs comprises entre 6.78 et 7.98 avec une moyenne générale de 7.3. Ces valeurs du pH sont dans les normes d'usage en irrigation (Fig. 23) (JORA, 2012).

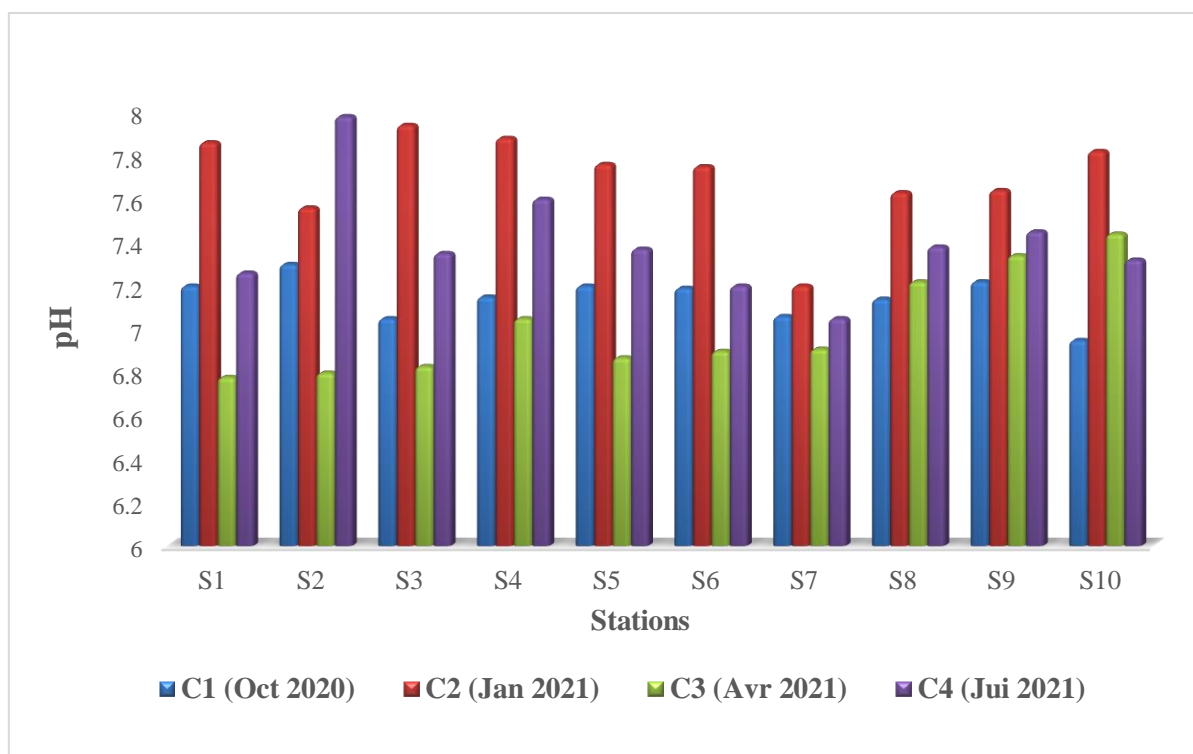


Figure 25. Variation du pH entre les campagnes et les stations.

✚ Conductivité électrique

La conductivité électrique est un paramètre essentiel dans l'étude de la qualité des eaux. Elle est liée à la présence d'éléments ioniques dans l'eau et permet de déterminer le degré de minéralisation des eaux et la quantité de sels dissous dans le milieu.

Les résultats obtenus montrent que ; pour la première campagne (Automne), les valeurs de CE oscillent entre 2000 et 6280 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (S10), avec une moyenne de 3152 $\mu\text{s}/\text{cm}$. Pour la deuxième campagne d'hiver, la conductivité varie entre 2420 et 7100 $\mu\text{s}/\text{cm}$, la valeur la plus élevée enregistrée à la station (S10), avec une moyenne de 3815 $\mu\text{s}/\text{cm}$. Pendant la troisième campagne (Printemps) les valeurs oscillent entre 2327 et 4299 $\mu\text{s}/\text{cm}$ avec une moyenne de 3416.9 $\mu\text{s}/\text{cm}$. En été, les valeurs de la conductivité électrique varient entre 1589 et 3844 $\mu\text{s}/\text{cm}$ avec une moyenne de 3131.2 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (Fig. 24). La moyenne générale pour les quatre campagnes est de 3378.7 $\mu\text{s}/\text{cm}$, ces valeurs dépassent les normes exigées pour l'usage en irrigation (> 3000 $\mu\text{s}/\text{cm}$). La forte minéralisation des eaux de Oued K'sob est probablement due à la présence des roches riches en sels et de gypse dans la région Nord de Oued K'sob (JORA, 2012).

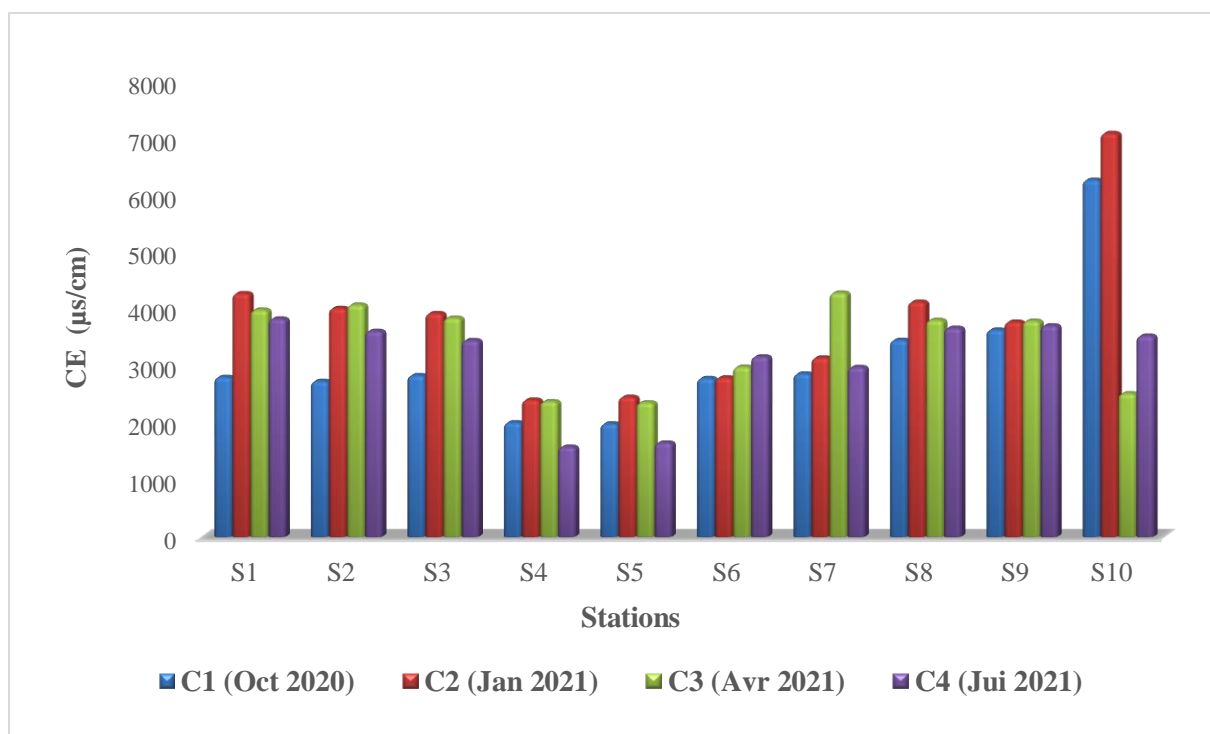


Figure 26. Variation de la conductivité électrique entre les campagnes et les stations.

Salinité

La salinité des eaux est liée par l'existence de plusieurs sels dissous dans l'eau comme le sodium et le potassium, le calcium et le magnésium, et d'autre part, par la présence de bicarbonates, de sulfates et de chlorures (**Harivandi, 1999**).

Les résultats de la salinité pour la première campagne (Automne) montrent des valeurs entre 0.1 à 0.34 %, avec une moyenne de 0.17 %. La deuxième campagne (L'hiver), révèle des valeurs comprises entre 1.1 et 3.9 %, avec une moyenne de 1.92 %. En Printemps, les concentrations de la salinité varient entre 1.31 et 2.82 % avec une moyenne de 1.99. Pour la quatrième campagne (été), la salinité varie entre 0.86 à 2.18 % avec une moyenne de 1.76 % (Fig. 25). Ces résultats obtenus dépassent les normes Algériennes > 1.5 % pour les campagnes 2, 3 et 4 (**JORA, 2012**).

La forte teneur en salinité de ces campagnes est probablement liée aux précipitations de la période hivernale, qui provoquent une dissolution et une altération des roches en augmentant la teneur en sels dissous.

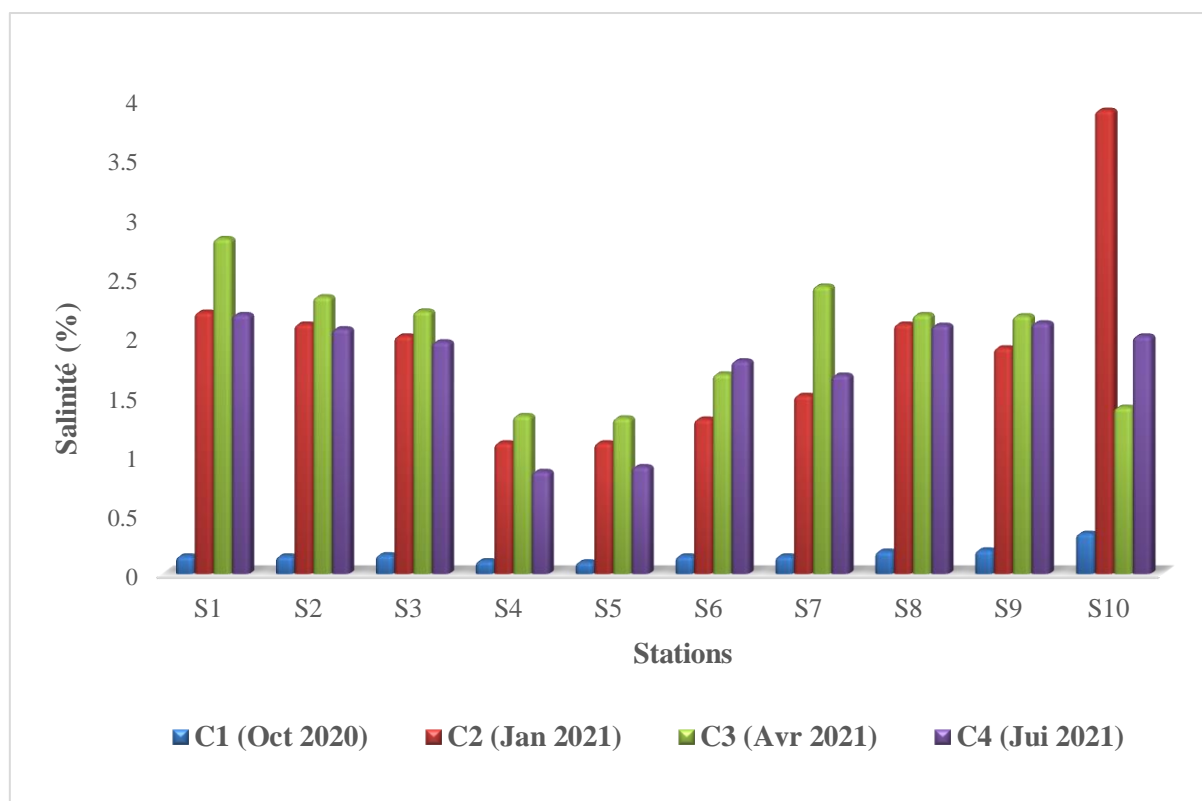


Figure 27. Variation de la salinité entre les campagnes et les stations.

✚ Total des solides dissous (TDS)

Total des solides dissous (TDS) représente l'ensemble des éléments organiques ou inorganiques dissous dans l'eau, exprimée en particules par million (ppm) ou par (mg/l).

Les valeurs de TDS observées pour la première campagne (Automne) oscillent entre 1336 et 4120 mg/l, avec une moyenne de 2104.2 mg/l. Pour les deuxième et troisième campagnes, les valeurs varient entre 1145 et 3436 mg/l avec une moyenne de 1816 mg/l et entre 1188 et 2150 mg/l avec une moyenne de 1710.6 mg/l respectivement. Pendant la dernière campagne d'été, la teneur en TDS varie entre 794 et 1924 mg/l, avec une moyenne de 1566.7 mg/l (Fig. 26). Les valeurs enregistrées dépassent les normes requises (600 mg/l) (OMS, 2011).

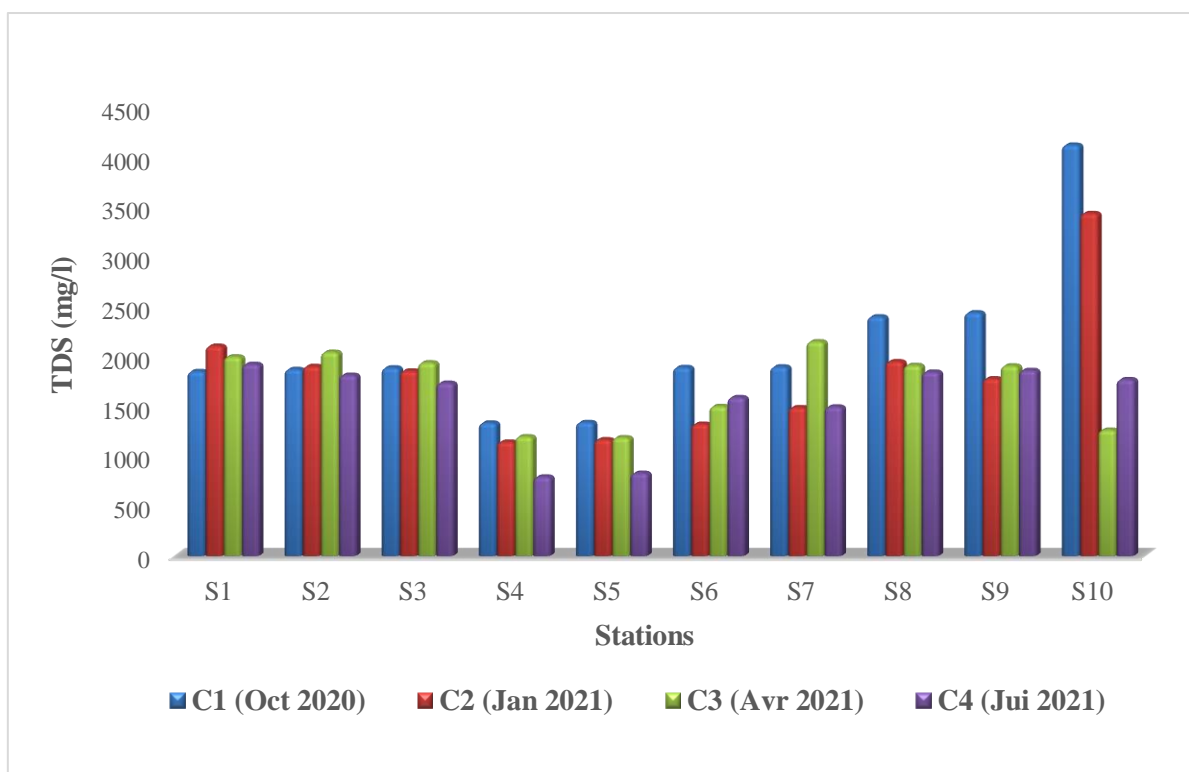


Figure 28. Variation de TDS entre les campagnes et les stations.

✚ Turbidité

La turbidité est l'un des paramètres les plus importants pour estimer et évaluer la qualité de l'eau. Elle est liée à la présence de particules en suspension et non dissoutes dans l'eau (Leroy, 1999).

Les résultats obtenus de la turbidité montrent des valeurs variables entre les stations. Pour la première campagne (Automne), elles varient entre 3.61 et 124 NTU (S4) avec une moyenne de 35.95 NTU. Pour la deuxième campagne, les valeurs oscillent entre 1.73 et 36.7 NTU avec une moyenne de 11.05 NTU. Pour la troisième campagne (Printemps), les valeurs varient entre 1.15 et 6.81 NTU avec une moyenne de 2.8 NTU. En été, les valeurs oscillent entre 7.53 à 76.2 NTU avec une moyenne de 35 NTU (Fig. 27). Ainsi, la moyenne générale de la turbidité de Oued K'sob est de 21.2 NTU dépassant les normes Algériennes et de l'OMS (OMS, 2011 ; JORA, 2012). Les valeurs de turbidité élevées observées dans l'Oued K'sob, révèlent l'effet de l'érosion sur les berges de l'oued, la croissance des plantes aquatiques, mais aussi l'effet anthropique à travers la modification des cours d'eau.

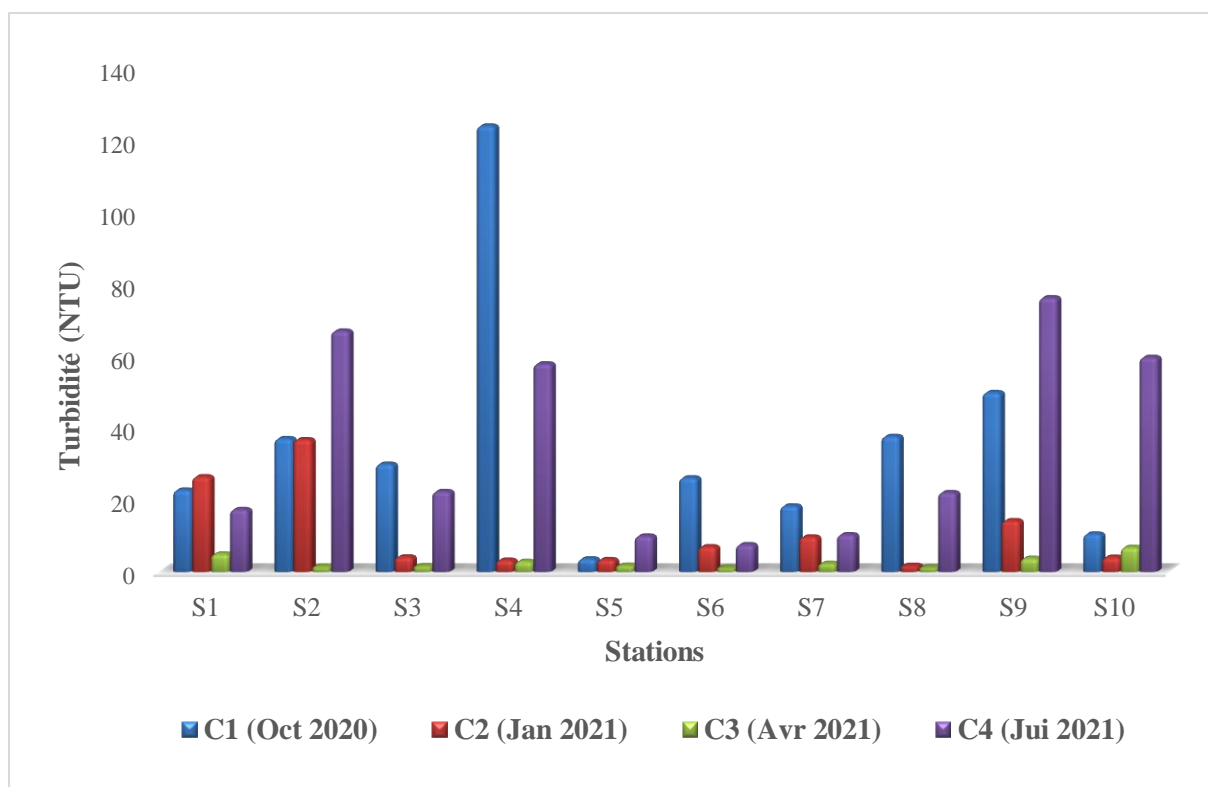


Figure 29. Variation de la turbidité entre les campagnes et les stations.

✚ Oxygène dissous (O₂)

L'oxygène est un élément fondamental pour la vie. Il existe sous forme d'air atmosphérique (environ 21%), et sous forme de gaz dissous dans l'eau (environ 35%). Pour déterminer la quantité d'oxygène dissous dans l'eau, il faut prendre en considération la température et la pression données, ainsi que la saturation des eaux à 100 %, L'oxygène dissous joue un rôle principal pour déterminer l'état de la vie aquatique (**McBride & Rutherford, 1983**).

Les valeurs obtenues d'O₂ pour toutes les campagnes sont comprises entre 0.6 % et 1.1 %, et tous les échantillons sont modérément oxygénés, avec une moyenne de 0.91% (Fig.28).

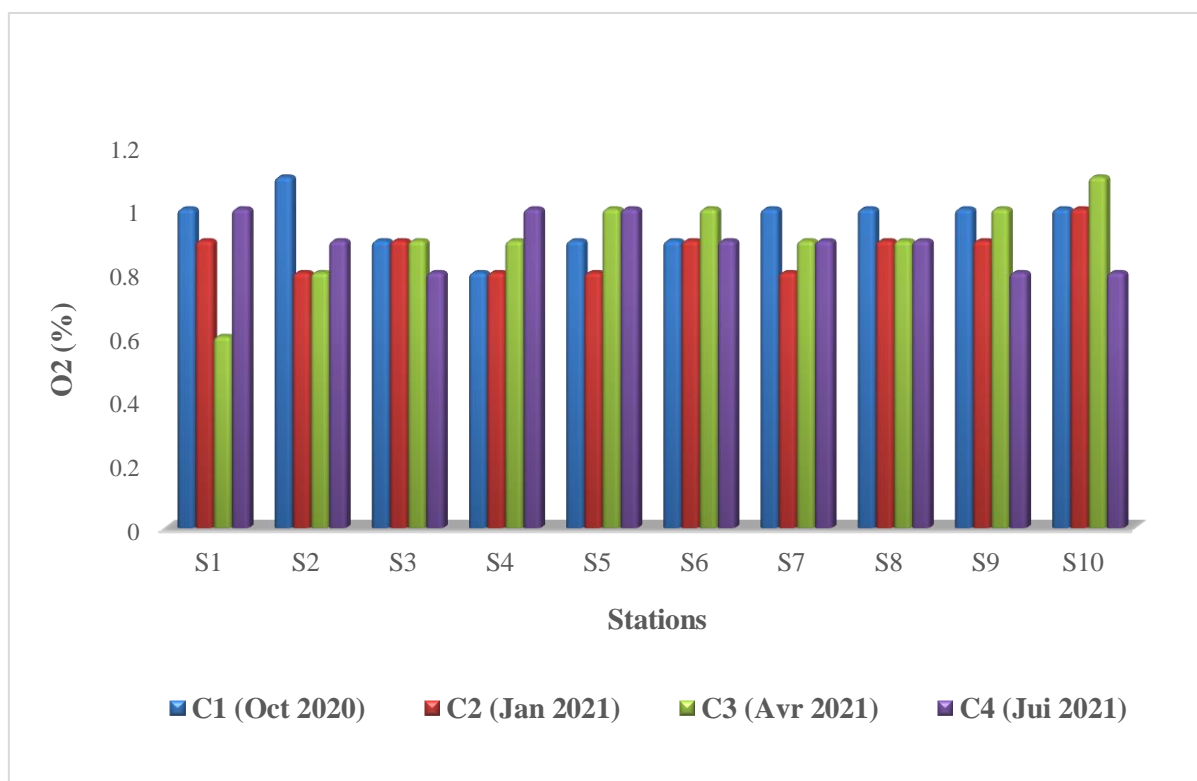
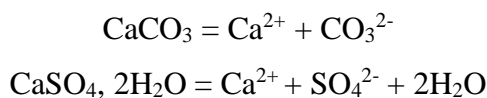


Figure 30. Variation de l'oxygène dissous entre les campagnes et les stations.

3.1.2. Paramètres chimiques

✚ Calcium (Ca²⁺)

Le calcium est un élément naturel que l'on trouve dans la nature sous différentes formes, résultant de la dissolution de carbonatées (CaCO₃) ou de la dissolution des roches gypseuses (CaSO₄). Il joue également un rôle fondamental dans la détermination de la dureté totale de l'eau (Gueroui, 2014).



Les résultats des ions de calcium pour les différentes campagnes et les différentes stations d'étude indiquent des valeurs différenciées. La première campagne (Automne) donne des valeurs variées entre 100 et 264 mg/l et une moyenne de 187 mg/l. La deuxième campagne (hiver), présente des concentrations de calcium oscillant entre 84 et 188 mg/l avec une moyenne de 142 mg/l. La troisième campagne (printemps) affiche des concentrations élevées comprises entre 76 et 392 mg/l avec une moyenne de 215.8 mg/l. Pour la quatrième campagne (Été), les concentrations de calcium varient entre 62 et 232 mg/l et la moyenne est de 163.17 mg/l (Fig. 29). Les fortes concentrations de calcium trouvées dans la zone nord de Oued K'sob sont liées

à la présence de gypse dans la transversale des massifs carbonatés (Est-ouest) au nord de la région de M'sila.

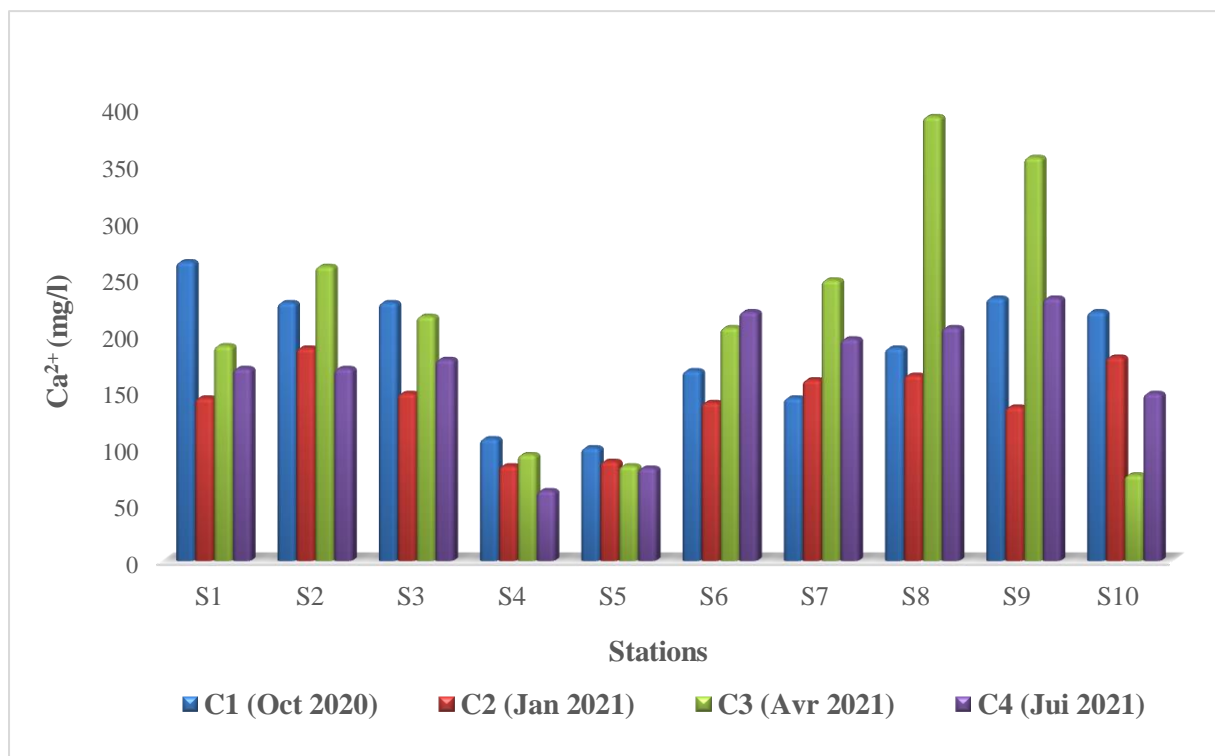
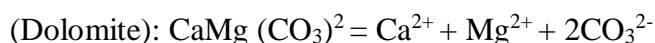


Figure 31. Variation de Ca²⁺ entre les campagnes et les stations.

Magnésium (Mg²⁺)

Le magnésium est un élément très important qui peut être trouvé dans les formations carbonatées sur l'écorce terrestre. Leur présence dans l'eau est liée à la formation géologique de la région à partir de la dissolution des formations carbonatées à forte teneur en magnésium (dissolution de magnésite et de dolomite) (**Rodier J., 2005**).



Les résultats obtenus des concentrations de magnésium montrent des valeurs oscillant entre 17 et 101 mg/l pour la première campagne (automne), avec une moyenne de 45.5 mg/l. La deuxième campagne (hiver) présente des concentrations variant entre 12.4 et 91.2 mg/l avec une moyenne de 54.25. La troisième campagne (printemps) affiche également des concentrations oscillant entre 11.3 et 95.4 mg/l avec une moyenne de 52.16 mg/l. La dernière campagne (Été), présente des valeurs comprises entre 19.58 et 100.8 mg/l, avec une moyenne de 60.08 mg/l. Le magnésium présente une moyenne générale de 53 mg/l, valeur qui dépasse

les normes de potabilité de 50 mg/l (Fig. 30). La présence de magnésium dans l'Oued K'sob s'explique par la dissolution des calcaires dolomitiques des monts du Hodna (région de M'sila).

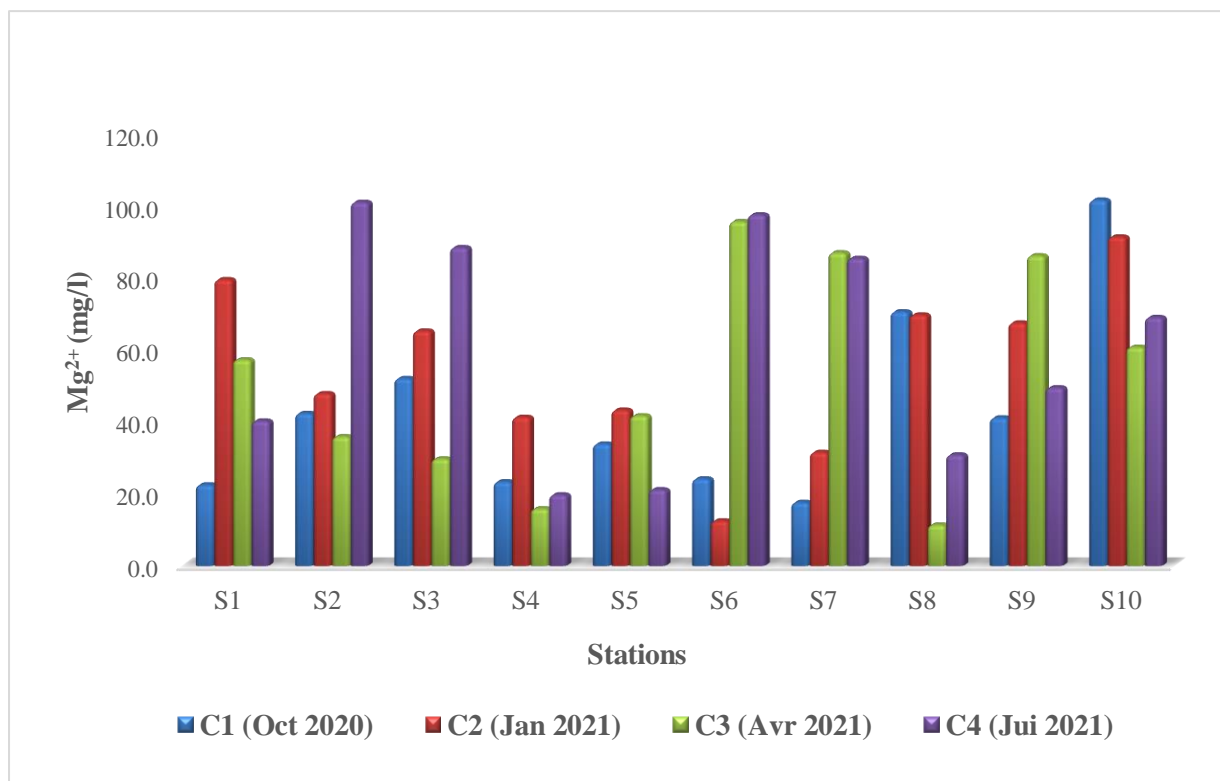


Figure 32. Variation de Mg²⁺ entre les campagnes et les stations.

✚ Bicarbonates (HCO₃⁻)

Les bicarbonates sont formés par la réaction du CO₂ avec l'eau sur les roches de nature carbonatée, comme le calcaire et la dolomite. Le CO₂ présent dans le sol réagit aussi avec les minéraux rocheux, responsable de la présence de bicarbonate et produisant un environnement alcalin dans l'eau (Ram et al., 2021).

Les résultats des bicarbonates affichent des valeurs très élevées pour toutes les campagnes. La première campagne (automne) donne des concentrations comprises entre 397 et 1 068 mg/l, avec une moyenne de 731 mg/l. La deuxième campagne (hiver) affiche des concentrations comprises entre 488 et 915 mg/l, avec une moyenne de 716,3 mg/l. Pour la troisième campagne (printemps), les concentrations oscillent entre 366 et 762 mg/l, avec une moyenne de 585,17 mg/l. La quatrième campagne (Été) affiche des concentrations comprises entre 366 et 732 mg/l, avec une moyenne de 553,3 mg/l (Fig. 31). Ces teneurs donnent une moyenne générale de 648 mg/l, dépassant ainsi les normes algériennes pour l'usage en irrigation (supérieure à 518 mg/l). Les forts teneurs de bicarbonate dans la région de K'sob s'expliquent par la dissolution des calcaires à silex du Jurassique et des calcaires noduleux du Crétacé (Amroune, 2018).

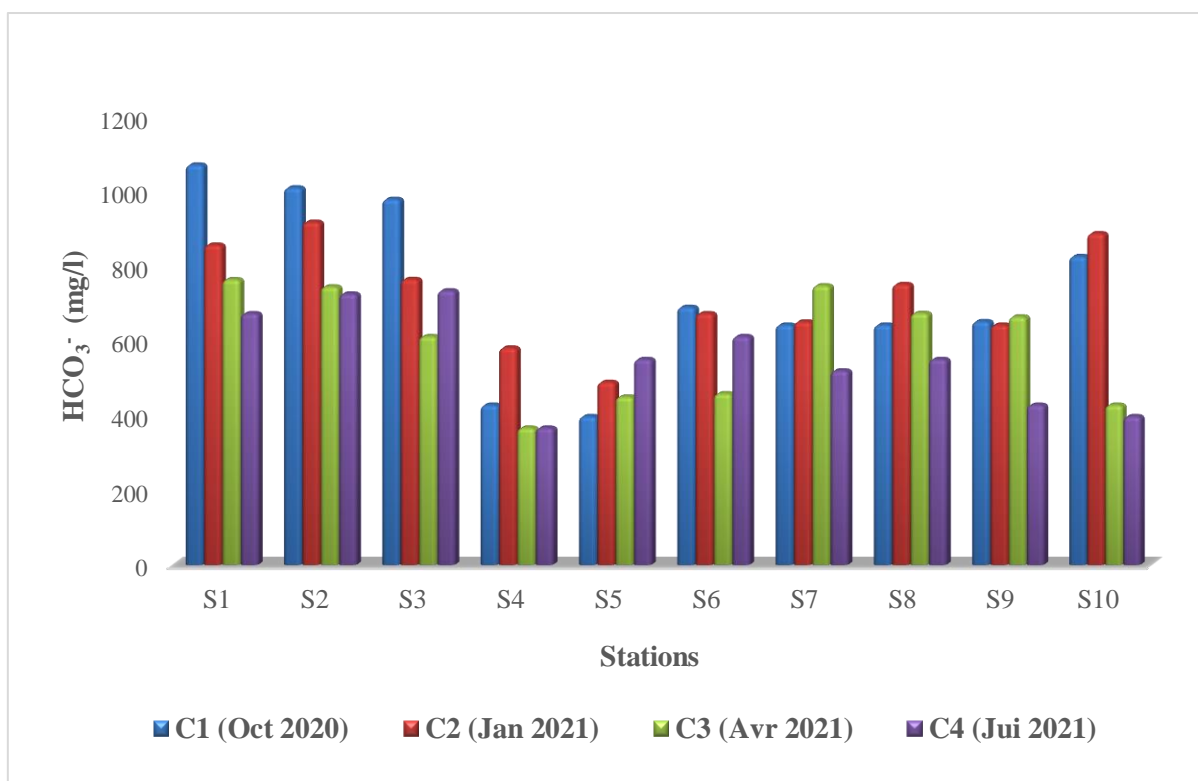


Figure 33. Variation de HCO_3^- entre les campagnes et les stations.

Chlorures (Cl⁻)

La présence de chlorures dans la nature est liée à la dissolution des formations salifères. On les trouve sous différentes formes : sous forme de sels de sodium (NaCl), de sels de potassium (KCl) ou encore de sels de calcium (CaCl_2).

Les résultats du taux de chlorures montrent des concentrations oscillant entre 266 et 449 mg/l, avec une moyenne de 361 mg/l pour le premier groupe (automne). La deuxième campagne (hiver) représente des taux allant de 266 à 350 mg/l et une moyenne de 308 mg/l. Pour la troisième campagne (printemps), les concentrations varient entre 249 et 366 mg/l et la moyenne est de 299 mg/l. La quatrième campagne (Été) présente des concentrations élevées, oscillant entre 266 et 694 mg/l, avec une moyenne de 469 mg/l. Ces concentrations représentent une moyenne générale de 360 mg/l, dépassant les normes Algériennes pour l'usage agricole > 350 mg/l (Fig. 32). La présence de chlorures dans l'Oued K'sob est liée à la contamination de cette rivière par les eaux usées de la région.

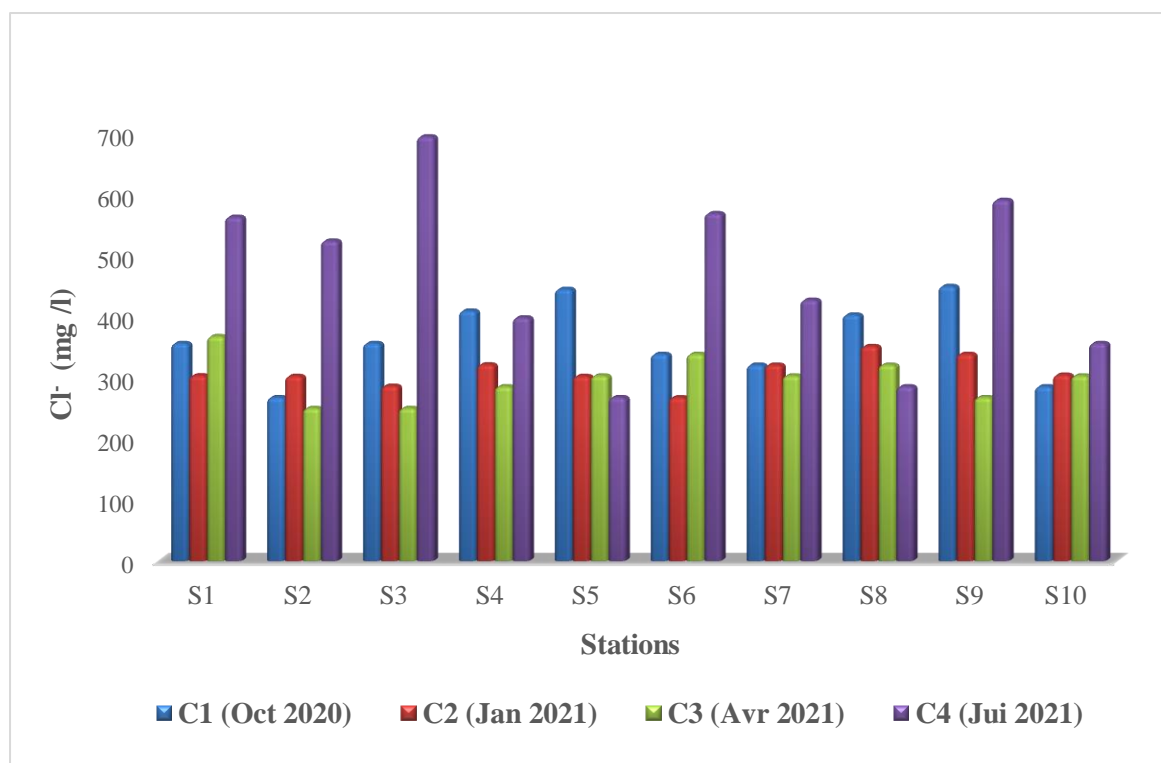


Figure 34. Variation de Cl⁻ entre les campagnes et les stations.

✚ Sulfates (SO₄²⁻)

Les ions de sulfate peuvent provenir des formations gypseuses ou être associés à la présence d'argiles et à la dissolution des pyrites (minéraux sulfurés) (**Amroune, 2018**).

Les résultats obtenus des teneurs en sulfate donnent des concentrations comprises entre 424 et 775 mg/l, avec une moyenne de 614,3 mg/l pour la première campagne (automne). La deuxième campagne (hiver) montre des concentrations entre 434 et 807 mg/l, avec une moyenne de 610 mg/l. La troisième campagne (printemps) présente également des valeurs entre 516 et 1690 mg/l, avec une moyenne de 930 mg/l. La dernière campagne (Été) affiche des teneurs comprises entre 539 et 785 mg/l, et une moyenne de 689 mg/l. Ces fortes concentrations en sulfate donnent une moyenne générale de 704 mg/l et dépassent les normes algériennes >400 mg/l et les normes de l'OMS >250 mg/l (Fig.33) (**WHO, 2021**). Le sulfate s'accroît dans la région de K'sob en raison de l'utilisation de ces derniers dans la production d'encre et de pigments, ainsi que dans les matériaux de construction dans les zones industrielles (BBA) proches de la vallée.

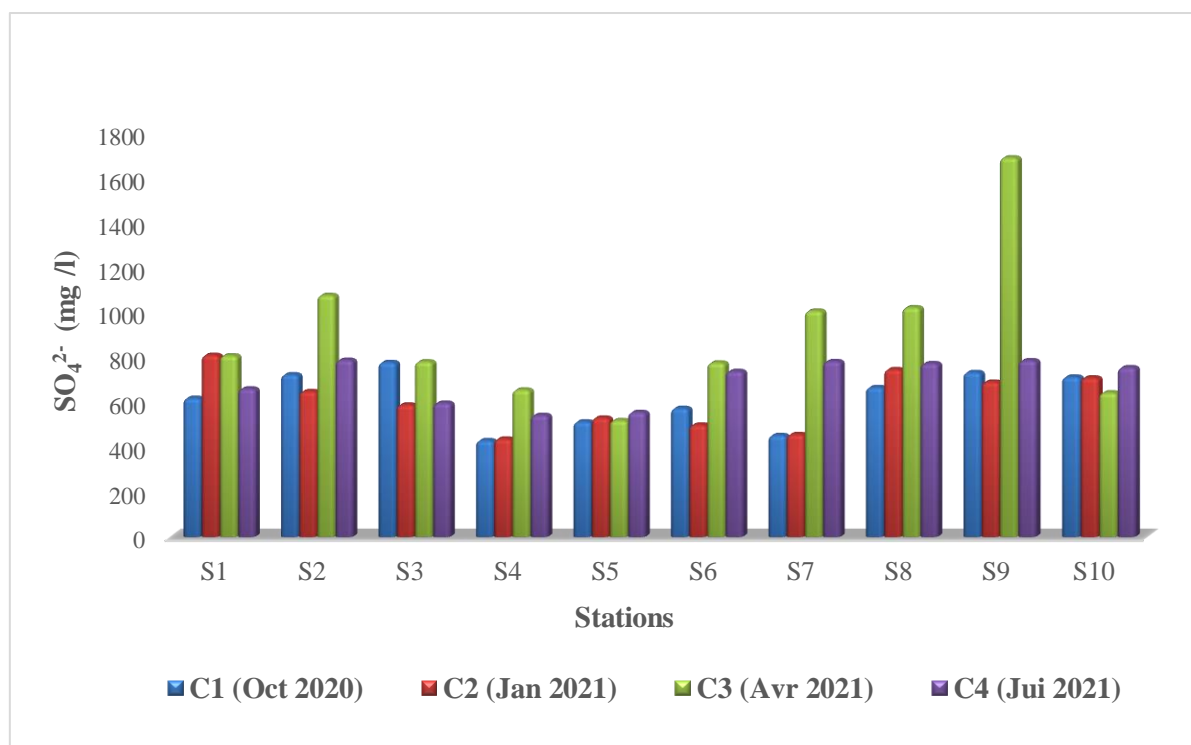


Figure 35. Variation de SO_4^{2-} entre les campagnes et les stations.

+ Sodium (Na^+)

Le sodium est un élément important pour l'utilisation agricole, mais la forte teneur en sodium des eaux d'irrigation est indésirable pour les plantes. Il peut résulter de la décomposition du silicate de sodium ou du silicate d'aluminium, ou provenir d'origine industrielle (**Belghiti et al., 2013**).

Les résultats obtenus de sodium sont supérieurs aux normes Algériennes et de l'OMS (> 200 mg/l). Au cours de la première campagne (automne), ils ont atteint 442 et 589 mg/l, avec une moyenne de 518 mg/l. La deuxième campagne (hiver) montre des concentrations allant de 454 à 639 mg/l et une moyenne de 516 mg/l. En outre, la troisième campagne (printemps) présente un taux oscillant entre 354 et 584 mg/l et une moyenne de 478 mg/l. Pour la quatrième campagne (Eté), les concentrations varient entre 424 et 590 mg/l et une moyenne de 500 mg/l (Fig. 34). Ces fortes teneurs en sodium s'expliquent par l'effet de la perméabilité du sol, de l'infiltration de l'eau et du problème de substitution des ions alcalins du sol par le sodium dans les argiles gypseux (**Gueroui et al., 2015**).

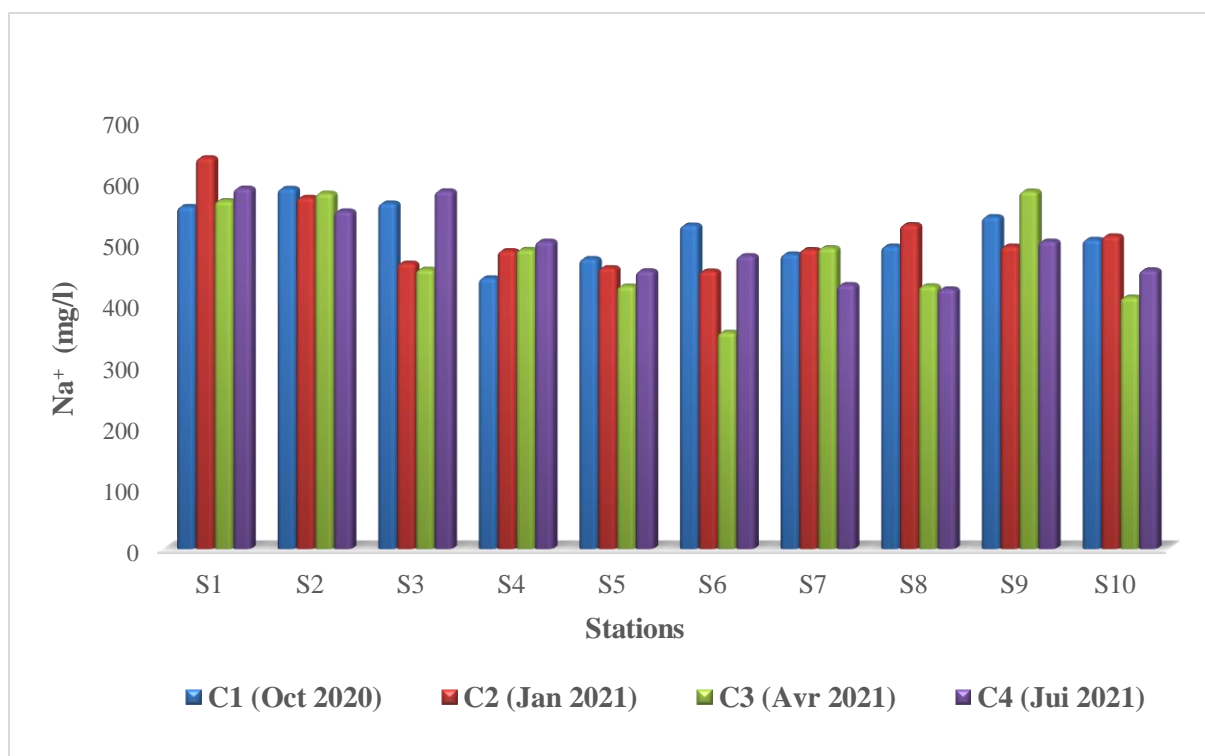


Figure 36. Variation de taux de Na⁺ entre les campagnes et les stations.

✚ Potassium (K⁺)

Le potassium est présent dans la nature sous forme de nombreuses roches (gneiss, schiste), dont la plupart sont relativement solubles et libèrent du potassium en concentrations croissantes dans les eaux de surface ou les eaux souterraines au fil du temps.

Le potassium est également plus élevé, comme le sodium, qui donne des concentrations élevées que les normes Algériennes et de l’OMS (> 12 mg/l). Pour la première campagne (automne), les valeurs oscillent entre 82 et 159 mg/l et la moyenne est de 118 mg/l. La deuxième campagne (hiver) présente des teneurs comprises entre 22 et 176 mg/l, avec une moyenne de 94 mg/l. La troisième campagne (printemps) contient des concentrations variant entre 24 et 152 mg/l et une moyenne de 85 mg/l. La dernière campagne (Eté), les valeurs de potassium vont de 72 à 149 mg/l et représentent une moyenne de 109 mg/l (Fig. 35). Ces fortes concentrations de potassium sont liées à l’utilisation intensive d’engrais chimiques dans l’activité agricole de la région de K’sob.

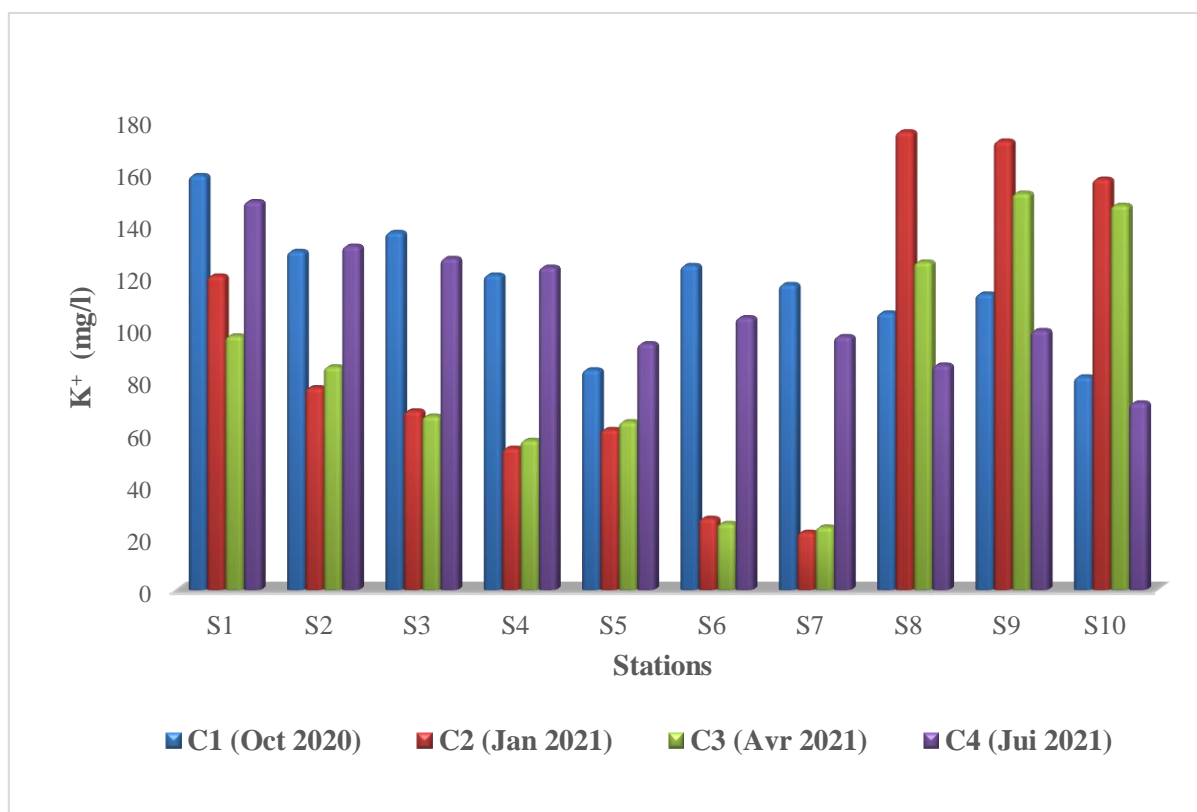


Figure 37. Variation de taux de K⁺ entre les campagnes et les stations.

Ammonium (NH₄⁺)

Les ions de l'ammonium produit par le cycle de l'azote sont plus toxiques. L'ammonium dans les eaux de surface est considéré comme un indice de pollution.

Les résultats obtenus pour les ions d'ammonium représentent des concentrations faibles, inférieures à 0,5 mg/l, pour toutes les campagnes et toutes les stations, avec des valeurs comprises entre 0,052 et 3,5 mg/l et une moyenne de 0,39 mg/l. Sauf pour les stations 1, 2 et 3, dans la troisième et quatrième campagne (printemps, été), des valeurs élevées > 0,5 mg/l apparaissent (Fig. 36), dues à l'arrivée d'eaux usées urbaines et industrielles dans l'Oued K'sob, et à l'absence de précipitations durant l'été.

Phosphore (PO₄⁻)

Le phosphore est un élément très important pour tous les êtres vivants, et surtout pour les plantes dont la croissance racinaire et la fixation d'azote atmosphérique dépendent de lui. Il est présent dans l'eau à cause de la pollution des eaux ou des activités agricoles à proximité des sources d'eau.

Les teneurs en phosphore obtenues varient entre 0,24 mg/l et 15,7 mg/l, avec une moyenne de 2,52 mg/l. La plupart des stations, dans toutes les campagnes, représentent des concentrations faibles, inférieures à 5 mg/l, à l'exception des stations 1, 2 et 3, qui présentent

des concentrations supérieures à 5 mg/l lors de la première et de la deuxième campagne (automne et hiver) (Fig. 37). Cela est dû à l'utilisation intensive d'engrais chimiques, comme le NPK, lors de la période de plantation et pendant la saison de culture.

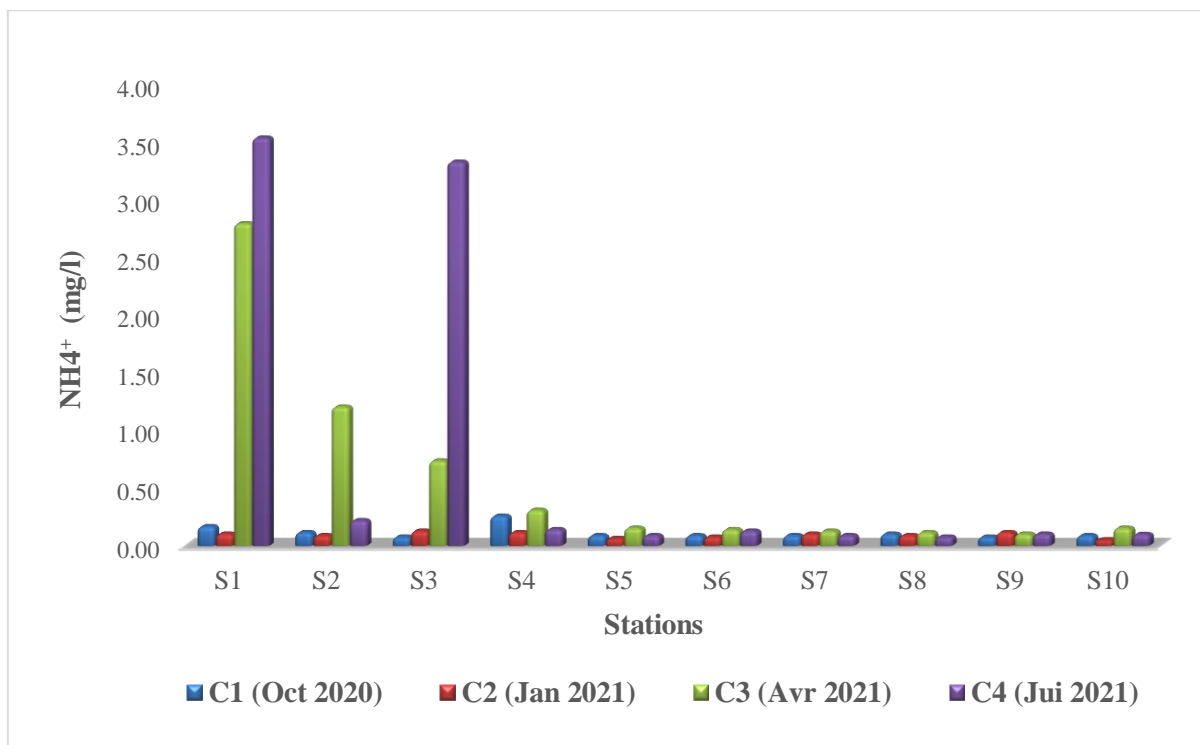


Figure 38. Variation de NH_4^+ entre les campagnes et les stations.

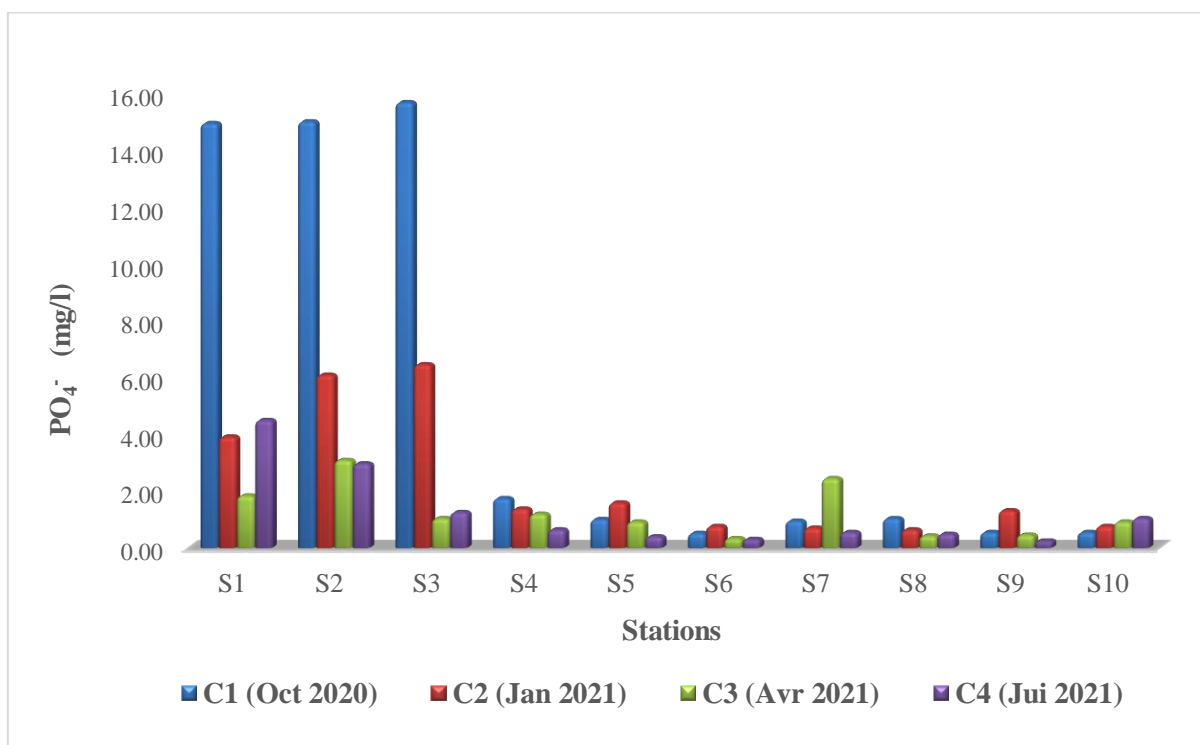


Figure 39. Variation de PO_4^- entre les campagnes et les stations.

3.1.3. Substances indésirables

✚ Nitrates (NO_3^-)

Les nitrates sont des éléments représentatifs de l'azote organique présent dans la nature, produit par le processus de nitrification de l'ammoniac. Leur présence dans le milieu naturel est liée à la minéralisation de la matière organique et à l'utilisation intensive d'engrais.

Les résultats des analyses des nitrates montrent des valeurs différentes pour les stations et les campagnes. La première campagne (automne) donne des valeurs oscillant entre 3 et 133 mg/l avec une moyenne de 59 mg/l. La deuxième campagne (hiver) les concentrations varient entre 14 et 134 mg/l avec une moyenne de 50 mg/l. La troisième campagne (printemps) présente des concentrations comprises entre 4 et 135 mg/l, avec une moyenne de 56 mg/l. La dernière campagne (été) contient des teneurs comprises entre 17 et 114 mg/l, avec une moyenne de 46 mg/l. En outre, les concentrations en nitrates les plus élevées apparaissent dans les stations : 1, 2, 3, 4 et 10 dans toutes les campagnes (Fig. 38). En général, l'état des nitrites dans les eaux de l'Oued K'sob dépasse les normes Algériennes et de l'OMS (> 50 mg/l). Cette situation est due à la présence de polluants dans la région.

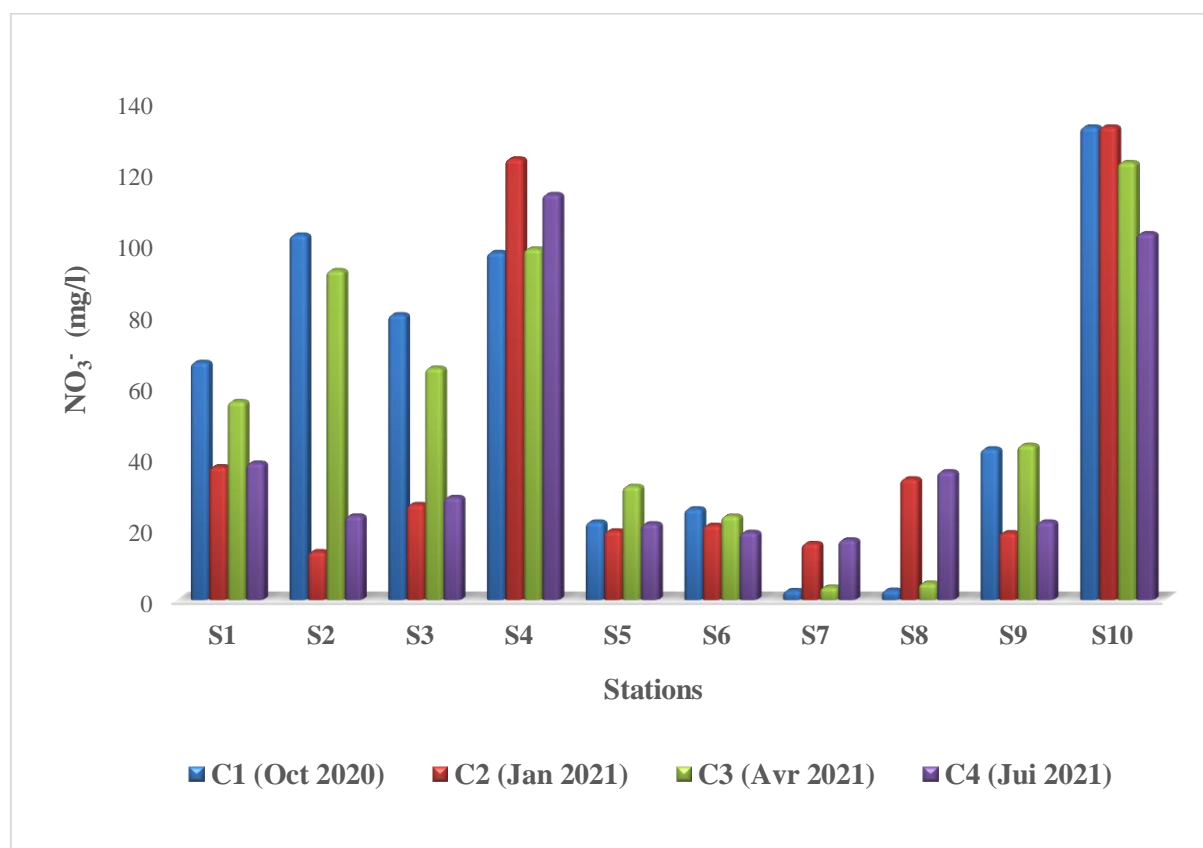


Figure 40. Variation des NO_3^- entre les campagnes et les stations.

✚ Nitrites (NO_2^-)

Les nitrites sont des éléments plus toxiques et indésirables pour la santé humaine et représentent un socle de passage entre l'ammonium et les nitrates.

Les résultats des concentrations en nitrites montrent des valeurs oscillant entre 0,066 mg/l et 4,05 mg/l, mesurées au niveau de la station 3, avec une moyenne générale de 0,9 mg/l. Les fortes concentrations en nitrites apparaissent dans les campagnes 1 et 2 (automne, hiver) sur les stations : 1, 2 et 3 et dans une moindre mesure à la station 4. Ces résultats dépassent les normes Algériennes $> 0,2$ mg/l (fig. 39).

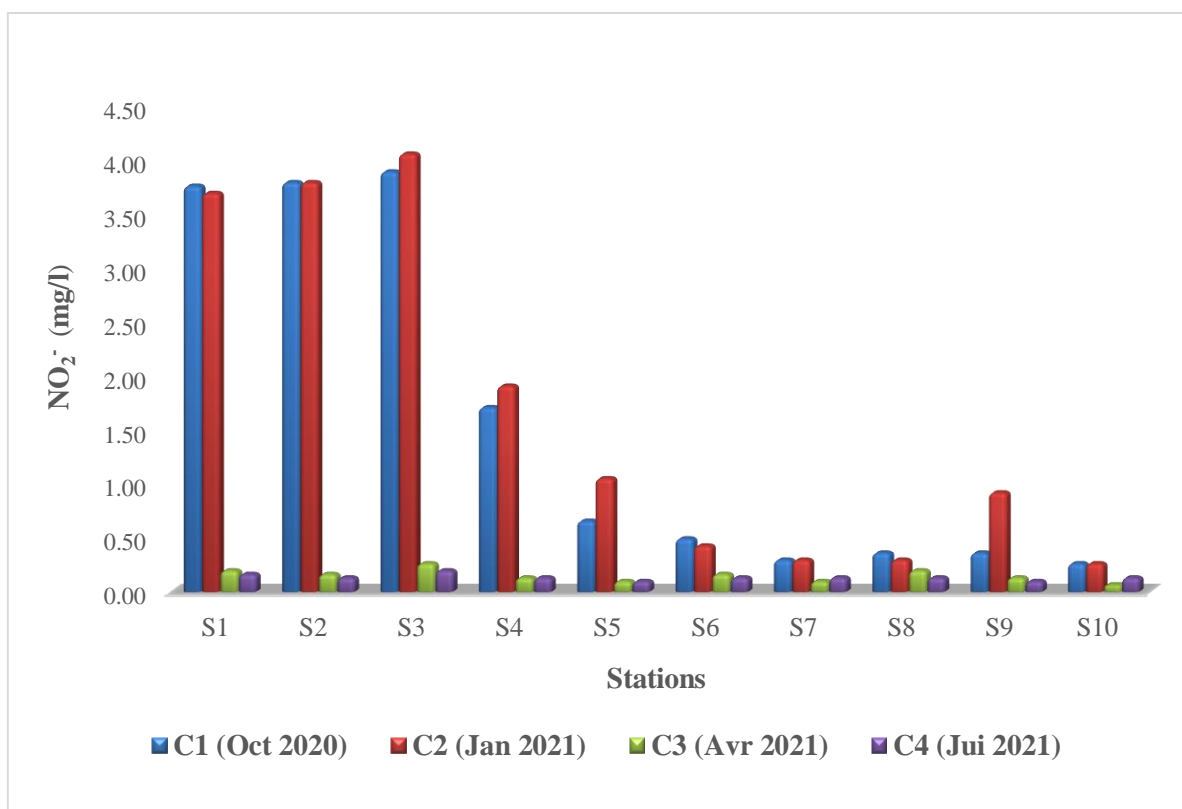


Figure 41. Variation des NO_2^- entre les campagnes et les stations.

✚ Silicium (Si)

Dans la nature, les silices sont présentes sous la forme de SiO_2 , qui est lié aux formations rocheuses silicatées. Les roches métamorphiques et magmatiques donnent par ailleurs le silicate par le processus de l'altération ou de l'érosion. On trouve généralement la silice soluble dans l'eau sous forme H_4SiO_4 (ou $\text{Si}(\text{OH})_4$) (Gueroui, 2014).

Les teneurs obtenus en silices sont comprises entre 0.5 et 5.89 mg/l avec une moyenne de 3.58 mg/l. Ces valeurs généralement faibles, sont inférieures à la norme de < 10 mg/l (Fig.40).

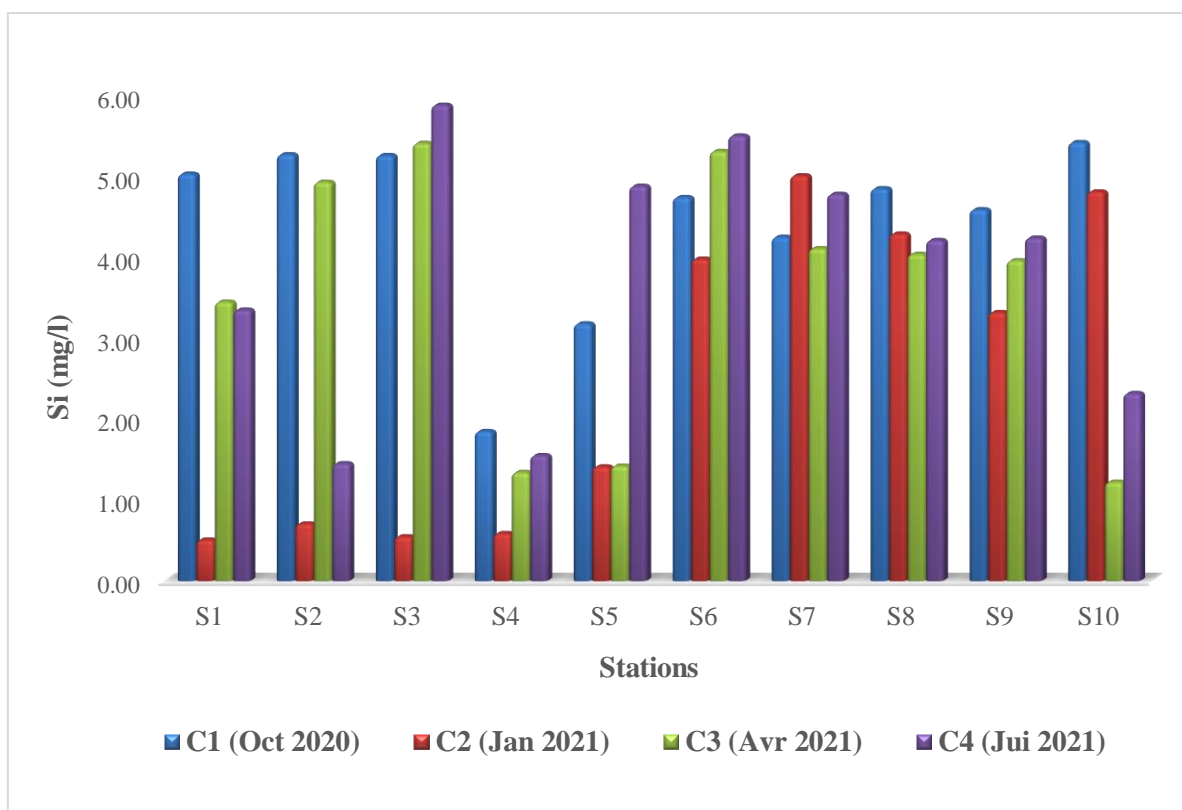


Figure 42. Variation de silicium entre les campagnes et les stations.

3.1.4. Matières organiques

✚ Détermination de la demande chimique en oxygène D.C.O

La demande chimique en oxygène (DCO) est un paramètre essentiel pour l'évaluation des écosystèmes aquatiques, car elle correspond à la consommation d'oxygène dissous dans l'eau lors de la dégradation des matières organiques.

Les résultats obtenus pour la DCO sont compris entre 0 et 726 mg/l et représentent une moyenne générale de 112,6 mg/l. Les fortes concentrations de la DCO apparaissent sur la plupart des stations durant la quatrième campagne (été), avec un taux moyen de 328 mg/l (Fig. 41). Les valeurs de la DCO dans les eaux de l'Oued K'sob dépassent les normes Algériennes pour l'usage agricole (> 90 mg/l). Les fortes teneurs en DCO peuvent être liées à l'augmentation de la température et à l'absence de précipitations durant la période estivale.

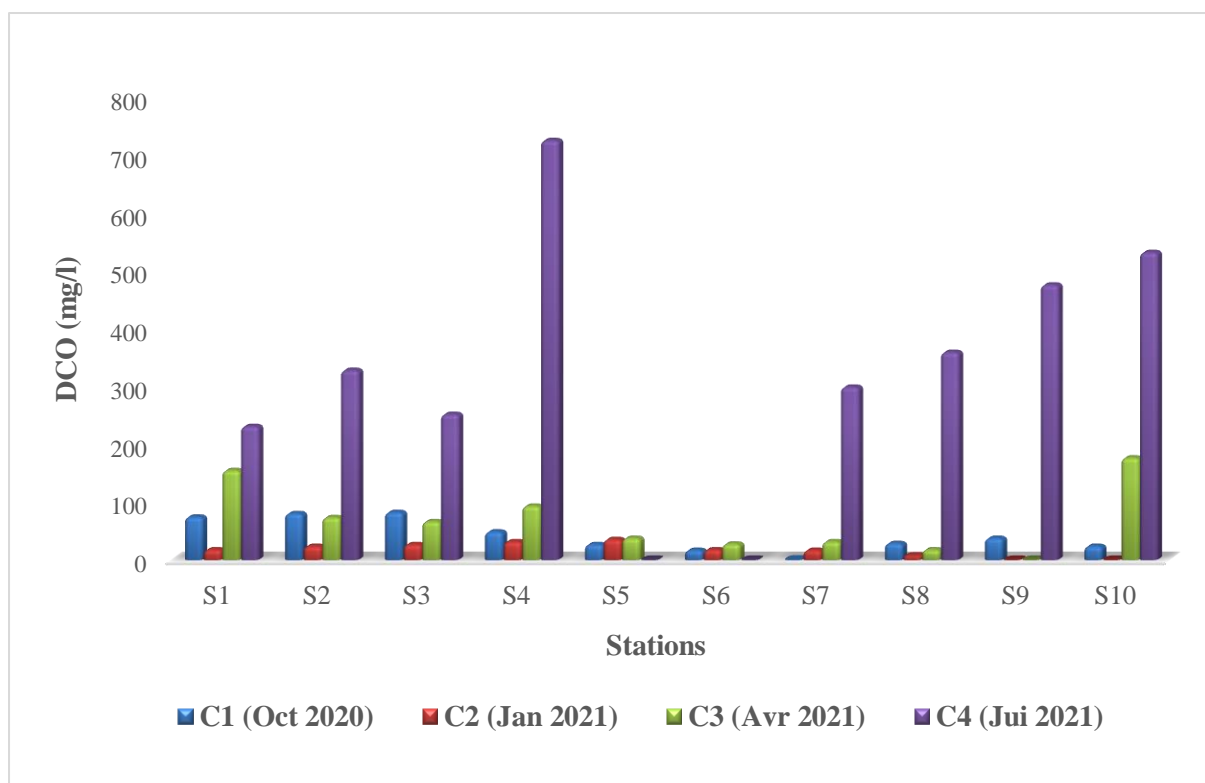


Figure 43. Variation de la DCO entre les campagnes et les stations.

3.2. Faciès chimique des eaux

3.2.1. Diagramme de Piper

Pour la description du faciès chimique des eaux, le diagramme trilineaire (**Piper, 1944**) est utilisé pour représenter plusieurs échantillons d'eau en même temps. Il est composé de deux triangles, qui représentent les faciès cationique et anionique, ainsi que le faciès global des eaux. Il permet également de déterminer les liens possibles entre chaque famille et d'identifier l'origine de la minéralisation de ces eaux (**Kouadra & Demdoun, 2020**).

La lecture des résultats du diagramme de Piper de Oued K'sob (Fig. 42) montre un type d'eau caractérisée par un faciès chloruré, sodique et potassique ou sulfatée, sodique. Une légère tendance à migrer vers les faciès chloruré et sulfatée calcique et magnésienne (avril 2021). On observe aussi une légère tendance à migrer vers le faciès bicarbonaté sodique et potassique (Octobre 2020, Janvier 2021).

Dans le triangle des anions, il est évident qu'aucun anion n'est dominant et que tous les échantillons sont riches en sulfate, bicarbonate et chlorure. Dans le triangle des cations, la plupart des échantillons migrent vers le côté riche en calcium, sodium et potassium.

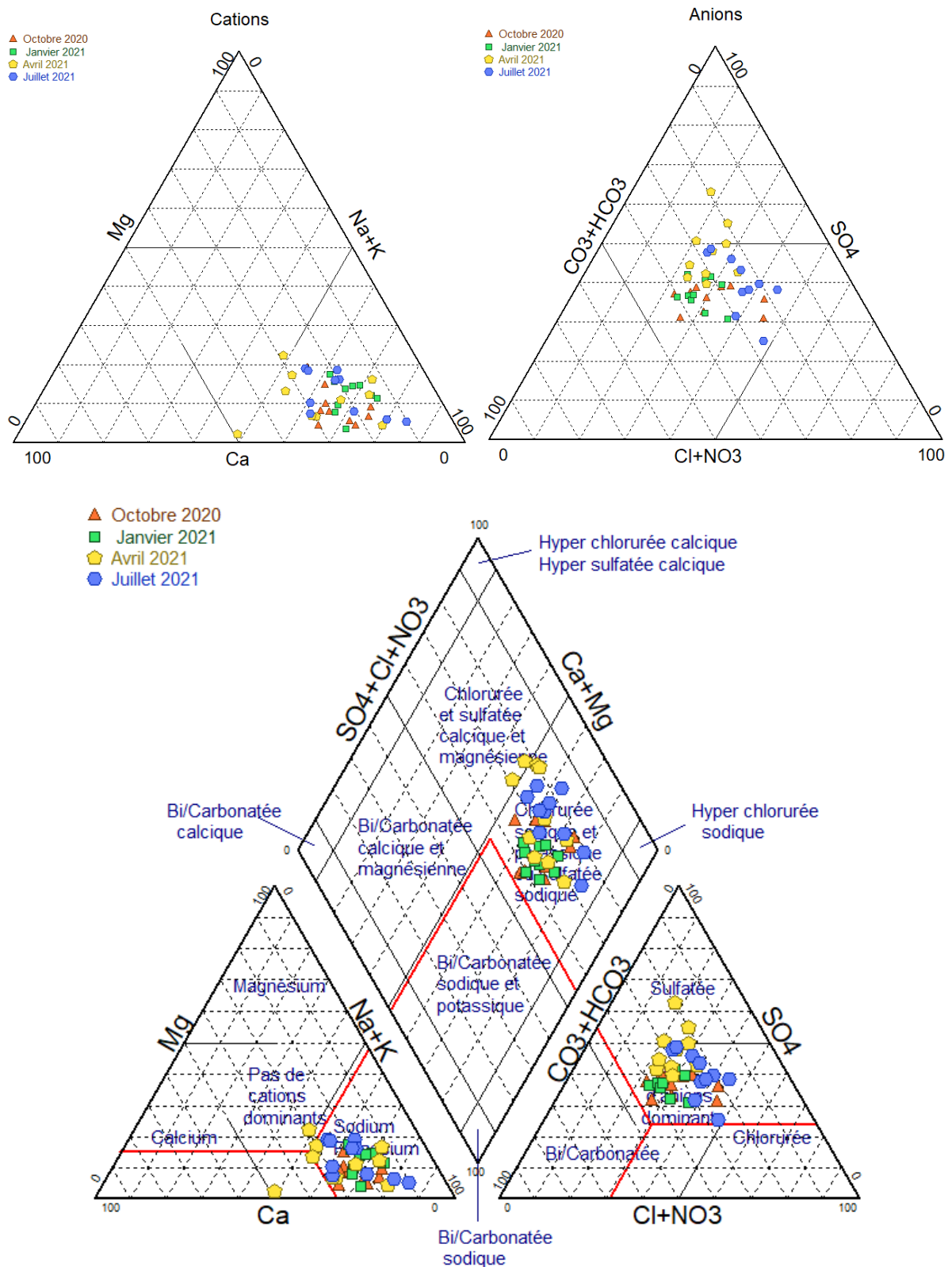


Figure 44. Diagramme de Piper des eaux de oued K'sob (2020-2021).

3.2.2. Diagramme de Schoeller-Berkaloff

Il est possible de représenter le faciès chimique de différents types d'eau à l'aide du diagramme de Schoeller-Berkaloff. Ce diagramme représente chaque échantillon sous forme d'une ligne brisée. Les valeurs de concentration des éléments majeurs sont également représentées sous forme de lignes verticales à échelles logarithmiques.

Les résultats obtenus de l'examen des eaux de Oued K'sob selon le diagramme de Schoeller-Berkaloff sont présentés dans le tableau suivant (Tab.18) et les figures (43 et 44).

Tableau 18. Pourcentage des faciès chimiques des stations de l'Oued K'sob selon Schoeller-Berkaloff.

Stations	faciès chimique	Pourcentage %
S1 S3	Bicarbonaté sodique et potassique	20%
S2, S4, S5, S6	Sulfaté sodique et potassique	80%
S7, S8, S9, S10		

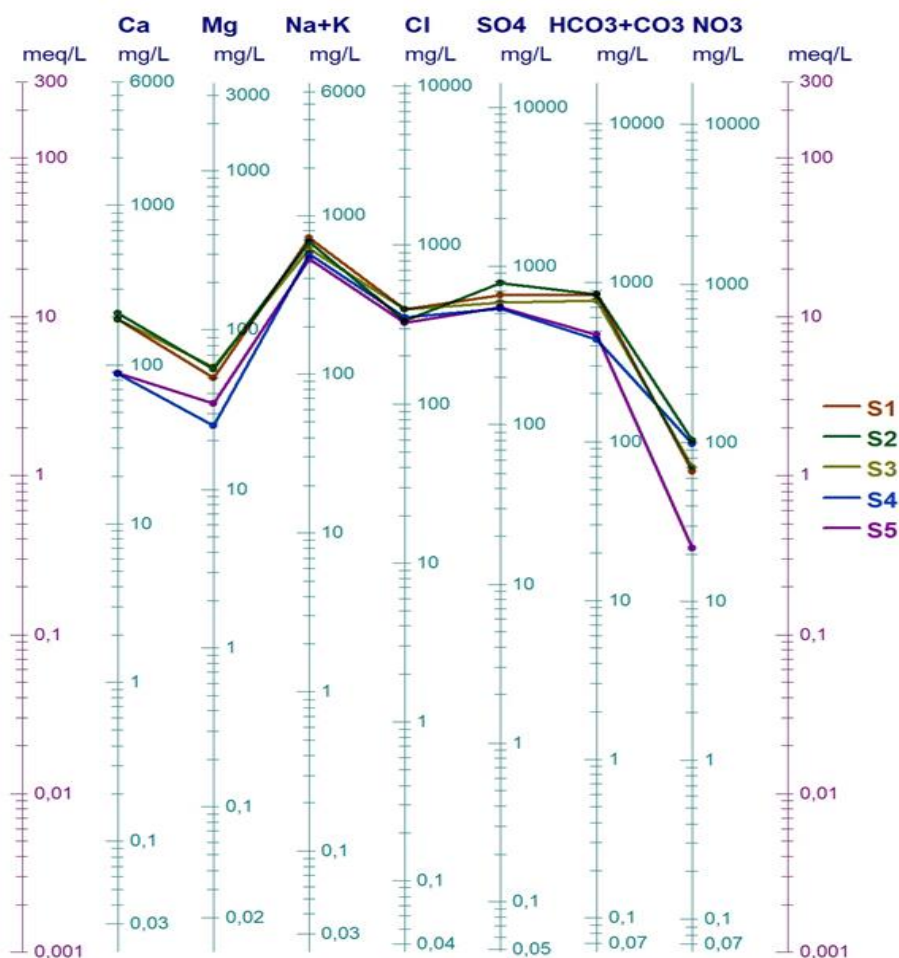


Figure 45. Classification des eaux pour les stations (1, 2, 3,4 et 5) selon Schoeller-Berkaloff.

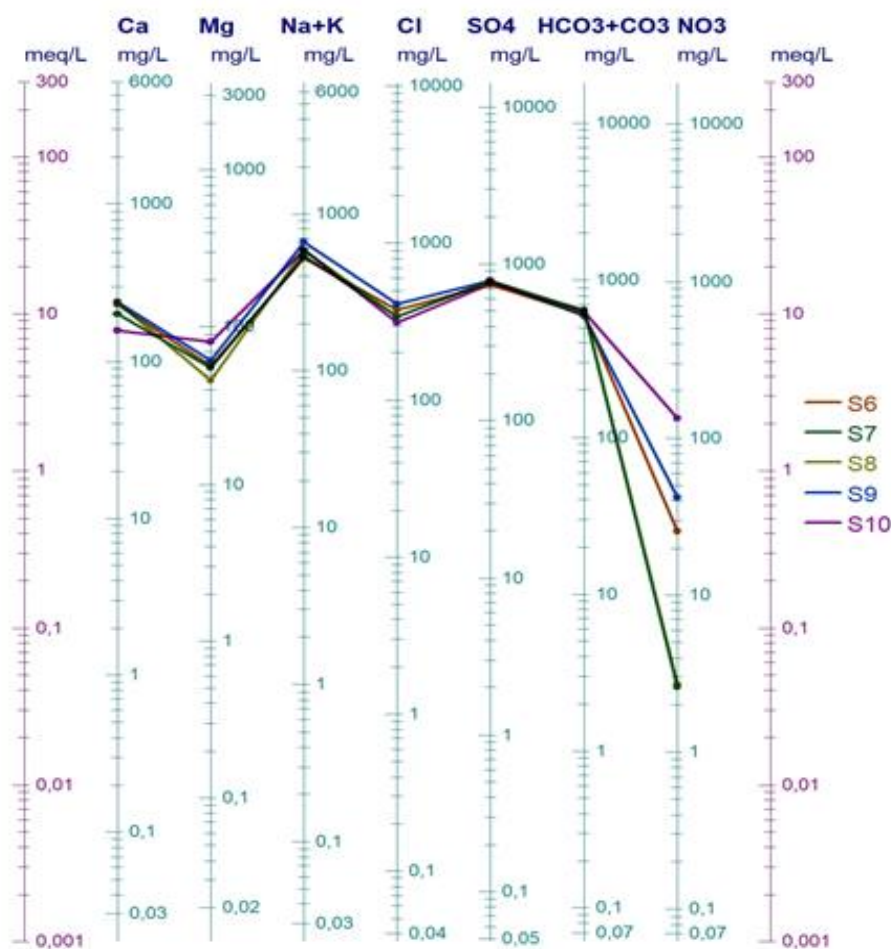


Figure 46. Classification des eaux pour les stations (6, 7, 8, 9 et 10) selon Schoeller-Berkaloff.

3.2.3. Taux d'absorption du Sodium (SAR)

Taux d'absorption du Sodium (SAR) proposé par (Richards, 1954), exprime l'activité relative des ions sodium dans les réactions d'échange dans les sols. Cet indice mesure la concentration relative du sodium par rapport au calcium et au magnésium et renseigne sur le risque de salinité (Shankar et al., 2022) s'exprime selon la relation suivant :

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

Selon les tableaux 19 et 20, il apparaît que la majorité des points d'eau (80 %) présente une qualité d'eau douteuse ou inapte à l'irrigation, où le risque de salinité est modéré à élevé. Toutefois, cette eau peut être utilisée sous certaines conditions, telles que des sols très perméables, un bon lessivage et des plantes particulièrement tolérantes au sel. Seulement deux stations (6 et 10) présentent une qualité d'eau acceptable pour l'irrigation.

Tableau 19. Valeurs admissibles du SAR pour les eaux d'irrigation.

	0-6	Eau acceptable pour l'irrigation
SAR	6-9	Eau douteuse pour l'irrigation
	> 9	Eau inapte pour l'irrigation

Tableau 20. Résultats du SAR pour les eaux de Oued K'sob.

Stations	SAR	Etat pour l'utilisation agricole
1	7.9	Eau douteuse pour l'irrigation
2	7.2	Eau douteuse pour l'irrigation
3	9.17	Eau inapte pour l'irrigation
4	12.45	Eau inapte pour l'irrigation
5	9	Eau inapte pour l'irrigation
6	5.9	Eau acceptable pour l'irrigation
7	6.25	Eau douteuse pour l'irrigation
8	9.32	Eau inapte pour l'irrigation
9	6.25	Eau douteuse pour l'irrigation
10	5.65	Eau acceptable pour l'irrigation

3.2.4. Diagramme de Riverside

Le diagramme de Riverside représente l'état des eaux pour un usage agricole par des relations entre le taux d'absorption du sodium (SAR) et la conductivité électrique (CE) de cette eau, et donne des classes différentes (Tab. 21, 22).

Tableau 21. Classes du Diagramme de Riverside.

	Classes CE (µs/cm)				
	C1 0-250	C2 250-750	C3 750-2250	C4 2250-5000	C5 5000-10000
S1 0-10	C1S1	C2S1	C3S1	C4S1	C5S1
S2 10-18	C1S2	C2S2	C3S2	C4S2	C5S2
S3 18-26	C1S3	C2S3	C3S3	C4S3	C5S3
S4 >26	C1S4	C2S4	C4S4	C4S4	C5S4

Source : (Clément & Galand, 1979).

Tableau 22. Interprétation les résultats des classes de Riverside.

Interprétation des classes d'eau	
	Eau de bonne qualité pour l'irrigation
	Eau de bonne à moyenne qualité
	Eau de qualité moyenne et médiocre
	Eau de qualité médiocre et mauvaise
	Eau de très mauvaise qualité
	Eau très mauvaise à n'utiliser que pour les circonstances exceptionnelles
	Eau déconseillée pour l'irrigation

Les résultats obtenus (Fig. 45) montrent que les eaux de l'Oued K'sob ont été classées dans les catégories C3S3, S3 et C3S2.

- Classe (C3S3) : représente des eaux avec une qualité très mauvaise et peu salinisé.
- Classe (C4S2) : représente des eaux avec une qualité très mauvaise et forte salinisé.
- Classe (C4S3) : représente des eaux avec une qualité très mauvaise à n'utilisé que pour les circonstances exceptionnelles.

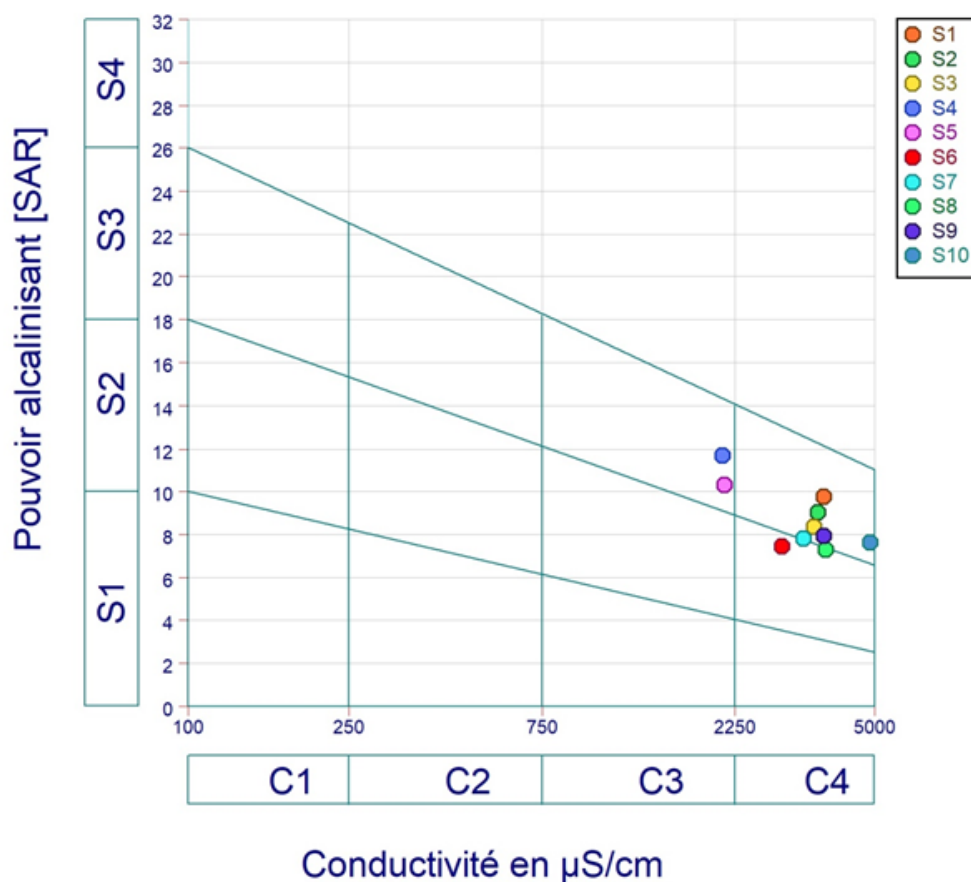


Figure 47. Classification des eaux d'irrigation selon le diagramme de Riverside.

3.2.5. Classification de Wilcox

Wilcox, (1955) a fondé une classification permettant de déterminer la pertinence de l'eau d'irrigation sur la base de la conductivité électrique (CE) et du pourcentage de sodium (Na %) dans l'eau. Cette classification en cinq classes est définie comme suit : Excellente, Bonne, Admissible, Médiocre et Mauvaise.

Selon le diagramme de Wilcox (Fig. 46), 70 % des stations des eaux de Oued K'sob sont de mauvaise qualité pour l'irrigation, tandis que 30 % des stations sont de médiocre qualité pour l'irrigation.

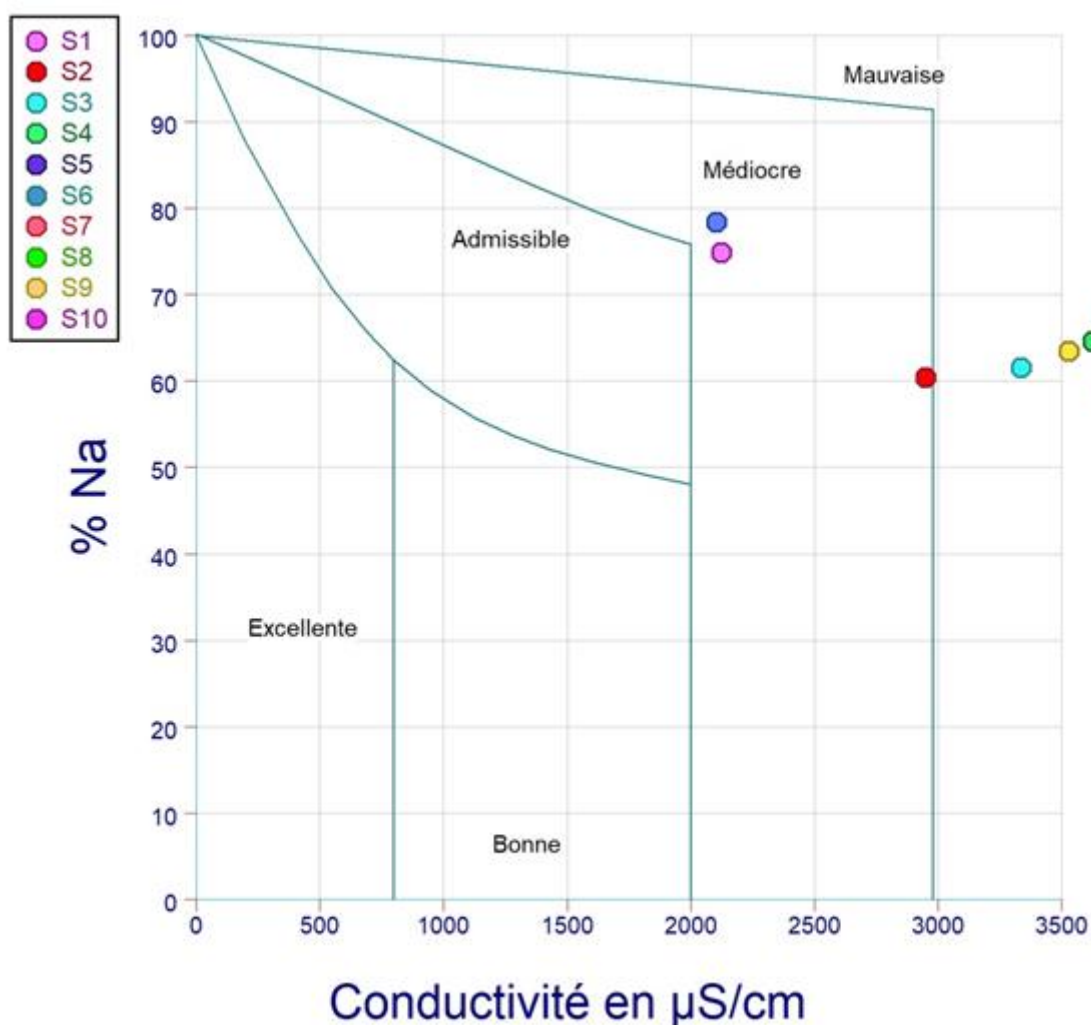


Figure 48. Classification des eaux d'irrigation de Oued K'sob selon Wilcox.

3.2.6. Indice de qualité des eaux d'irrigation (IWQI)

L'indice de la qualité des eaux d'irrigation (IWQI) utilise les paramètres les plus importants (EC, SAR, Na^+ , Cl^- , HCO_3^-) pour estimer la qualité de l'eau. Ces paramètres ont été déterminés comme un modèle d'application (IWQI) identifié par Meireles et al., (2010) pour évaluer la

qualité des eaux d'irrigation. Cela a été fait en utilisant les critères suggérés par le Comité consultatif de l'Université de Californie (UCCC) et les normes fournies par **Ayers & Westcot (1999)**.

Les résultats obtenus par le calcul de l'IWQI par la méthode de **Meireles et al., (2010)** montrent des valeurs oscillant entre 28.1 et 56.8 (Tab. 23). D'autre part, 50 % des stations d'eau présentent une mauvaise qualité des eaux pour l'irrigation, 20 % des stations sont médiocres ou pauvres, tandis que 30 % des stations sont classés dans la catégorie très mauvaise et déconseillée pour l'irrigation (Tab. 24).

Tableau 23. Résultats de IWQI des eaux de Oued K'sob.

Stations	IWQI
1	37.6
2	40.07
3	32.4
4	28.1
5	43.3
6	56.8
7	44.5
8	45.7
9	49.3
10	55.2

Tableau 24. Qualité des eaux d'irrigation selon les stations de Oued K'sob.

Indice	Intervalle	Classification des eaux	Nombre des stations
IWQI	85-100	Excellent	0
	70-85	Bonne	0
	55-70	Médiocre	2
	40-55	Mauvaise	5
	0-40	Très Mauvaise (Déconseillée pour l'irrigation)	3

3.2.7. État de la qualité des eaux en vue d'un usage agricole

La qualité des eaux d'irrigation est considérée parmi les facteurs les plus importants dans la productivité des cultures, la maintenance des sols et la préservation de l'environnement.

La qualité des eaux de Oued K'sob utilisées pour l'irrigation est déterminée par plusieurs critères, dont le taux d'absorption du sodium (SAR). Ces eaux sont divisées en trois classes : eau acceptable pour l'irrigation, eau douteuse pour l'irrigation et eau inapte pour l'irrigation. Selon le diagramme de Riverside, trois classes ont été définies : (C3S3) une eau de mauvaise qualité et peu salée ; (C4S2) une eau de mauvaise qualité et forte salinité ; (C4S3) une eau de mauvaise qualité qui ne devant être utilisée qu'en circonstances exceptionnelles. Par ailleurs et selon Wilcox, 70 % des stations sont de mauvaise qualité et 30 % sont de médiocre qualité pour l'irrigation. Selon l'IWQI, 50 % des stations ont une mauvaise qualité et 20 % sont médiocres, tandis que 30 % sont de très mauvaise qualité et déconseillées pour l'irrigation. Par conséquent, la plupart des eaux de Oued K'sob sont de mauvaise qualité pour l'irrigation selon leur composition en éléments chimiques.

4. Analyse statistiques des données physico-chimiques

Une analyse statistique a été réalisée afin de décrire la relation entre les caractéristiques physico-chimiques des eaux et les saisons. L'analyse de ces caractéristiques et la génération des graphes ont été effectuées à l'aide du logiciel R version 4.1.3. L'analyse par ACP a été réalisée à l'aide des fonctions du package FactoMineR.

La démarche consiste à constituer des classes d'eaux présentant des caractéristiques homogènes, puis d'analyser les relations entre ces classes. Les classes ont été élaborées à l'aide d'une classification hiérarchique sur composantes principales (CAH). Celle-ci est construite à partir des résultats d'une analyse en composante principale sur les variables de la qualité physico-chimiques centrées et réduites. Afin de réduire le nombre de variables clés dans l'analyse, la sélection des variables à partir de la matrice globale des données a été soumise à plusieurs critères à savoir : (i) le pouvoir discriminatoire des variables ayant un coefficient de variation (VC) très élevé ; (ii) l'absence de corrélation entre les variables, où les variables fortement corrélées ont un impact négatif sur les résultats de l'analyse factorielle. En effet, pour chaque échantillon, huit variables ont été retenues comme variables actives comme : Salinity, DCO, Turb, Mg^{+2} , NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , PO_4^- . Les autres variables (T, pH, O_2 , HCO_3^- , Cl^- , Na^+ , SO_4^{2-} , TDS, CE, Ca^{+2} , K^+ , SiO_2^-) ont été introduites comme variables illustratives.

4.1. Analyse en composantes principales (ACP)

Les résultats obtenus de l'analyse factorielle (Tab. 25, Fig. 47) indiquent que 64.06% de la variance cumulée est acceptable pour expliquer la qualité de l'eau étudiée. Le premier facteur (F1) explique 27.82 % de la variance totale avec une valeur propre de 2.22. Le deuxième facteur (F2) explique 19.93 % de la variance totale, avec une valeur propre de 1.60. Le troisième facteur (F3) explique 16.30 % de la variance totale avec une valeur propre de 1.30.

Le premier facteur (F1) avait une forte charge positive en nitrate (0.828) et en phosphore (0.807), et d'autre part une forte charge négative en salinité (-0.662). Le premier facteur, également appelé « Facteur polluant organique », peut être lié aux déchets domestiques et industriels ou peut-être aux changements saisonniers (Uncumusaoğlu & Akkan, 2017). Le deuxième facteur (F2) avait une forte charge positive pour la DCO et la turbidité (0.870), (0.742) respectivement, et aussi une charge positive modérée pour la température (0.545). Ce facteur pourrait donc être lié à des raisons naturelles telles que les précipitations et l'érosion hydrique dans l'Oued. Le troisième facteur (F3) avait une charge positive modérée avec la salinité (0.529), le magnésium (0.544), le bicarbonate (0.551) ainsi que le sodium (0.513). Ce facteur ou le facteur de minéralisation, est lié principalement à la dissolution des minéraux due à l'altération des roches sous l'effet de l'impact anthropique ou naturel (Hinge et al., 2022).

Tableau 25. Composantes principales, valeurs propres et variance total.

Parameters	Composant		
	F1	F2	F3
T(C°)	0	0.545	-0.375
CE	-0.327	0	0.498
Sal %	-0.662	0	0.529
TDS	0	0	0.337
COD	0	0.870	0
Turb	0.344	0.742	0
Mg ⁺²	-0.369		0.544
HCO ⁻³	0.415	-0.392	0.551
Cl ⁻	0	0.398	0
NO ₃ ⁻	0	0.432	0.318
NO ₂ ⁻	0.828	0	0.381
NH ₄ ⁺	-0.335	0	0.480
PO ₄ ⁻	0.807	0	0.469
Na ⁺	0	0	0.513
Valeur propre	2.22	1.60	1.30
Variance (%)	27.82	19.93	16.30
Cumulatif (%)	27.82	47.76	64.06

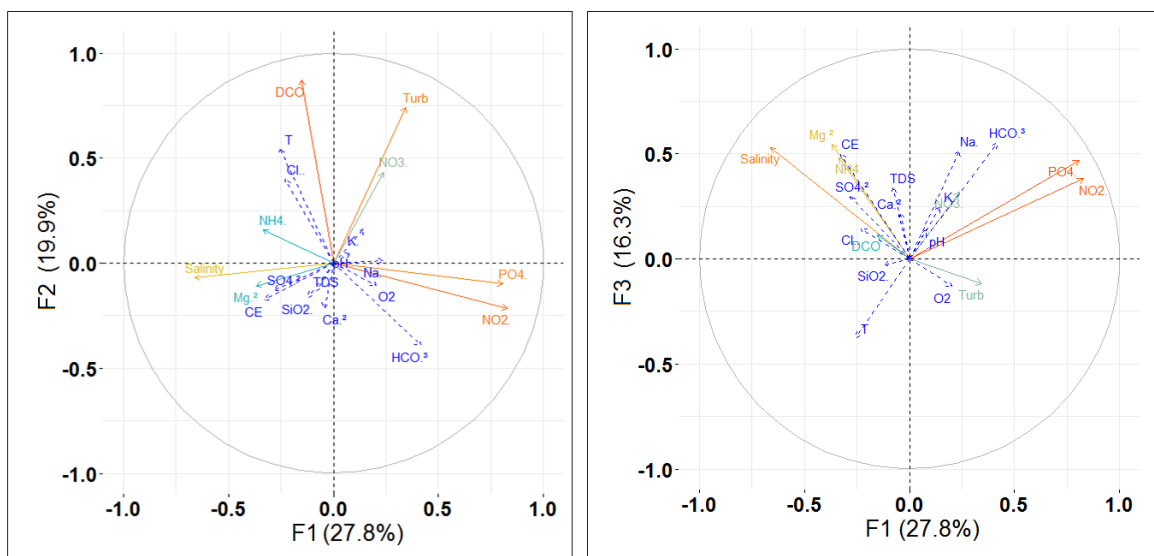


Figure 49. Corrélation des composantes principales par la méthode de l'ACP.

4.2. Classification hiérarchique sur composantes principales (CAH)

Les résultats obtenus par l'analyse de classification hiérarchique CAH pour les 10 stations sur 4 saisons sont illustrés dans le tableau 26 et les figures 48 et 49.

Le dendrogramme indique trois groupes ou classes d'eau pour notre zone d'étude répartis selon leur composition en éléments physico-chimiques et selon les saisons. Le groupe (1) représente une combinaison entre les saisons et les stations où le plus évident est l'été et l'automne et pour les stations le plus évident est (4, 5, 6,7). Ce groupe représente une minéralisation relativement élevée liée au taux élevé de sodium (458.29 mg/l) et de potassium (80.03 mg/l) ainsi qu'à la teneur élevée en sulfates (566.31 mg/l).

Le groupe (2) représente également une combinaison entre l'automne et l'hiver et entre 3 stations (1, 2, 3). Ce groupe se caractérise donc par un taux élevé de minéralisation et de salinité avec les variables les plus dominantes, le TDS (2139.16 mg/l), conductivité électrique (4063.16 μ s/cm), calcium (219.33 mg/l), magnésium (67.06 mg/l), sulfates (830.22 mg/l) et chlorures (402.10 mg/l). Le groupe (3) apparaît également comme une combinaison entre le printemps et l'été et les stations les plus évidentes sont (8, 9, 10). Dans ce groupe, nous pouvons trouver une valeur très élevée de bicarbonate et de sodium respectivement (930.25 mg/l) - (565.24 mg/l). D'autre part, les paramètres liés à la pollution de l'eau, comme les nitrites et le phosphore, ont également une valeur élevée (3.83 mg/l) - (10.37 mg/l) respectivement.

Tableau 26. Valeurs moyennes du paramètre physico-chimique pour les groupes déterminées par le CAH.

Groupe 1	Moyenne	Groupe 2	Moyenne	Groupe 3	Moyenne
TDS	1374.31	TDS	2139.16	NO₂⁻	3.83
CE	2583.37	CE	4063.16	PO₄⁻	10.37
Sal	1.06	Sal	1.91	HCO₃⁻	930.25
Ca²⁺	121.87	Ca²⁺	219.33	Na⁺	565.24
Mg²⁺	36.18	Mg²⁺	67.06		
Na⁺	458.29	NO₂⁻	0.24		
K⁺	80.03	SO₄⁻	830.22		
HCO₃⁻	506.21	Cl⁻	402.10		
PO₄⁻	0.91	NH₄⁺	0.72		
SO₄⁻	566.31	SiO₂²⁺	4.36		

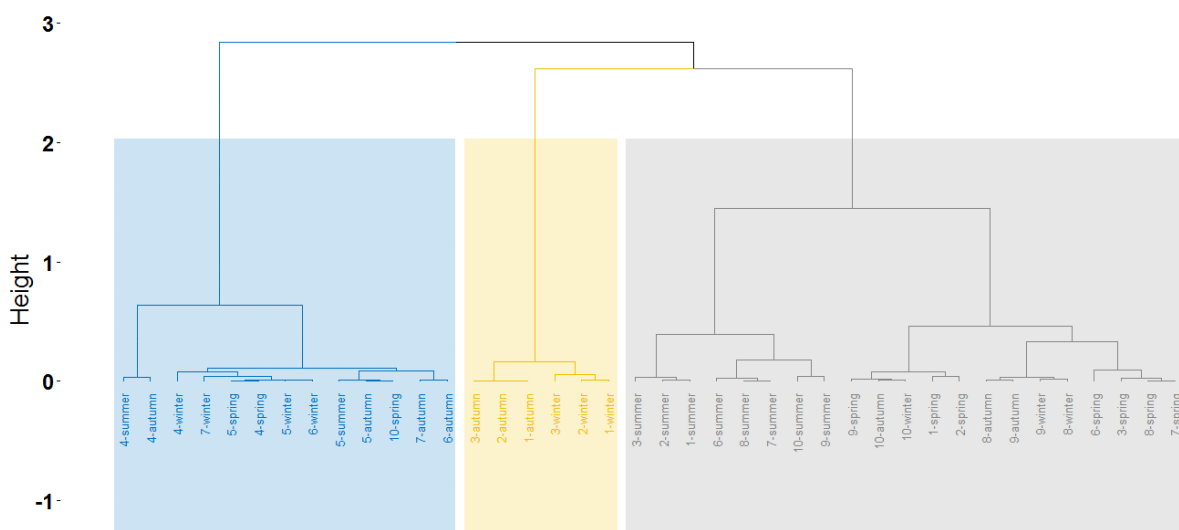


Figure 50. Dendrogramme de l'analyse hiérarchique montrant les groupes identifiés.

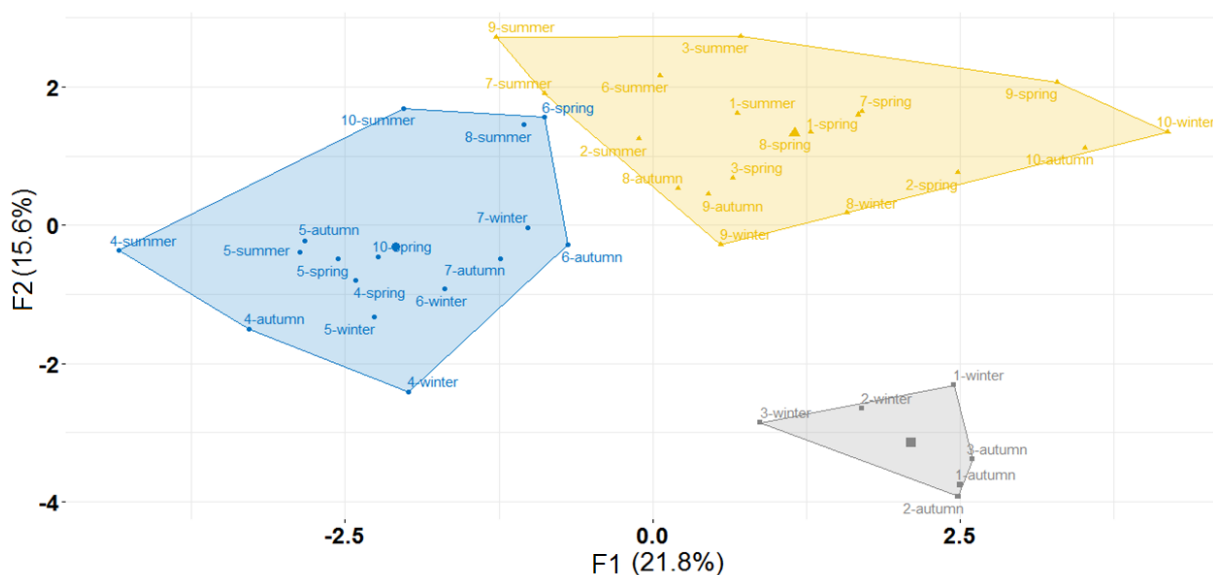


Figure 51. Carte factorielle pour les groupes identifiés de Oued K'sob.

L'utilisation des méthodes de l'ACP et le CAH pour classer les eaux de Oued K'sob, montre que, cette zone peut être divisée en trois classes différentes. Chaque classe peuvent regrouper les composants les plus similaires et corrélés dans les stations d'eau.

A travers les résultats et la carte factorielle, nous pouvons observer et conclure que : le groupe (1) est conduit par F3, cette relation explique la combinaison des changements saisonniers de l'été à l'automne et l'influence des propriétés géologiques de la région. Cette relation représente une forte minéralisation associée à une dissolution minérale due à l'altération de la roche. De même, le groupe (2) est conduit par F2, ce qui explique la combinaison des changements saisonniers de l'automne à l'hiver et la relation entre les précipitations et l'érosion hydrique dans la région. Cela représente une augmentation des niveaux de minéraux et une turbidité plus élevée dans l'eau. De même, le groupe (3) est conduit par F1. Cette relation représente la combinaison des changements saisonniers du printemps à l'été et des ressources en polluants organiques, qui expliquent que la présence de polluants dans l'eau, tels que le phosphore, le nitrate et le nitrite, est liée à la présence de déchets domestiques et industriels l'Oued K'sob.

Conclusion

Dans cette partie l'étude des eaux de Oued K'sob durant quatre saisons et dix stations de prélèvement montre que :

- ✓ Les résultats obtenus présentent une forte minéralisation. Salinité (0.1% - 3.9%), TDS (794-4120 mg/L) et EC (1589 à 7100 μ S/cm).

- ✓ Selon piper, les eaux de Oued K'sob ont un faciès chloruré sodique et potassique ou sulfatée sodique.
- ✓ Le calcium, le magnésium, le sodium, le potassium, les sulfates, les chlorures et les bicarbonates présentent des concentrations élevées, ce qui confirme la dominance du faciès chloruré sodique et potassique ou sulfatée sodique.
- ✓ Les eaux de Oued K'sob sont polluées selon les valeurs obtenues des nitrates, nitrites et DCO.
- ✓ Selon le SAR, le diagramme de Riverside, la classification de Wilcox et le calcul de l'IWQI, on peut classer les eaux de Oued K'sob en trois classes différentes suivant leurs compositions en éléments chimiques.
- ✓ L'analyse statistique par ACP et CAH montre que les eaux de Oued K'sob peuvent être regroupées en trois classes distinctes, correspondant à différents types d'eau. Chaque groupe est déterminé par un facteur spécifique (F). Chacun de ces facteurs est lié à des raisons naturelles ou anthropiques, ce qui permet de déterminer la qualité de cette eau de Oued K'sob.
 - ✓ Selon l'état de la qualité des eaux en vue d'un usage agricole, les eaux de Oued K'sob sont généralement de mauvaise qualité et ne peuvent être utilisées qu'en circonstances exceptionnelles.

*Chapitre III : Étude
des caractéristiques du
sol de la zone d'étude*

Chapitre III : Étude des caractéristiques du sol de la zone d'étude

1. Introduction

Les sols agricoles du monde sont confrontés à plusieurs problèmes, notamment l'érosion, la perte de matière organique, la compaction et la salinisation, qui peuvent réduire leur fertilité et rendre la production alimentaire plus difficile à long terme. L'utilisation excessive d'engrais chimiques et de pesticides peut également contribuer à la dégradation des sols. D'autre part, l'utilisation d'eaux d'irrigation de mauvaise qualité peut contenir des sels, des produits chimiques, des métaux lourds et des micro-organismes pathogènes qui peuvent contaminer les sols. L'accumulation de sels dans les sols, connue sous le nom de salinisation, peut entraîner une diminution de la fertilité des sols et une réduction de la croissance des cultures. Les produits chimiques et les métaux lourds peuvent également s'accumuler dans les sols et affecter leur qualité et leur fertilité, ainsi que la qualité des cultures qui y sont cultivées (**Cheloufi et al., 2017**). En Algérie, les terres arables représentent environ 8,5 millions d'hectares. Cependant, elles sont confrontées à des défis tels que l'érosion, la dégradation des sols, la salinisation, la sécheresse et la désertification, qui peuvent affecter la qualité et la productivité des sols (**Khelif, 2018**). C'est la raison pour laquelle nous avons basé notre travail dans ce chapitre basé sur l'étude des caractéristiques physicochimiques et la contamination par les métaux lourds dans les sols du périmètre de K'sob dans la région de M'sila.

2. Méthodologie

2.1. Choix des points d'échantillonnage

Pour donner une idée générale de la qualité du sol du périmètre de l'Oued K'sob et de l'effet de l'irrigation sur les caractéristiques de ce sol. Quatre parcelles agricoles ont été choisies pour l'étude. Elles ont été réparties le long de l'Oued K'sob. Trois sont irriguées et une autre, non irriguée, a été laissée comme parcelle témoin (Tab. 27). Le choix de ces parcelles repose sur les critères suivants :

- ✓ L'irrigation de ces parcelles est assurée directement par les eaux de Oued K'sob ;
- ✓ Les cultures choisies pour ces parcelles agricoles sont des cultures traditionnelles, sans serre et sans technique moderne.
- ✓ L'utilisation d'engrais chimiques et de pesticides ou d'insecticides est autorisée.

Tableau 27. Points d'échantillonnage du sol de la zone d'étude.

Les stations	Latitude	Longitude	Elévation (m)	
Sols	P ₁	35°49'15.02"N	4°34'7.64"E	558
	P ₂	35°46'53.80"N	4°33'19.99"E	521
	P ₃	35°45'25.17"N	4°33'30.47"E	509
	P _{tém}	35°47'47.96"N	4°33'6.53"E	530

2.2. Prélèvement

Le régime de prélèvement des sols dans notre zone d'étude se compose de deux campagnes : la première avant l'irrigation des cultures et la deuxième après la récolte des cultures, afin de bien distinguer les résultats sur l'effet de l'irrigation sur notre sol. D'autre part, pour chaque point de prélèvement, nous avons sélectionné quatre horizons (0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm) à l'aide d'une tarière spécifique. Le poids de chaque échantillon était compris entre 500 g et 1 kg (Fig. 50). Les échantillons ont ensuite été étiquetés avec des informations sur la profondeur de prélèvement et la localisation géographique de chaque parcelle. Enfin, les échantillons ont été conservés à l'abri de la lumière et de l'humidité en vue de leur analyse en laboratoire.



Figure 52. Prise d'échantillon du sol (périmètre de K'sob).

2.3. Méthodes d'analyse

Pour obtenir des résultats précis, la première étape de notre travail consiste à préparer nos échantillons : nous les séchons, puis nous les tamisons pour éliminer les racines, les débris végétaux et les pierres.

Les différentes analyses ont été effectuées au laboratoire de biologie Eau et Environnement de l'université 8 Mai 1945 de Guelma et dans le laboratoire du centre de plateforme technologique pour l'analyse physico-chimique PTAPC-CRAPC-LAGHOUAT.

Les premiers paramètres étudiés sont le pH, la conductivité électrique et la salinité. Pour cela, nous avons préparé une solution aqueuse (sol/eau), pour le pH (1/2.5), pour la conductivité électrique et la salinité (1/5), et nous avons mesuré les valeurs à l'aide du multiparamètre (**Aubert, 1978**).

Pour les analyses granulométriques du sol, on utilise la pipette Robinson pour les fractions d'argile et de limon, et pour les sables, la méthode de tamisage. Puis, on a déterminé la texture par le diagramme de (**USDA, 1975**).

Les autres paramètres sont le carbone total, le calcium, le magnésium, le potassium, le sodium, le phosphore, le soufre et les éléments des traces métalliques. On utilise la méthode de fluorescence par rayons X (XRF).

La fluorescence par rayons X (XRF) est une technique moderne utilisée pour l'analyse de la composition chimique des échantillons solides, en poudre ou liquides. Elle est basée sur la frappe de la matière par des rayons X de haute énergie qui traversent l'échantillon (**Qasim, 2015**). La XRF quantitative est une technique analytique très précise qui peut analyser une large gamme d'éléments dans divers types d'échantillons, y compris les minéraux, la céramique, le verre et les polymères. Elle est largement utilisée dans la géologie, l'archéologie, les sciences de l'environnement et la science des matériaux (**Bruker, 2019**).

Pour effectuer des analyses quantitatives par XRF, nous procédons à la préparation de l'échantillon qui est broyé en poudre fine et mis en pastille, puis couvert par un film de déjouer de polypropylène (6 μm). La pastille d'échantillon est placée dans l'instrument XRF, et nous déterminons dans l'appareil les paramètres suivants :

- ✓ Le nom de l'échantillon ;
- ✓ Le type d'échantillon (solide, poudre ou liquide) ;
- ✓ Le poids de l'échantillon ;
- ✓ La taille de l'échantillon (4 cm) ;
- ✓ Le type de couvre et leur épaisseur (foil, polypropylène, 6 μm) ;

- ✓ Le type de méthode de fluorescence (air) ;
- ✓ L'emplacement de l'échantillon.

Les rayons X émis sont finalement détectés par un détecteur et convertis en un spectre de rayons X. Ce dernier fournit des informations sur la composition élémentaire de l'échantillon. Le spectre est ensuite analysé à l'aide d'un logiciel pour déterminer les concentrations des éléments d'intérêt dans l'échantillon. D'autre part, la teneur en matière organique MO% est calculée grâce à la teneur en carbone organique (C) obtenu par XRF. Le résultat, selon la relation ($MO\% = C\% * 1.72$).

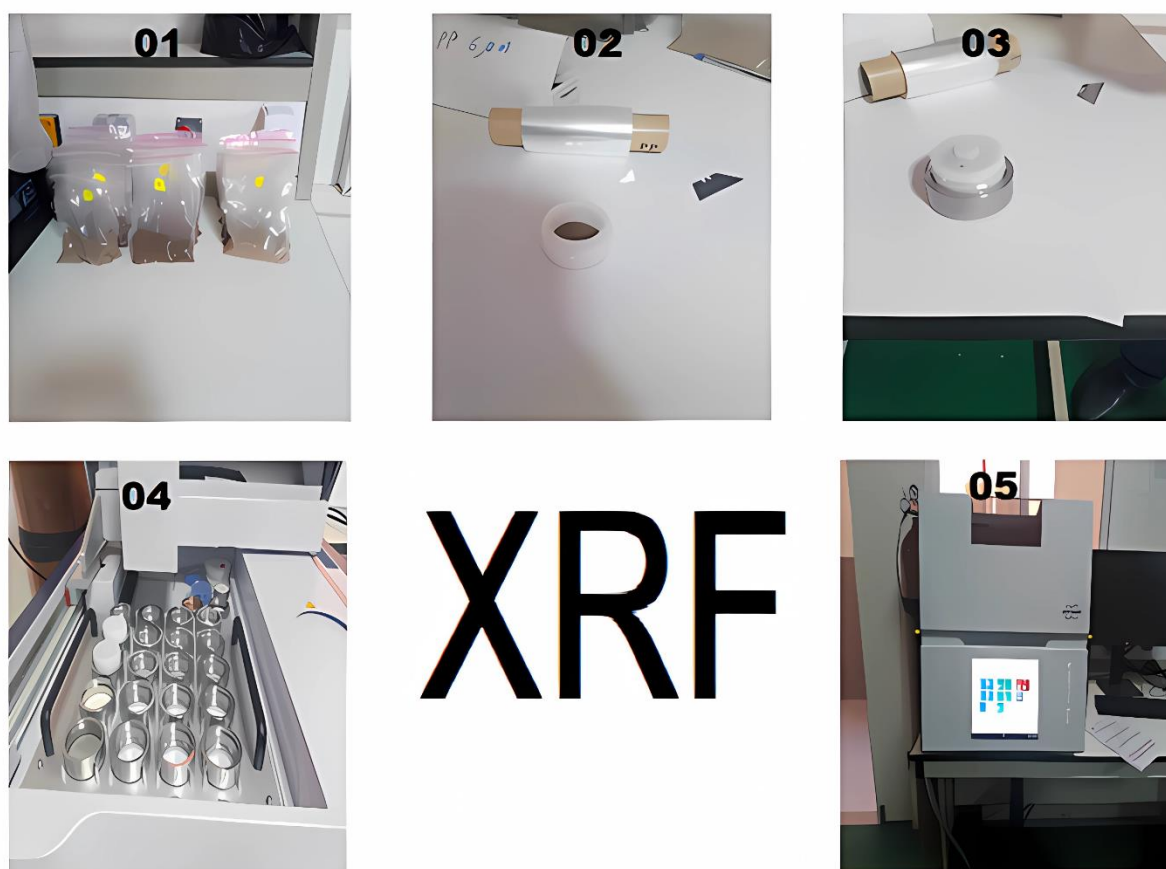


Figure 53. Préparation des échantillons pour les analyses XRF.

3. Résultats et interprétations

3.1. Caractéristiques physico-chimiques du sol

✚ Granulométrie

La granulométrie des sols représente la texture des sols qui consiste à des particules, telles que le sable, le limon et l'argile. Ces particules peuvent affecter ses propriétés et son comportement, tels que sa capacité à retenir l'eau et les nutriments, ou sa porosité et sa résistance (Grosvernier, 1991). La granulométrie des sols est très importante dans de

nombreux domaines, notamment l'agriculture, car elle permet de comprendre les caractéristiques des sols et la manière de les gérer pour optimiser la croissance et le rendement des cultures.

L'analyse granulométrique des différentes parcelles étudiées montre des fractions dominantes de limono-argileuse avant l'irrigation ou après la récolte pour les parcelles (P1 et P2), et des fractions de limono-sableuse avant l'irrigation et après la récolte pour la parcelle (P3). La parcelle (P3) présente quant à elle des fractions de limono-sableuse, qui apparaissent aussi avant l'irrigation et après la récolte. La parcelle non irriguée (P_{tém}) représente une fraction sableuse (Tab. 28, Fig. 52).

L'irrigation des cultures appliquée sur les trois parcelles étudiées (P1, P2 et P3) et en comparaison avec la parcelle non irriguée (témoin), il est constaté que le sol de la région de K'sob évolue vers la fraction Limono-argileuse où la teneur en limon et en argile augmente au détriment de la teneur en sable. À long terme, cette situation peut réduire la porosité et diminuer les espaces entre les particules du sol. Ces dernières peuvent avoir un impact sur la perméabilité et la circulation des eaux ou de l'air dans les sols, provoquant ainsi une diminution de la fertilité des terres agricoles dans la région.

Tableau 28. Classes de texture de notre parcelles du périmètre de K'sob.

	Parcelles	Argile%	Limon%	Sable%	Texture
Avant irrigation	P ₁	19.8	52.2	28	Limon Argilo-Sableux
	P ₂	23.8	34.6	41.6	Limon Argilo-Sableux
	P ₃	14	61.8	24.2	Limon Sablo-Argileux
Après récolte	P ₁	20	50.7	29.3	Limon Argilo-Sableux
	P ₂	22.3	34.2	43.7	Limon Argilo-Sableux
	P ₃	12.5	63	24.5	Limon Sablo-Argileux
	P _{tém}	15.6	31.2	53.2	Sable Argilo-Liminaux

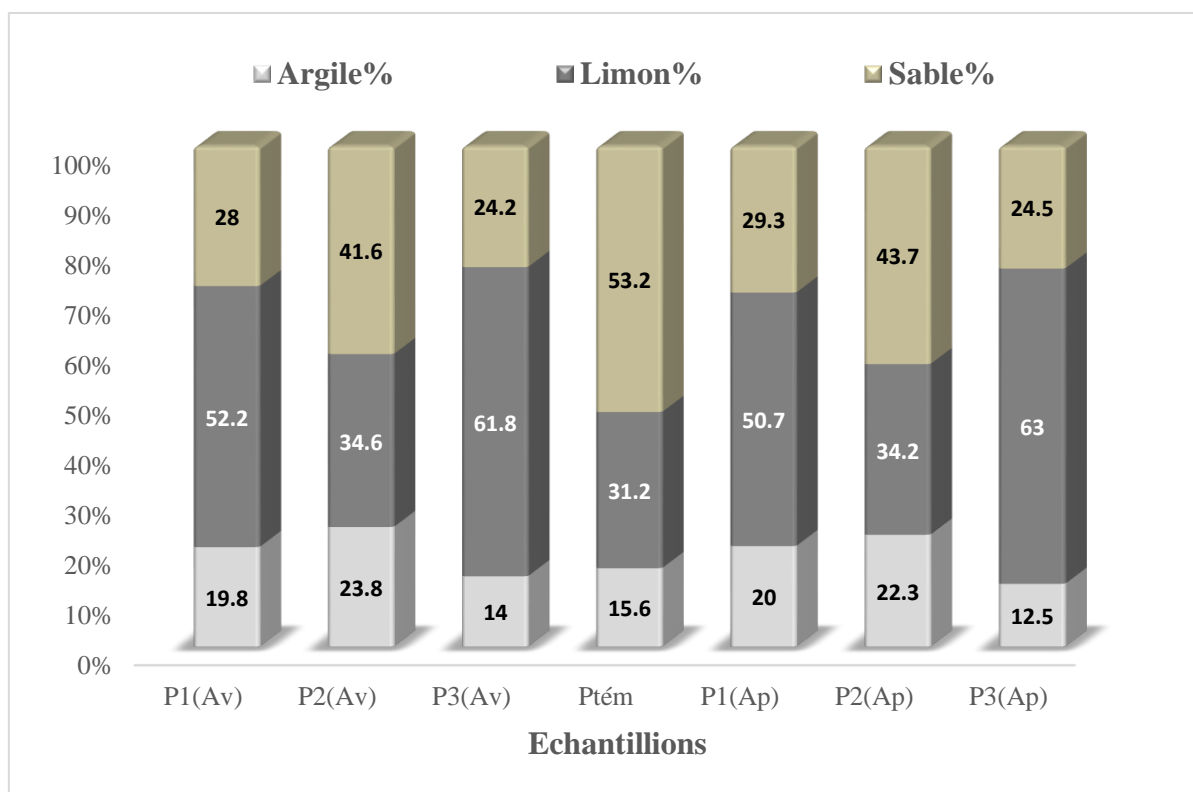


Figure 54. Teneurs des analyses granulométriques des sols dans le périmètre de K'sob avant et après irrigation.

✚ Potentiel hydrogène

En général, le pH du sol indique s'il est acide ou alcalin. La disponibilité des nutriments, l'activité microbienne ou la croissance des plantes sont également influencées par cette caractéristique cruciale du pH. En outre, les précipitations, le type de sol et les activités humaines telles que l'agriculture et l'irrigation sont des variables qui peuvent affecter le pH du sol.

Les résultats obtenus en mesurant le pH du sol dans notre zone d'étude montrent que les valeurs obtenues pour les parcelles étudiées avant irrigation oscillent entre 7.7 et 11, et que les valeurs augmentent considérablement après l'irrigation, variant entre 9.5 et 11.4. D'autre part, les résultats obtenus pour la parcelle non irriguée (témoin) montrent des valeurs comprises entre 8.8 et 10.3. Les valeurs obtenues après l'irrigation indiquent que l'irrigation avec les eaux de l'Oued K'sob augmente le taux du pH du sol dans la région (Fig. 53). Selon l'échelle de (Soltner, 1981) pour la classification du sol en fonction du pH, les sols de la région de K'sob sont caractérisés par un pH alcalin et très alcalin (Tab. 29). Cette forte alcalinité du sol de la région de K'sob est liée à l'irrigation excessive par les eaux de l'Oued K'sob, qui contiennent des sels comme le calcium, le magnésium et le potassium, mais aussi à l'effet des roches alcalines dans la région.

Tableau 29. Classification du sol selon le pH d'après (Soltner, 1981).

pH	Qualité du sol
3 - 4.5	Extrêmement acide
4.5 - 5	Très fortement acide
5 - 5.5	Très acide
5.5 - 6	Acide
6 - 6.75	Faiblement acide
6.75 - 7.25	Neutre
7.25 - 8.5	Alcalin
> 8.5	Très alcalin

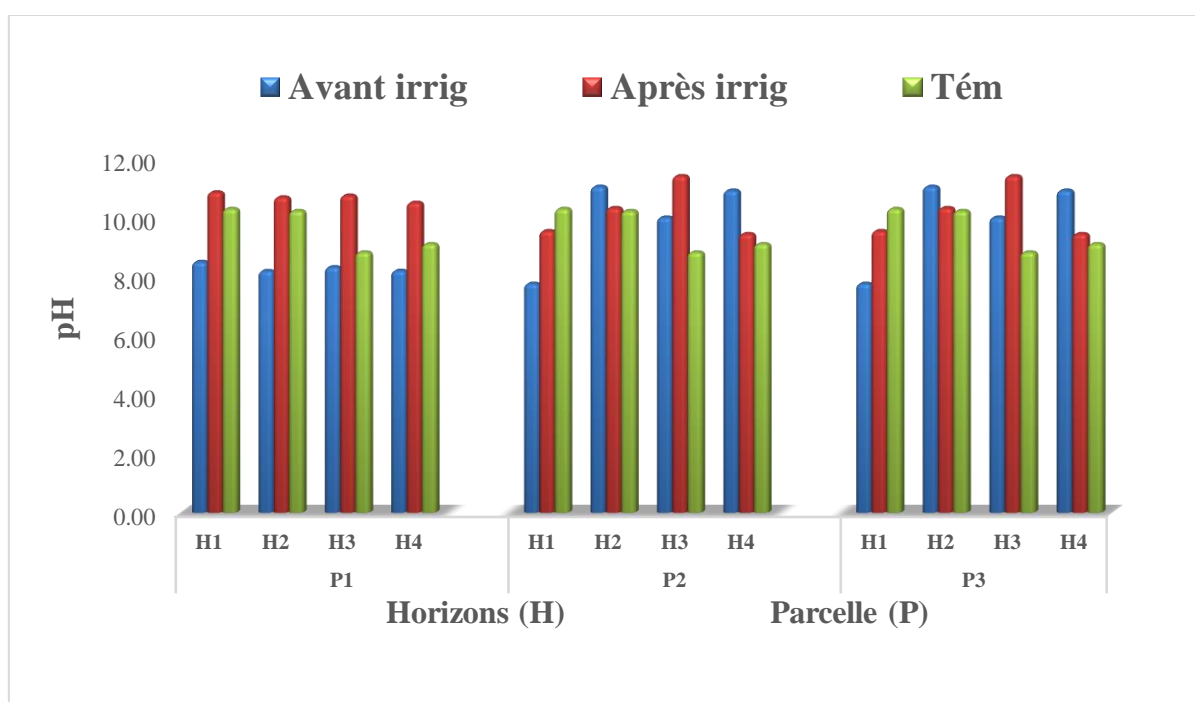


Figure 55. Variation du pH du sol dans le périmètre de K'sob avant et après irrigation.

✚ Conductivité électrique

Comme pour la conductivité de l'eau, la conductivité électrique du sol est un paramètre essentiel lié à la présence de sels minéraux dans sa composition. Elle joue notamment un rôle important dans la croissance et le rendement des plantes (Tab. 30).

Tableau 30. Types des sols selon leur conductivité d'après (Durand, 1983).

CE $\mu\text{S}/\text{cm}$	Type des sols	Effet sur les rendements des plantes
0-500	Sol non salé	Sans effet ou peu
500-1000	Sol moyenne de salinité	Diminution de la croissance et le rendement des plantes très sensible au sel
1000-2000	Sol salé	Effet néfaste sur la plupart des cultures
2000-4000	Sol très salé	Rendement juste dans les cultures résistantes
> 4000	Sol extrêmement salé	Juste quelque plantes donne des rendements

Les résultats obtenus montrent des valeurs différenciées entre les parcelles. Avant irrigation, les valeurs de conductivité oscillaient entre 249 et 885 $\mu\text{S}/\text{cm}$, pour une moyenne de 508 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Après irrigation, on a trouvé des valeurs augmentées variant entre 350 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 1 213 $\mu\text{S}/\text{cm}$ avec une moyenne de 687 $\mu\text{S}/\text{cm}$, cette augmentation étant remarquée dans les horizons (H1 et H2). D'autre part, la parcelle non irriguée (témoin) présente des valeurs comprises entre 253 et 388 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Fig. 54).

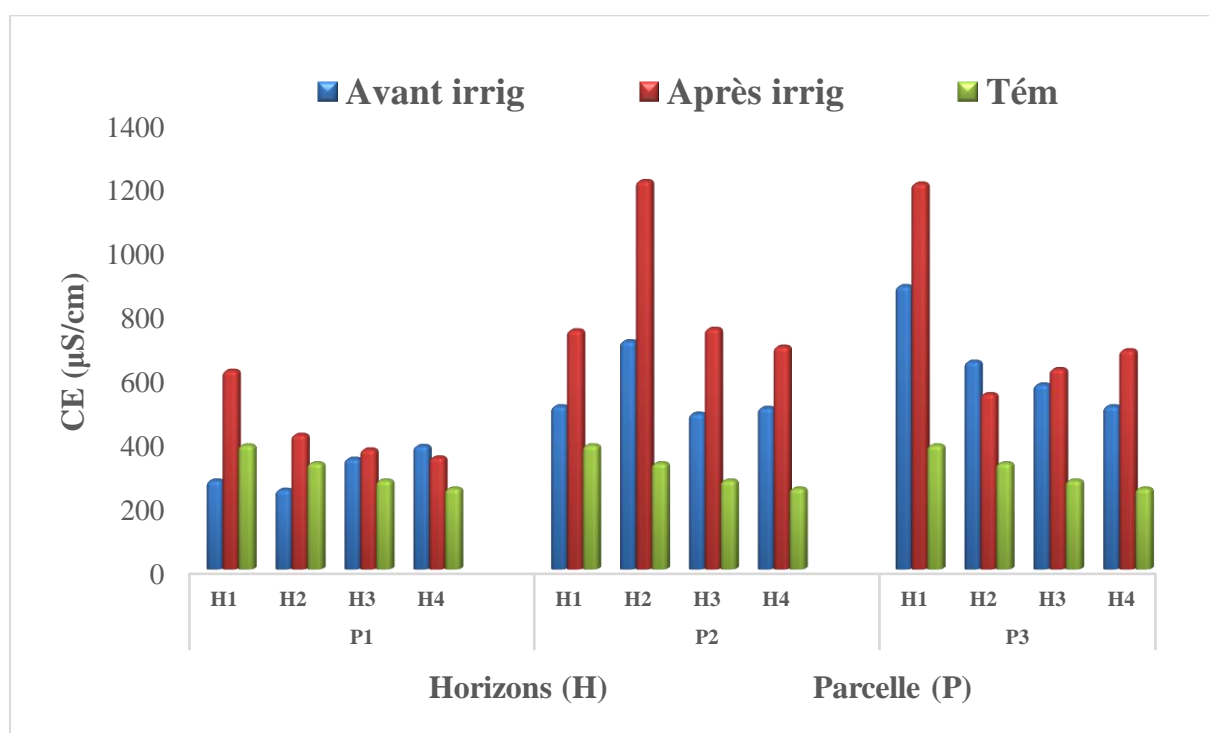


Figure 56. Variation de la conductivité électrique du sol dans le périmètre de K'sob avant et après irrigation.

Selon la classification de (**Durand, 1983**), la conductivité électrique du sol dans la région de K'sob est caractérisée par une salinité moyenne. En outre, les sols salés (supérieurs à 1 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$) apparaissent dans les parcelles (P2 et P3) après l'irrigation. Cette augmentation de la conductivité est liée à la teneur en sels du sol, résultant de l'irrigation et de l'altération des roches riches en sels.

Salinité

La salinité du sol est devenue un problème majeur dans tous les pays du monde, surtout dans les régions arides et semi-arides. Elle joue un rôle fondamental dans le développement des cultures, la dispersion des complexes colloïdaux et la stabilité ainsi que la perméabilité des sols. (**Servant, 1976**).

Les résultats obtenus pour la salinité montrent que, avant l'irrigation, les valeurs de salinité variaient entre 0.5 % et 1.5 % avec une moyenne de 0.9 %. Après l'irrigation, on a également trouvé des valeurs plus élevées dans les horizons (H1) avec une salinité oscillant entre 0.6 % et 2.4 % et une moyenne de 1.12 %. D'autre part, la parcelle non irriguée (témoin) présente des valeurs comprises entre 0.5 % et 0.9 % (Fig. 55). En général, selon la classification de la (**FAO, 1976**), la salinité des sols dans la région de K'sob représente des sols modérément salins (Tab. 31).

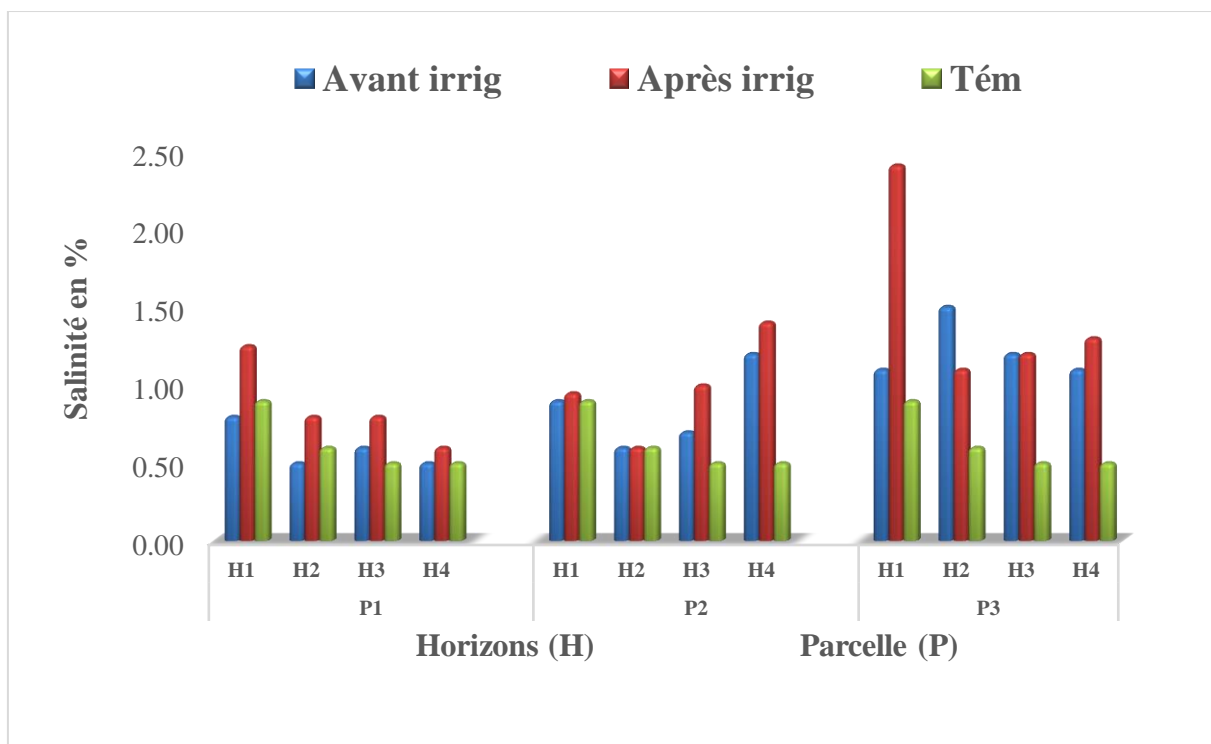


Figure 57. Variation de la salinité du sol dans le périmètre de K'sob avant et après irrigation.

Tableau 31. Types des sols selon leur salinité d'après (FAO, 1976).

Salinité en %	Type des sols
< 0.2	Sol non salin
0.2 – 0.5	Sol légèrement salin
0.5 – 2.0	Sol modérément salin
2.0 – 4.0	Sol fortement salin
> 4.0	Sol très fortement salin

✚ Carbone organique

Le carbone organique présent dans la nature se trouve dans tous les êtres vivants. Dans le sol, il joue un rôle important dans la fertilité des terres agricoles et l'amélioration de la structure ainsi que la rétention des nutriments.

En général, les teneurs en carbone organique avant l'irrigation donnent des valeurs oscillant entre 1.3 % et 4.1 % avec une moyenne de 2.3 %. Après l'irrigation, on trouve des valeurs variant entre 1.6 % et 3.6 % et une moyenne de 3.18 %. La parcelle non irriguée (témoin) présente des valeurs comprises entre 1.8 % et 2.5 % (Fig. 56). D'après ces résultats, on constate que les sols de la région de K'Sob sont riches en carbone organique.

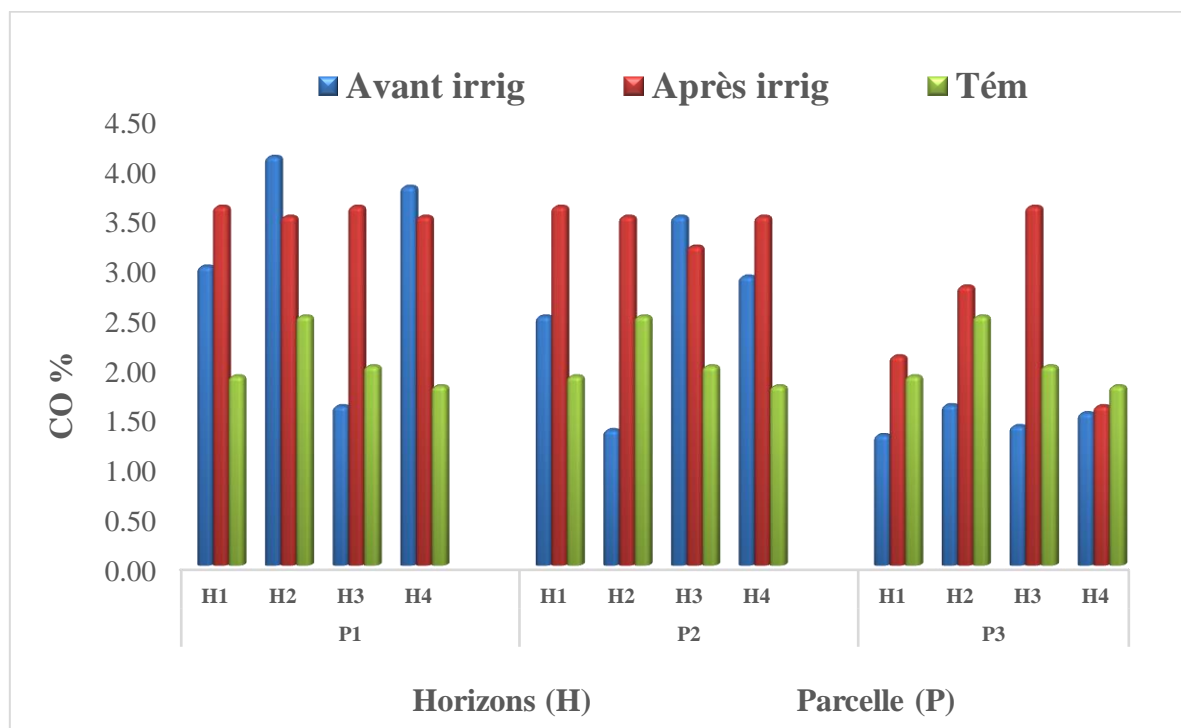


Figure 58. Taux de carbone organique du sol dans le périmètre de K'sob avant et après irrigation.

✚ Matière organique

La présence de la matière organique dans le sol et dans les terres agricoles est essentielle. Elle joue un rôle fondamental dans le fonctionnement physico-chimique et biologique des sols, ainsi que dans l'augmentation et l'amélioration de leur fertilité.

Les résultats obtenus pour la matière organique dans les différentes parcelles permettent de distinguer une variation des taux d'une parcelle à une autre avant et après irrigation. Avant irrigation, les valeurs obtenues varient entre 2.34 % et 7.05 % avec une moyenne de 4.13 %. Après irrigation, les résultats oscillent entre 2.75 % et 6.19 % avec une moyenne de 5.46 %. Par ailleurs, la parcelle non irriguée (témoin) présente des valeurs comprises entre 3.1 % et 4.3 % (Fig. 57).

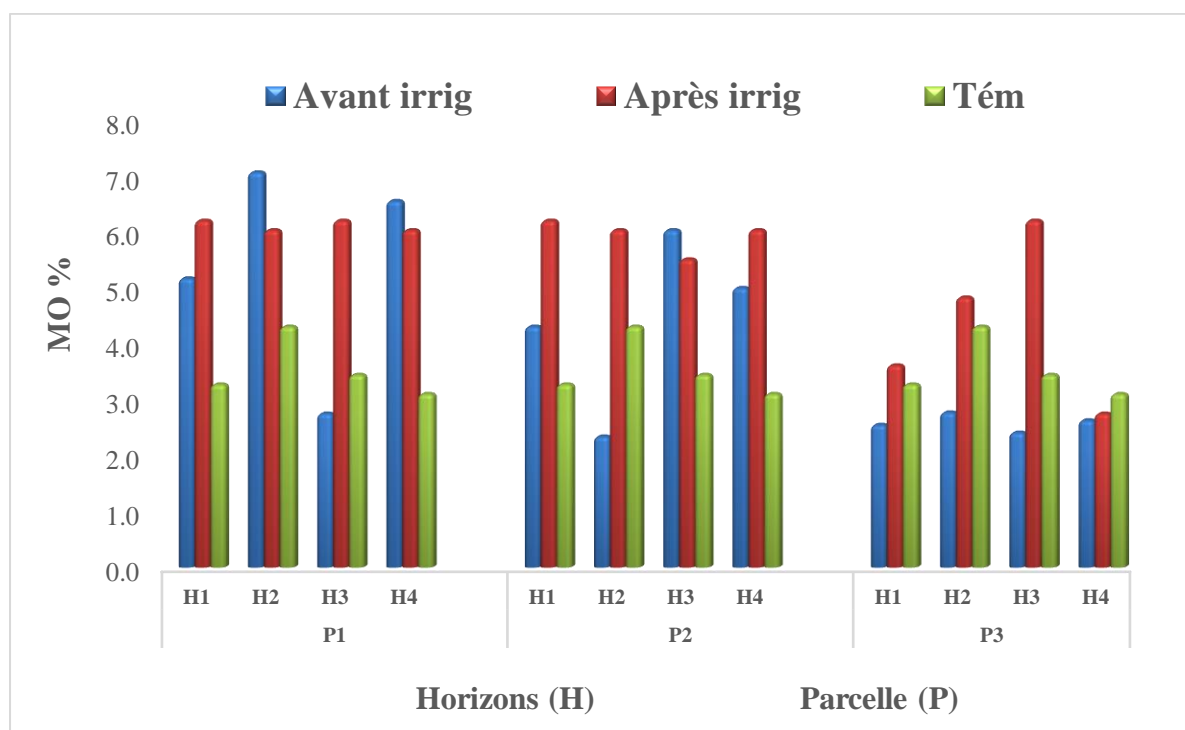


Figure 59. Variation de la matière organique dans les sols du périmètre de K'sob avant et après irrigation.

Selon la classification de proposée par (Gauchers G., 1968), le sol de la région de K'sob est riche en matière organique (Tab. 32). Cela est dû à l'utilisation d'engrais et de fertilisants durant la période des cultures. D'autre part, la capacité d'absorption de l'argile contenue dans la composition du sol permet la rétention de la matière organique.

Tableau 32. Types des sols selon leur MO% d'après (Gauchers G., 1968).

MO%	Type des sols
>1	Extrêmement faible en MO
1 - 1.5	Très faible en MO
1.5 - 2.5	Faible en MO
2.5 - 3.5	Moyen en MO
3.5 - 4.5	Moyennement élevé en MO
4.5 - 5	Elevé en MO
>5	Très élevé en MO

+ Soufre

Comme tous les éléments chimiques présents dans le sol, le soufre est un élément important que l'on trouve dans la nature sous différentes formes : organique ou minérale. Il est utilisé par le sol sous forme de soufre organique ou sous forme d'oxydé du soufre ou de sulfate, sous forme de sels minéraux solubles. Dans les terres agricoles, on trouve généralement des taux situés entre 0.02 % et 0.5 % (Bouthier & Danjou., 2009).

Le taux de soufre dans la région de K'sob avant l'irrigation montre des valeurs variant entre 0.08 % et 0.25 % avec une moyenne de 0.17 %. Après l'irrigation, les teneurs en soufre oscillent entre 0.11 % et 0.55 % avec une moyenne de 0.23 %. La parcelle non irriguée (témoin) présente des taux variant entre 0.05 % et 0.13 %. En général, les niveaux de soufre dans notre région sont constants. Les parcelles (P1. P2) présentent une augmentation des niveaux de soufre après irrigation de > 0.5 % (Fig. 58). Cette augmentation est liée à l'utilisation d'eaux d'irrigation riches en sulfates et à l'application d'engrais sous forme de fumiers et de composts contenant du soufre.

+ Phosphore total (P_2O_5)

Le phosphore est un élément majeur essentiel à la vie de tous les êtres vivants. Il est également indispensable aux plantes pendant la période de croissance racinaire et pour la fixation d'azote atmosphérique (Soltner., 1996). Les normes d'interprétation pour le phosphore sont illustrées dans le tableau 33.

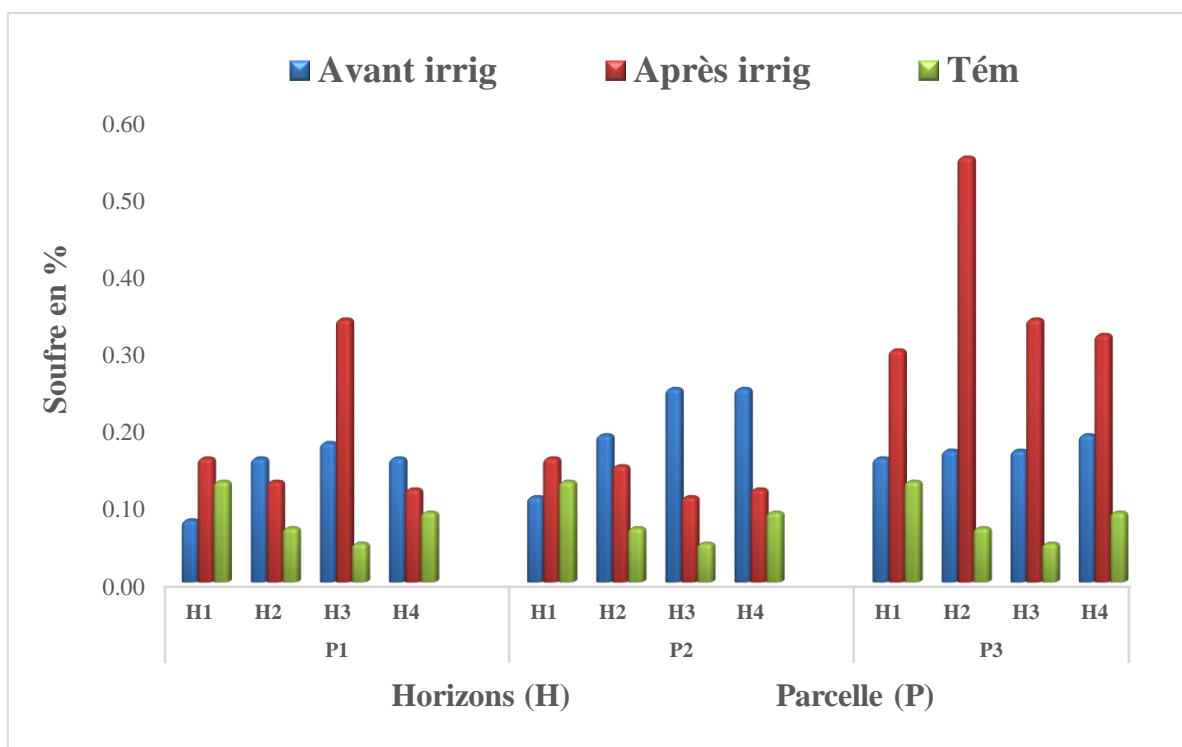


Figure 60. Tenures du soufre dans les sols du périmètre de K'sob avant et après irrigation.

Les résultats des analyses du sol montrent une diminution marquée des taux de phosphore. Avant l'irrigation, on remarque des concentrations comprises entre 0.001 % et 0.007 % avec une moyenne de 0.004 %. Alors qu'après l'irrigation, les valeurs se trouvent entre 0 % et 0.002 % avec une moyenne de 0.001 %. Pour la parcelle non irriguée (témoin), on remarque des concentrations très faibles en phosphore oscillant entre 0 % et 0.001 % (Fig. 59).

Cette présence remarquable de phosphore dans les sols avant l'irrigation et sa diminution après l'irrigation est liée à l'utilisation de fertilisants pour le sol et d'engrais comme les NPK pour préparer le terrain agricole. D'autre part, la diminution est la conséquence de la consommation de phosphore par les plantes.

Tableau 33. Normes d'interprétation pour le phosphore total d'après (Bray, 1945).

Phosphore en (ppm et %)	Qualification du sol
< 25 ppm (0.0025%)	Faible en phosphore total
25-50 ppm (0.0025%-0.005%)	Moyen en phosphore total
> 50ppm (0.005%)	Élevé en phosphore total

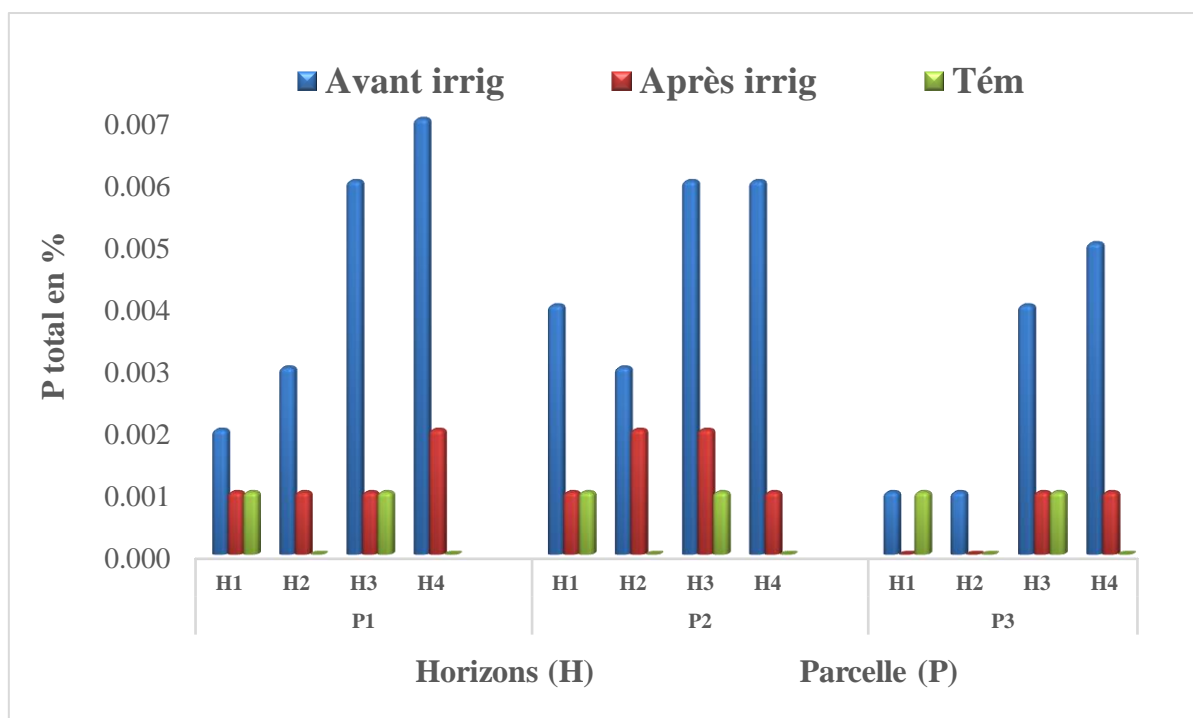


Figure 61. Variation des teneurs en phosphore total dans les sols du périmètre de K'sob avant et après irrigation.

3.2. Bases échangeables

Les bases échangeables sont des cations chargés positivement, comme le Ca^{2+} , le K^+ , le Mg^{2+} et le Na^+ qui sont naturellement présents dans le sol (Tab. 34). Ils sont capables d'échanger leur position avec d'autres cations présents dans la solution du sol ou dans le complexe argilo-humique (CAH). Ces mouvements entre les éléments sont importants pour augmenter la fertilité du sol en y retenant des éléments essentiels pour le développement et la croissance des plantes (Lilia, 2016).

Tableau 34. Normes d'interprétation pour les éléments échangeables selon (FAO, 1976).

Bases échangeables	Concentration faible en %	Concentration moyenne en %	Concentration élevée en %
Ca^{2+}	0-5	5-10	> 10
Mg^{2+}	0-2	2-4	> 4
Na^+	0-0.1	0.1-0.5	> 0.5
K^+	0-0.2	0.2-0.4	> 0.4

✚ Calcium (Ca^{+2})

Le calcium est un élément naturel que l'on trouve dans le sol sous différentes formes : sous forme de sels de calcium tels que les carbonates, les chlorures, les nitrates, les phosphates et les sulfates. Il peut contribuer à la croissance et à la nutrition des plantes (Delas, 2000).

Les résultats obtenus des concentrations de calcium dans notre zone d'étude montrent des valeurs très élevées. Avant l'irrigation, les valeurs se situent entre 25.6 % et 29.06 %, avec une moyenne de 26 %. Après l'irrigation, on observe une légère augmentation oscillant entre 23 % et 30 % avec une moyenne de 27.2 %. Pour la parcelle non irriguée (témoin), on remarque des valeurs variant entre 20 % et 22 % (Fig.60).

Selon les normes de la (FAO, 1976), le taux de calcium dans les sols de la région de K'sob est plus élevé que les normes mondiales. Cette forte teneur en calcium est liée à la nature géologique de la région et à la composition minérale de son sous-sol, qui contient des roches calcaires et des roches dolomitiques riches en calcium. De plus, l'utilisation d'eaux d'irrigation très alcalines augmente le taux de calcium dans le sol et son accumulation.

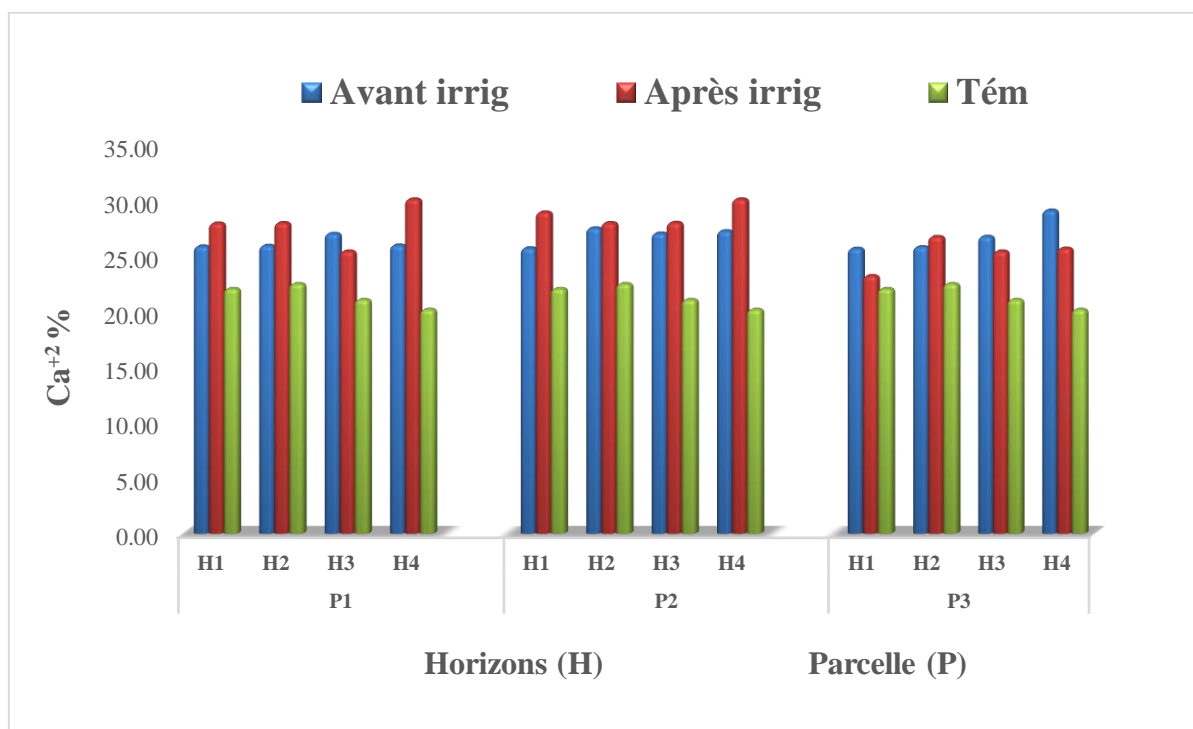


Figure 62. Variation du calcium dans les sols du périmètre de K'sob avant et après irrigation.

✚ Magnésium (Mg^{2+})

La présence de magnésium dans le sol est très importante. On en trouve notamment dans les formations carbonatées de l'écorce terrestre (Rodier J., 2005).

Comme tous les minéraux nécessaires à la croissance des plantes, le magnésium joue un rôle fondamental dans la transformation de l'énergie lumineuse du soleil en énergie chimique. Il est également le seul élément minéral présent dans la chlorophylle, nécessaire à la production de sucres et de protéines par les plantes (Soltner, 1999).

Les résultats obtenus des analyses des teneurs en magnésium indiquent des concentrations comprises entre 0.20 % et 0.85 % avant irrigation, avec une moyenne de 0.54 %. Après l'irrigation, les concentrations sont comprises entre 0.3 % et 1.3 % avec une moyenne de 0.74 %. Pour la parcelle non irriguée (témoin), on enregistre des concentrations oscillant entre 0.15 % et 0.65 % (Fig. 61).

Les teneurs en magnésium dans les sols de la région de K'sob sont généralement très faibles en raison de la forte concentration de calcium dans notre région. En conséquence, le sol est saturé en calcium et l'adsorption du magnésium est très difficile, ce qui entraîne des sols pauvres en magnésium.

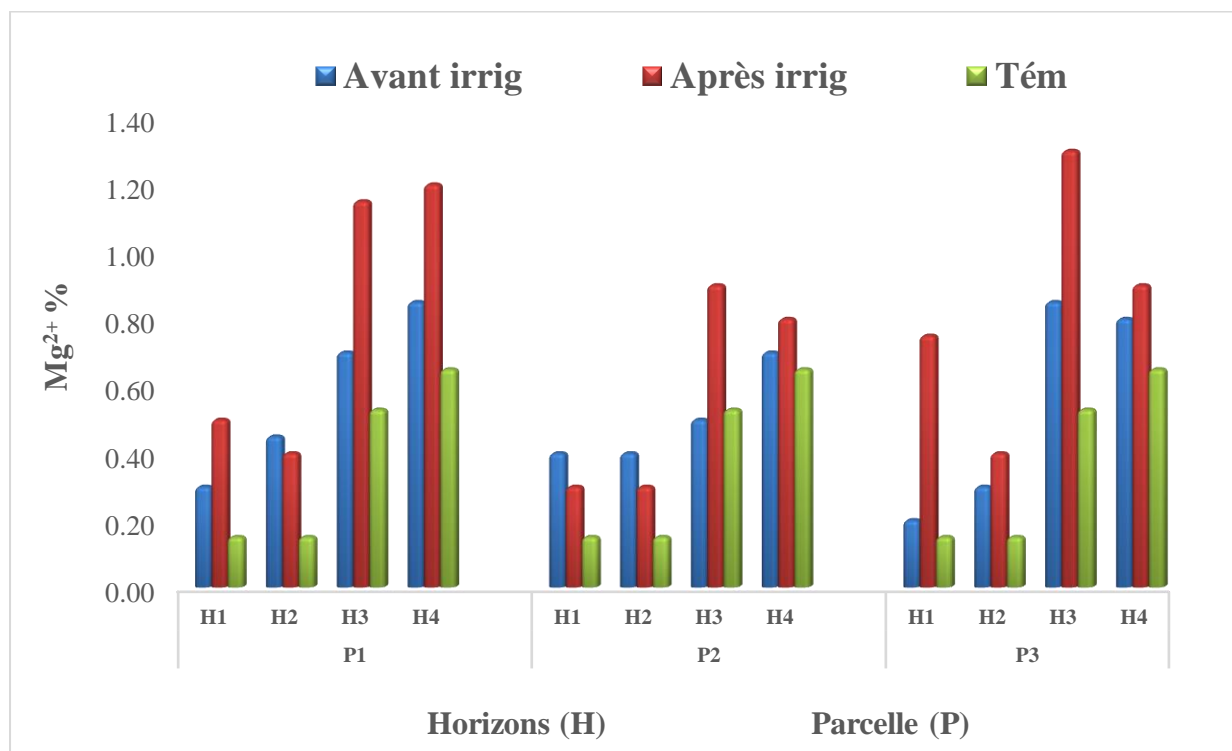


Figure 63. Variation du magnésium dans les sols du périmètre de K'sob avant et après irrigation.

✚ Potassium (K⁺)

Le potassium est un élément échangeable présent dans la nature sous différentes formes de roches telles que le gneiss et le schiste, dont la plupart sont relativement solubles. Il est considéré comme l'un des trois éléments clés (N.P.K) nécessaires à la floraison, à la

fructification, à l'absorption d'eau, à la résistance aux maladies et à la sécheresse des plantes. Les engrais composés contiennent généralement du potassium pour répondre aux besoins des plantes en cet élément nutritif (Loué, 1979).

Le taux d'ions de potassium montre des valeurs allant de 0.87 % à 1.6 % avant irrigation, avec une moyenne de 1.17 %. Après l'irrigation, le taux varie entre 0.79 % et 1.25 % avec une moyenne de 1.01 %. Pour la parcelle non irriguée (témoin), on remarque des taux oscillant entre 1.09 % et 1.25 % (Fig. 62).

Les fortes concentrations de potassium dans le sol peuvent être liées à l'utilisation intensive d'engrais comme les NPK pour préparer les terres agricoles. D'autre part, leur diminution après l'irrigation témoigne de l'utilisation du potassium par les plantes pour leurs besoins.

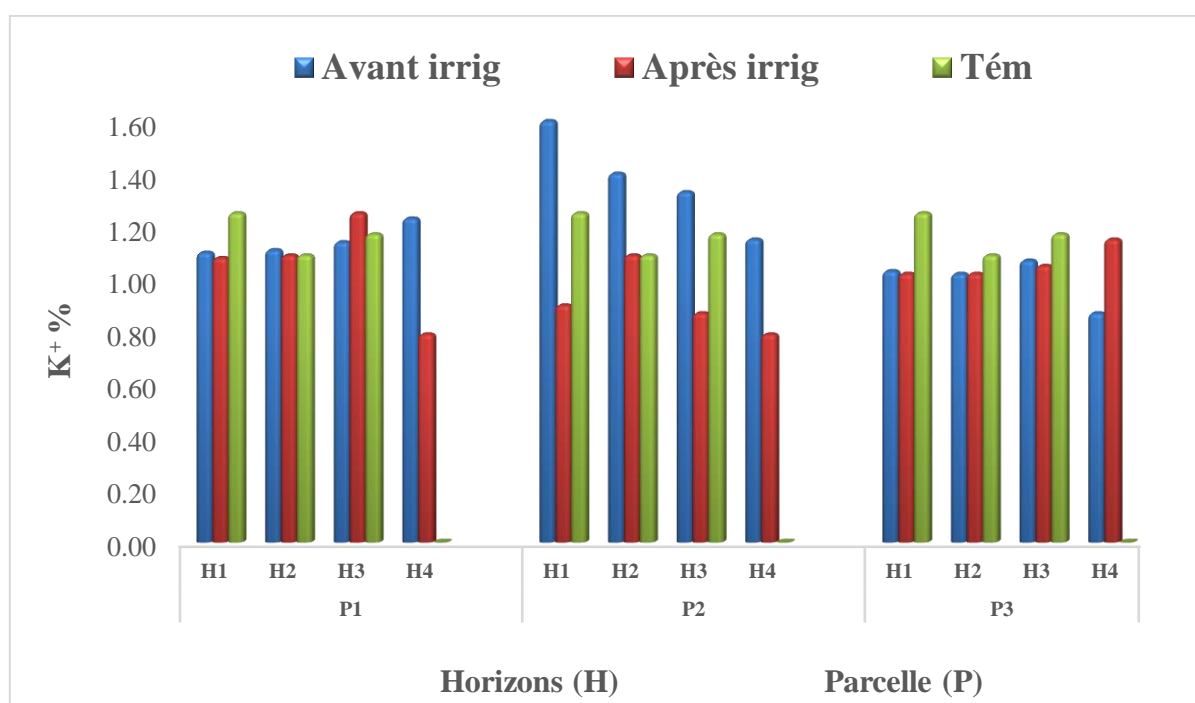


Figure 64. Taux de potassium dans les sols du périmètre de K'sob avant et après irrigation.

⚡ Sodium (Na⁺)

Le sodium est un élément nécessaire à certaines plantes, mais une forte concentration d'ions de sodium dans l'eau d'irrigation est indésirable pour ces dernières. La présence de sodium est liée à celle de potassium et plus la concentration de potassium dans le milieu augmente, plus l'effet du sodium diminue (Loué, 1979 ; Belghiti et al., 2013).

La teneur en sodium varie entre 0.1 % et 0.4 % avec une moyenne de 0.22 % avant irrigation. Après l'irrigation, le taux varie entre 0.16 % et 0.83 % avec une moyenne de 0.56 %. Pour la parcelle non irriguée (témoin), on enregistre des concentrations variant entre 0.17 % et 0.28 % (Fig. 63). On remarque après l'irrigation une augmentation des concentrations de sodium dans

la région de K'sob. Cette augmentation est liée à l'accumulation de sodium dans le sol en raison de l'effet des eaux d'irrigation.

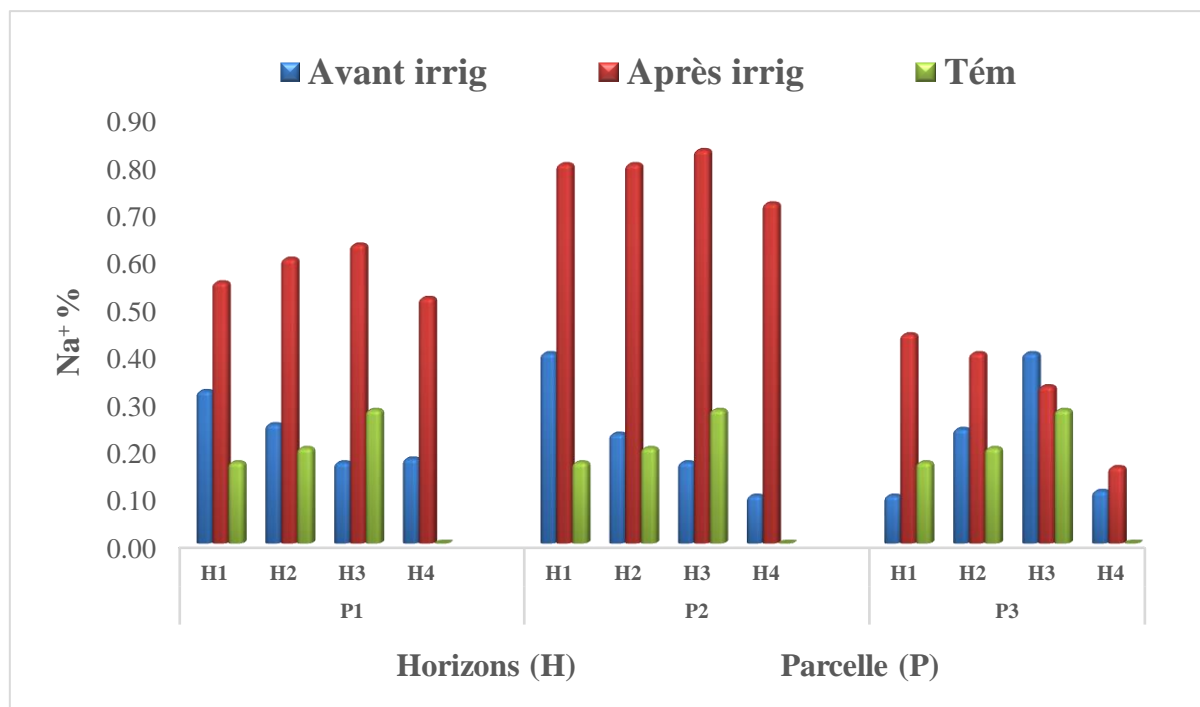


Figure 65. Variation du sodium dans les sols du périmètre de K'sob avant et après irrigation.

3.3. Eléments des traces métalliques (ETM)

Les éléments traces métalliques (ETM) ou les métaux lourds dans le sol sont des éléments métalliques toxiques pour les êtres vivants. Ils sont généralement présents à des concentrations faibles, inférieures à 0.1 %. Ils peuvent être d'origine naturelle, grâce à l'altération et à l'érosion des roches dans la croûte terrestre, ou d'origine anthropique, telle que la pollution industrielle des sols, l'utilisation de pesticides en agriculture et le trafic routier (Paul et al., 2012).

En l'absence de normes Algériennes définissant les niveaux de référence des ETM dans le sol, une méthode comparative basée sur les données bibliographiques existantes et les normes européennes a été utilisée pour interpréter nos résultats selon (Kabata-Pendias & Pendias, 2001 ; Meeting et al., 2002 ; WHO, 2003 ; Alloway, 2012 ; Anjos et al., 2015 ; Lambiénou et al., 2020) (Tab. 35).

Tableau 35. Valeurs maximales pour les (ETM) dans le sol selon FAO et l'OMS.

(ETM)	Valeurs maximale	
	FAO (mg/kg)	OMS (mg/kg)
Fer	2000 - (0.2%)	5000 - (0.5%)
Zinc	100 - (0.01%)	300 - (0.03%)
Cuivre	50 - (0.005%)	100 - (0.01%)
Aluminium	/	40000 - (4%)
Chrome	50 - (0.005%)	150 - (0.015%)
Titane	/	20000 - (2%)
Manganèse	/	400 - (0.04%)
Nikel	20 - (0.002%)	70 - (0.007%)
Arsenic	5 - (0.0005%)	20 - (0.002%)
Scandium	/	/
Strontium	/	/
Cobalt	/	10 - (0.001%)

Fer (Fe)

Les résultats obtenus pour les concentrations de fer présentent des valeurs pour la parcelle (P1) oscillant entre 6.25 % avant l'irrigation et 5.82 % après l'irrigation. La parcelle (P2) présente des concentrations variant entre 7 % avant l'irrigation et 6 % après l'irrigation. La parcelle (P3) donne des valeurs de 9 % avant l'irrigation et de 6 % après l'irrigation ou après la récolte. En outre, la parcelle non irriguée (témoin) affiche une moyenne de 4.62 % (Fig. 64).

D'après ces résultats, il est évident que les sols de notre zone d'étude sont fortement pollués et contaminés par le fer, avec des teneurs qui dépassent les normes admises par l'OMS (0.5 %) (WHO, 2003).

Il est bien connu que les zones arides et semi-arides se caractérisent par des sols calcaires qui ont une disponibilité limitée en fer (Fe) et en zinc (Zn). Cependant, dans notre cas, la source de fortes teneurs en fer dans la zone d'étude est liée à la présence de minéraux ferreux dans les formations géologiques, sous forme d'oxyde de fer ou liés aux autres minéraux du sol (Baize, 2000). L'irrigation intensive et l'accumulation de fer en surface du sol avec le temps, ainsi que l'utilisation d'engrais et de pesticides pour la fertilisation des sols, en sont l'une des causes.

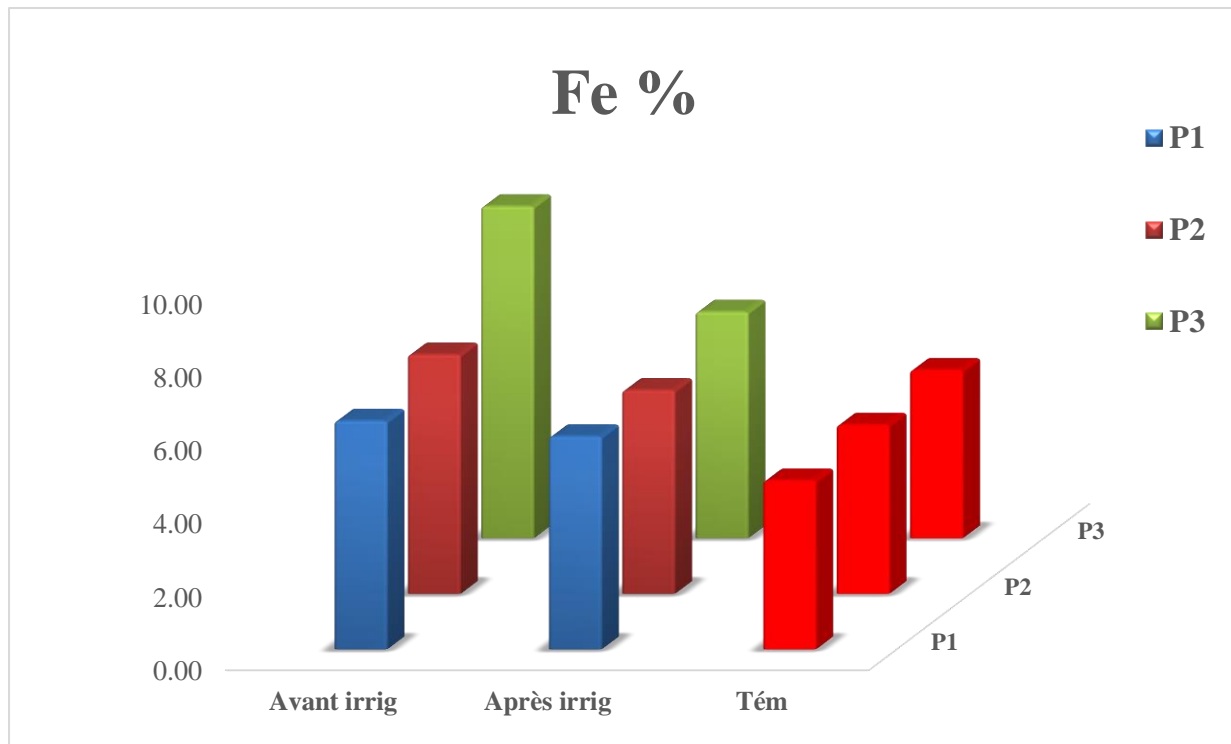


Figure 66. Variation du fer dans les sols du périmètre de K'sob avant et après irrigation.

✚ Zinc (Zn)

Les valeurs du zinc enregistrées montrent des concentrations dans la parcelle (P1) variant entre 0.020 % avant l'irrigation et 0.010 % après l'irrigation. La parcelle (P2) affiche des valeurs oscillant entre 0.015 % avant l'irrigation et 0.013 % après l'irrigation. La parcelle (P3) présente des concentrations de 0.018 % avant l'irrigation et 0.020 % après l'irrigation. La parcelle non irriguée (témoin) affiche une moyenne de 0.013 % (Fig.65).

En général, le taux de zinc dans notre zone d'étude est remarquables et les sols sont riches en zinc, mais ne dépassent pas les normes admises par l'OMS (0.03 %) (WHO, 2003). Par ailleurs, la présence de zinc dans notre région peut être liée aux rejets d'eaux usées dans l'oued K'sob, qui contiennent des déchets industriels et domestiques en contenant du zinc. Ces rejets peuvent polluer les sols agricoles lors du processus d'irrigation.

✚ Cuivre (Cu)

Les analyses réalisées au niveau de la région de K'sob montrent que les concentrations de cuivre pour la parcelle (P1) varient entre 0.018 % avant l'irrigation et 0.038 % après l'irrigation. La parcelle (P2) présente des valeurs oscillant entre 0.010 % avant l'irrigation et 0.017 % après l'irrigation. La parcelle (P3) présente des valeurs comprises entre 0.011 % avant l'irrigation et 0.035 % après l'irrigation. La parcelle non irriguée (témoin) présente une moyenne de 0.010 % (Fig.66).

Comme pour le fer, le cuivre dans notre zone d'étude présente de fortes concentrations marquées, qui augmentent après l'irrigation et dépassent les normes admises par l'OMS (0.01 %) (WHO, 2003).

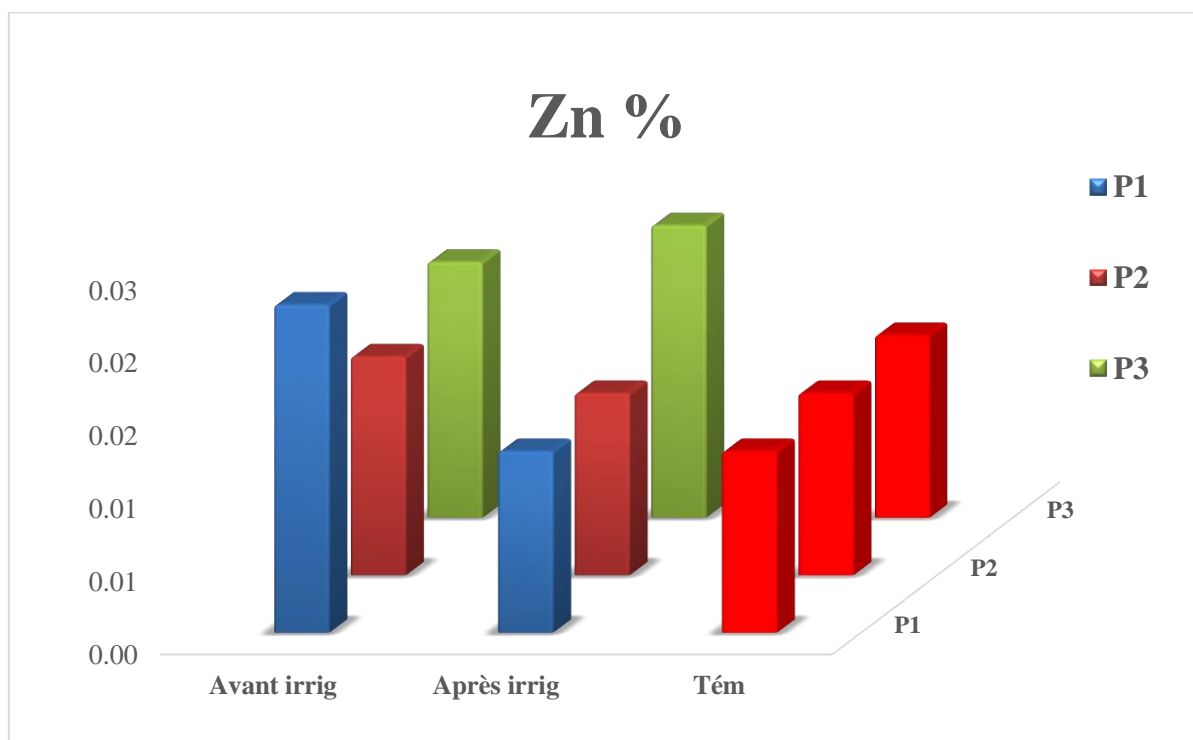


Figure 67. Variation du zinc dans les sols du périmètre de K'sob avant et après irrigation.

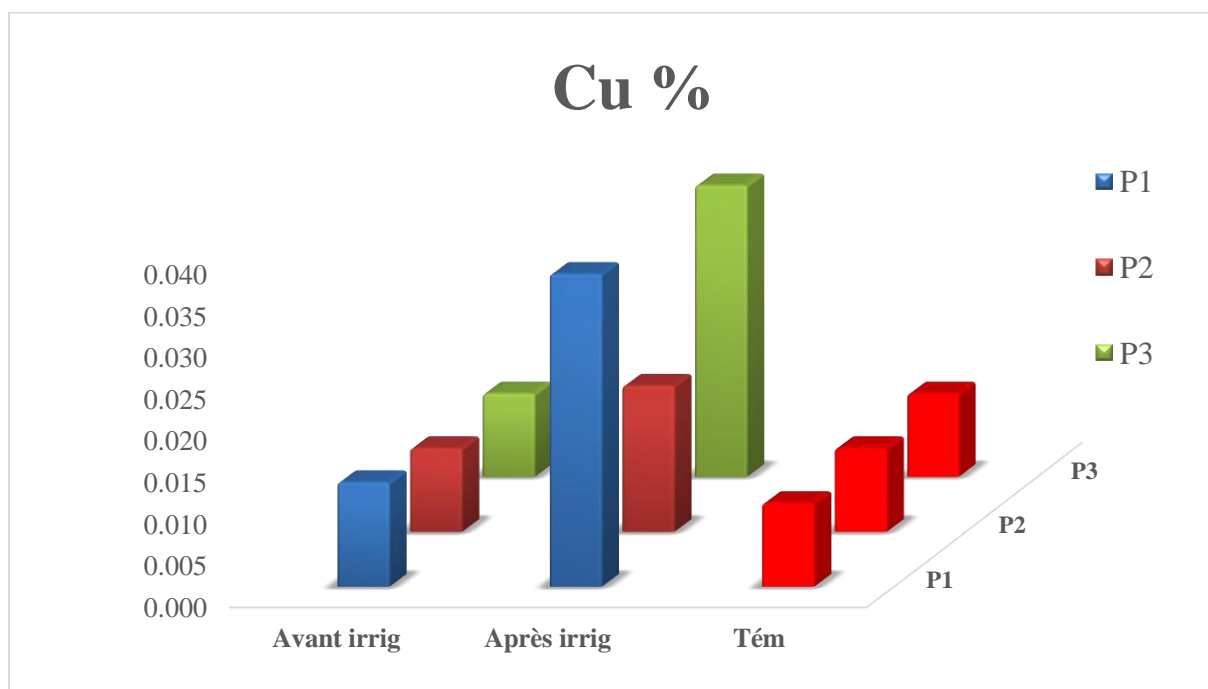


Figure 68. Variation du cuivre dans les sols du périmètre de K'sob avant et après irrigation.

Aluminium (Al)

Les résultats obtenus pour les teneurs en aluminium représentent des valeurs pour la parcelle (P1) variant entre 6.35 % avant l'irrigation et 6.04 % après l'irrigation. La parcelle (P2) présente des concentrations oscillant entre 6.14 % avant l'irrigation et 6 % après l'irrigation. La parcelle (P3) présente une teneur de 5.89 % avant l'irrigation et de 6.42 % après l'irrigation. La parcelle non irriguée (témoin) présente une moyenne de 6.33 % (Fig. 67). Ces résultats sont plus élevés que les normes admises par l'OMS (4 %) (WHO, 2003).

Les fortes teneurs en aluminium présentes dans la région de K'sob sont d'origine naturelle. On les trouve sur la croûte terrestre sous forme de sels minéraux argileux formés par la décomposition des roches silicatées riches en aluminium, comme les feldspaths et les micas, dans les dépôts rocheux de notre région.

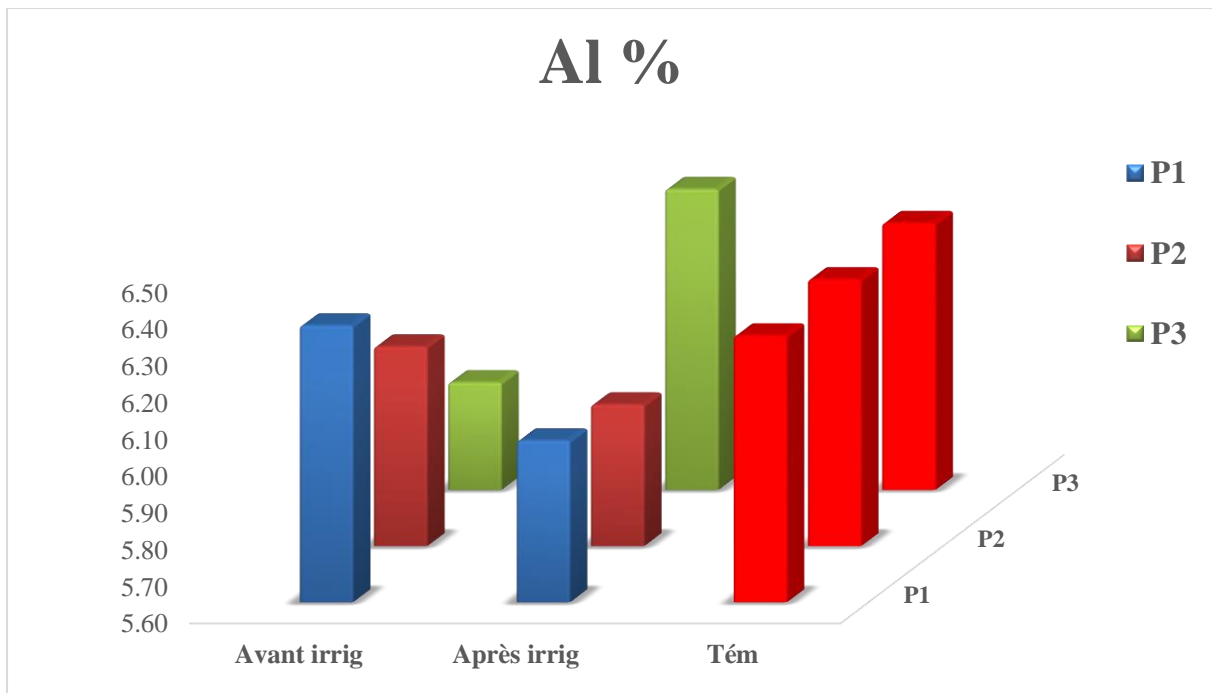


Figure 69. Variation d'aluminium dans les sols du périmètre de K'sob avant et après l'irrigation.

Chrome (Cr)

Les valeurs de chrome enregistrées montrent des concentrations oscillant entre 0.0018 % et 0.0021 % dans la parcelle (P1) avant et après l'irrigation. Dans la parcelle (P2), les valeurs varient entre 0.0028 % et 0.0033 % avant et après l'irrigation, tandis que la parcelle P3 présente des concentrations de 0.0013 % avant l'irrigation et de 0.0020 % après l'irrigation. Ainsi, la parcelle non irriguée (témoin) présente une moyenne de 0.0008 % (Fig.68).

Les traces de chrome dans notre zone d'étude ne sont pas polluantes (Rousseaux, 1988) et la concentration de cet élément n'affecte pas les sols et l'environnement selon les normes admises par l'OMS (0.015%) (WHO, 2003).

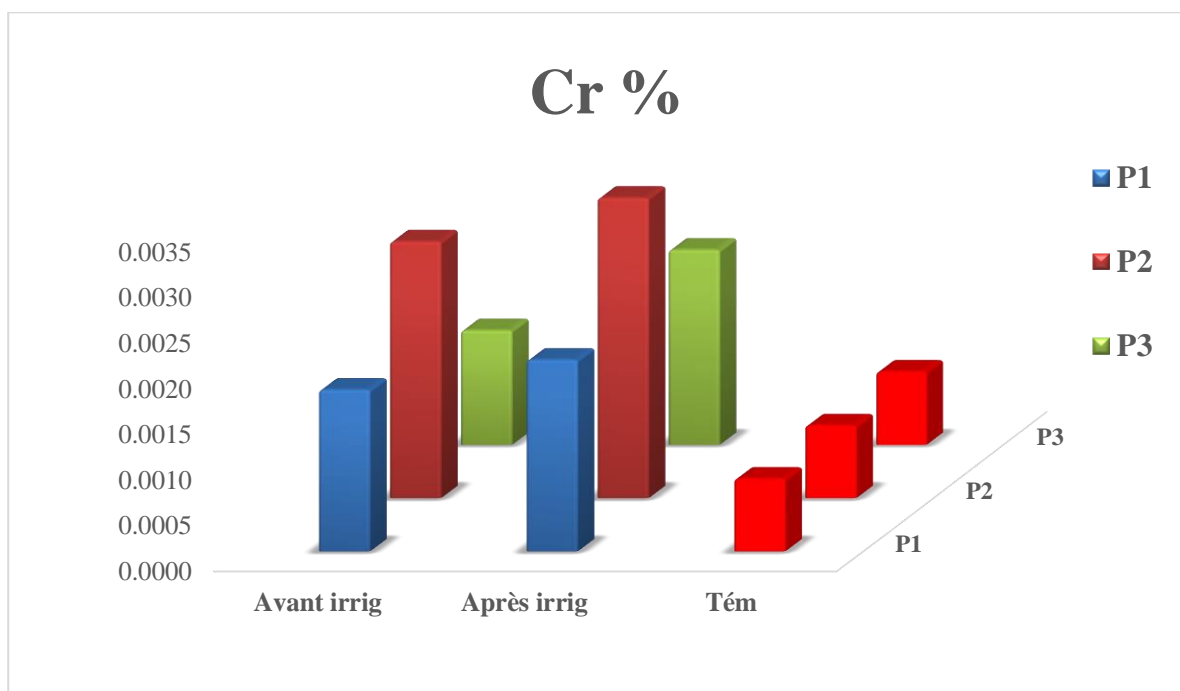


Figure 70. Variation de chrome dans les sols du périmètre de K'sob avant et après irrigation.

Titane (Ti)

La présence de titane dans la région de K'sob est remarquable, en témoignent des valeurs observées qui montrent un taux variant entre 0.53 % avant irrigation et de 0.46 % après l'irrigation pour la parcelle (P1). La parcelle (P2) donne des valeurs de 0.5 % et 0.44 % avant et après l'irrigation, respectivement. La parcelle (P3) montre également un taux oscillant entre 0.48 % avant l'irrigation et 0.52 % après l'irrigation. La parcelle non irriguée (témoin) présente une moyenne de 0.41 % (Fig.69).

Globalement, les teneurs enregistrées en titane sont des valeurs de faibles concentrations dans la plupart des parcelles étudiées, conformes aux normes admises par l'OMS (2 %) (WHO, 2003). De plus, la variation des taux de cet élément avant ou après l'irrigation est la même dans toute la région. Ainsi, on constate que la présence de titane dans la région de K'sob est d'origine naturelle et se trouve dans la croûte terrestre sous forme minérale ou sous forme de dioxyde de titane (TiO_2). Ce dioxyde peut être lié au fer ou à l'aluminium.

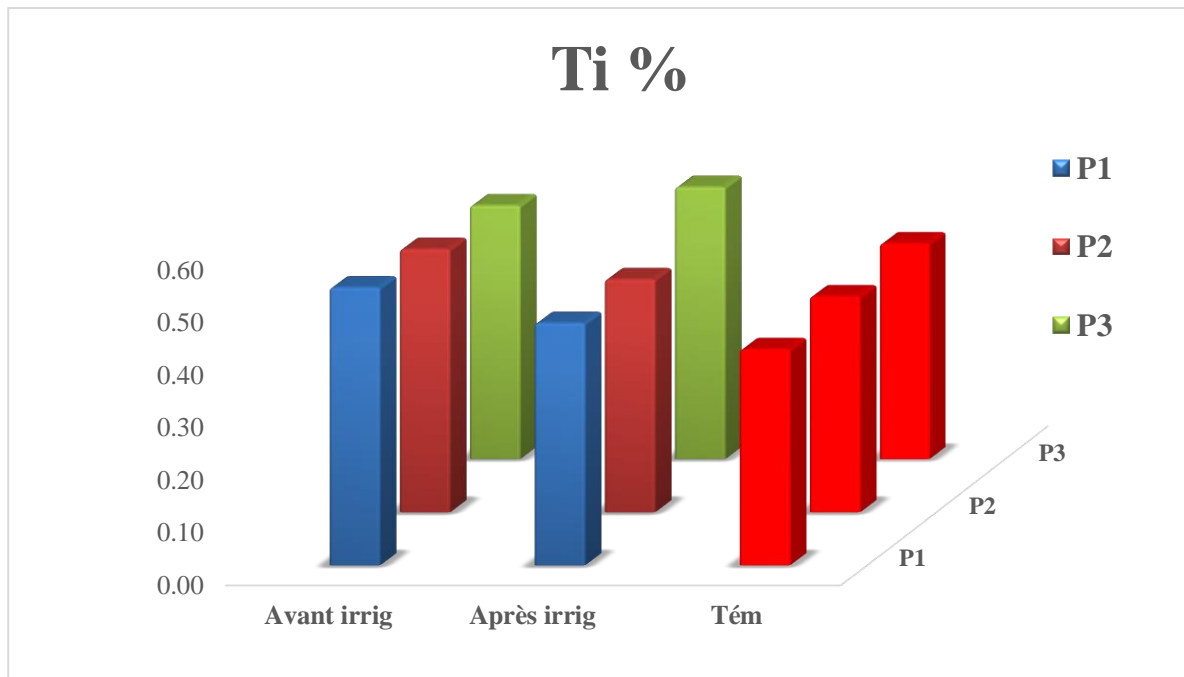


Figure 71. Variation de titane dans les sols du périmètre de K'sob avant et après irrigation.

✚ Manganèse (Mn)

Les résultats obtenus pour le manganèse présentent des valeurs pour la parcelle (P1) oscillant entre 0.073 % avant l'irrigation et 0.065 % après l'irrigation. La parcelle (P2) présente un taux variant entre 0.070 % avant l'irrigation et 0.06 % après l'irrigation. La parcelle (P3) présente une teneur de 0.023 % avant l'irrigation et de 0.040 % après l'irrigation. La parcelle non irriguée (témoin) affiche une moyenne de 0.025 %. On remarque également que les parcelles P1 et P2 dépassent la valeur limite donnée par l'OMS (0.04 %) (WHO, 2003) (Fig.70).

En général, les sols de notre région riches en manganèse sont d'origine naturelle, résultant de la décomposition des roches par la pyrolusite, la rhodonite ou la braunite, ou d'origine anthropique due à l'augmentation de la fertilité du sol par l'utilisation de fumier ou de composts, qui contiennent également du manganèse issu de la décomposition de matières organiques. On constate qu'il existe une relation entre la matière organique et la teneur en manganèse, cette dernière augmentant dans les sols riches en matière organique.

✚ Nickel (Ni)

Les valeurs du nickel mesurées dans la parcelle (P1) oscillent entre 0.001 % et 0.002 % avant et après l'irrigation respectivement. Alors que dans la parcelle (P2), elles varient entre 0.002 % et 0.004 % avant et après l'irrigation. Dans la parcelle (P3), les concentrations sont de 0.001 % avant l'irrigation et de 0.003 % après l'irrigation. Par rapport à la parcelle témoin non irriguée, elle présente une moyenne de 0.001 % (Fig.71).

Ces résultats obtenus ne dépassent pas les normes admises par l'OMS (0.007 %) (WHO, 2003) et n'affecte pas sur les sols et le rendement des plantes. Cependant, on remarque une légère augmentation de la teneur en nickel avec l'augmentation de l'irrigation. À long terme, cela pourrait devenir un problème majeur pour l'accumulation de traces de nickel dans les sols.

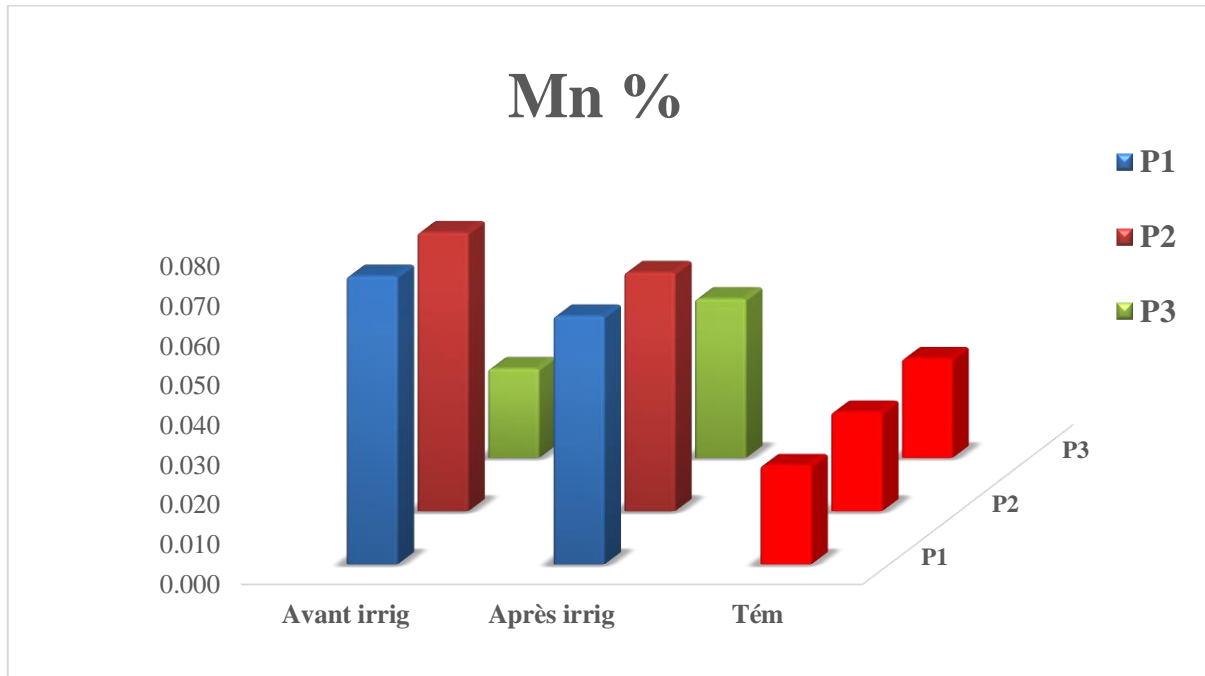


Figure 72. Variation de manganèse dans les sols du périmètre de K'sob avant et après irrigation.

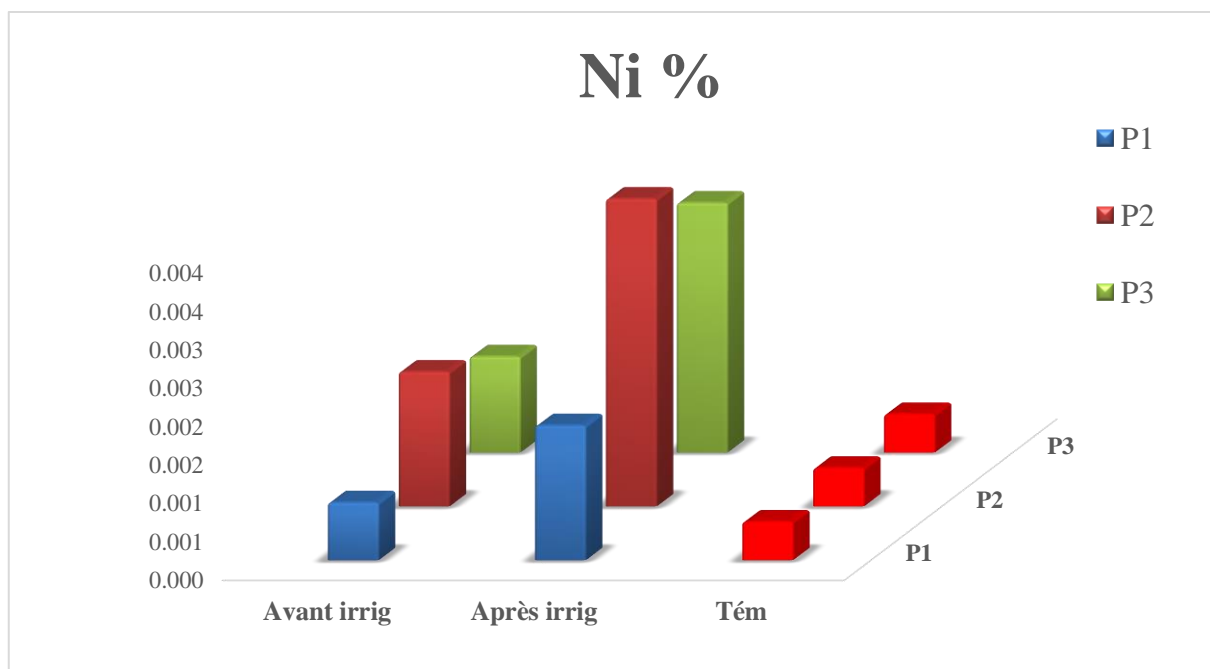


Figure 73. Variation du nickel dans les sols du périmètre de K'sob avant et après irrigation.

✚ Arsenic (As)

Les valeurs d'arsenic enregistrées montrent des concentrations oscillant entre 0.00024 % et 0.00062 % dans la parcelle (P1) avant et après irrigation. Dans la parcelle (P2), les valeurs varient de 0.00039 % à 0.00123 % avant et après irrigation. La parcelle (P3) présente des concentrations de 0.00022 % avant irrigation et de 0.00038 % après l'irrigation. D'autre part, la parcelle non irriguée (témoin) présente une moyenne de 0.00001 % (Fig.72).

Ces concentrations d'arsenic sont les plus faibles que les normes admises par l'OMS (0.002 %), mais elles risquent d'être augmenter dans notre région d'étude avec l'utilisation intensive de pesticides et d'herbicides et l'irrigation par des eaux souterraines contaminées par une source d'arsenic ou par des eaux de surface polluées par des rejets domestiques ou industriels dans la région de K'sob. Les traces d'arsenic dans les eaux ou dans le sol peuvent provoquer des problèmes de santé chez les humains en raison de la présence de cet élément dans les aliments cultivés sur les sols contaminés (C. Su, 2014).

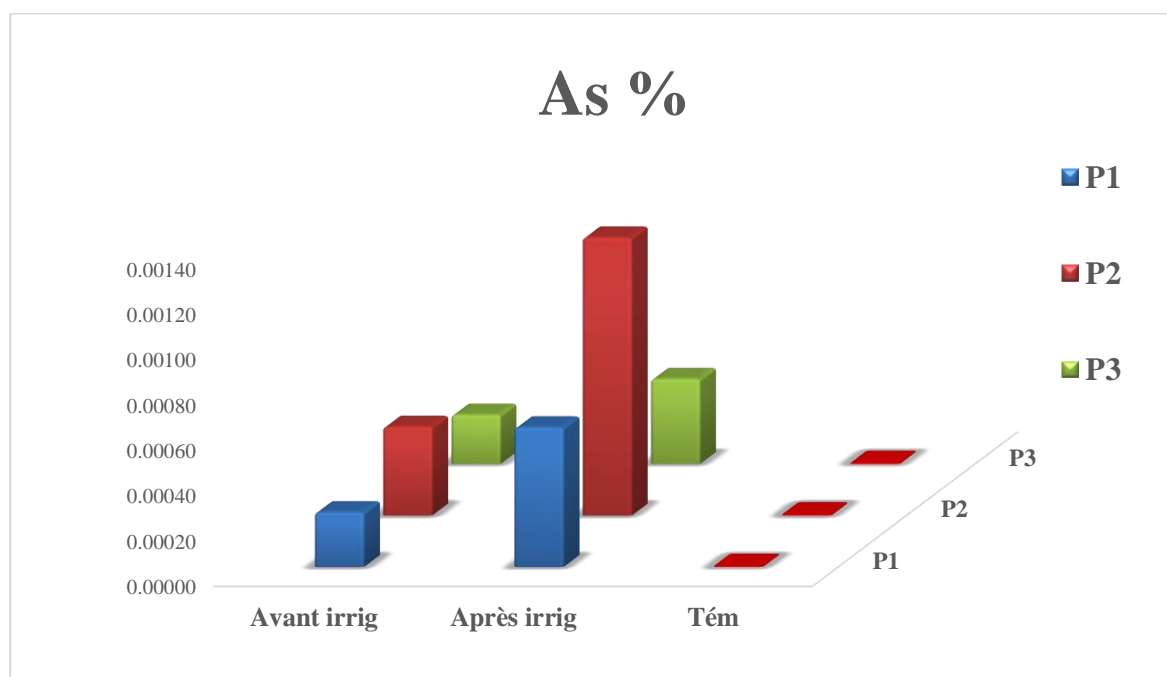


Figure 74. Variation d'arsenic dans les sols du périmètre de K'sob avant et après irrigation.

✚ Scandium (Sc)

Les résultats obtenus pour les tenures de scandium présentent des valeurs pour la parcelle (P1) oscillant entre 0.17 % avant l'irrigation et 0.18 % après l'irrigation. La parcelle (P2) présente des concentrations variant entre 0.22 % avant l'irrigation et 0.15 % après l'irrigation. La parcelle (P3) donne des valeurs de 0.28 % et de 0.16 % avant et après l'irrigation

respectivement. De même, la parcelle non irriguée (témoin) affiche une moyenne de 0.17 % (Fig. 73).

En absence de normes internationales pour le taux de scandium, on observe des concentrations remarquables de cet élément dans les sols, qui sont riches en scandium. En particulier, l'érosion des roches ou l'accumulation du scandium dans les matières organiques ou les argiles peuvent être liées à la présence de cet élément dans notre zone d'étude. Leur présence dans la croûte terrestre est liée aux roches ignées, en particulier aux roches alcalines ignées.

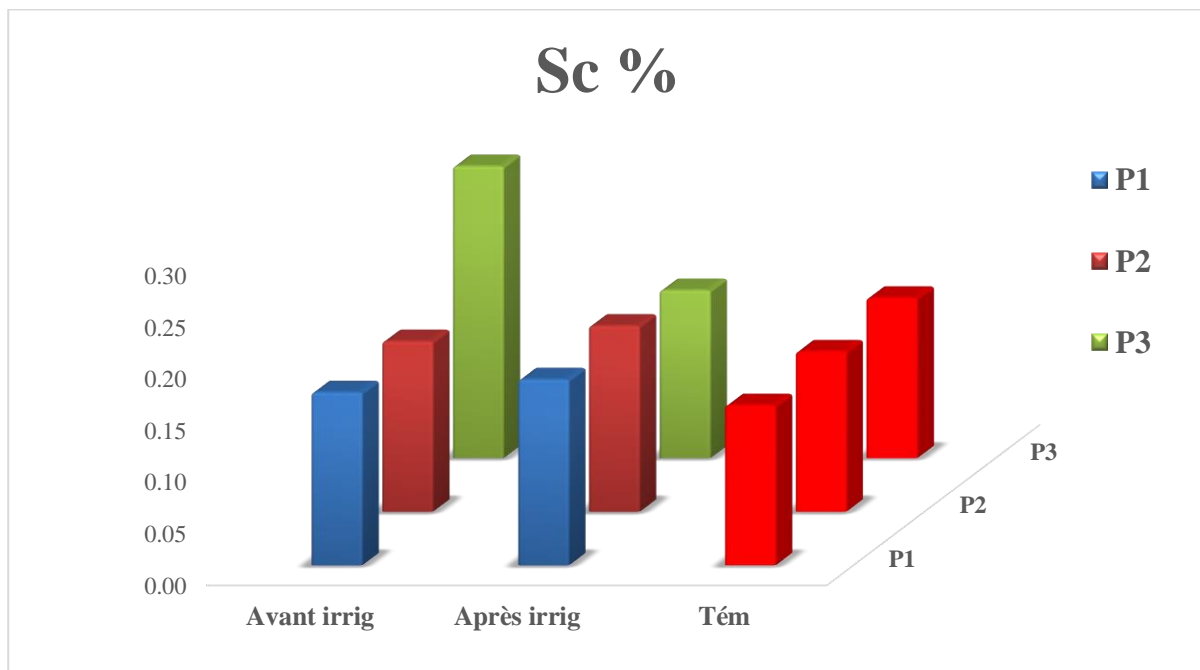


Figure 75. Variation de scandium dans les sols du périmètre de K'sob avant et après irrigation.

✚ Strontium (Sr)

Les teneurs en strontium relevées dans cette étude montrent que la parcelle P1 présente des valeurs comprises entre 0.07 % et 0.13 % avant et après l'irrigation, tandis que la parcelle P2 présente des valeurs oscillant entre 0.14 % et 0.12 % avant et après l'irrigation. Dans la parcelle (P3), les concentrations sont de 0.13 % avant l'irrigation et de 0.16 % après l'irrigation. En comparaison, la parcelle non irriguée (témoin) présente une moyenne de 0.07 % (Fig. 74).

Cet élément est alcalino-terreux comme le calcium, présent dans notre région d'étude sous forme de sels minéraux dont les concentrations observées sont élevées dans les parcelles irriguées, mais pas dans les parcelles non irriguées. L'irrigation joue donc un rôle important avec le temps dans l'altération des gisements de minéraux riches en strontium.

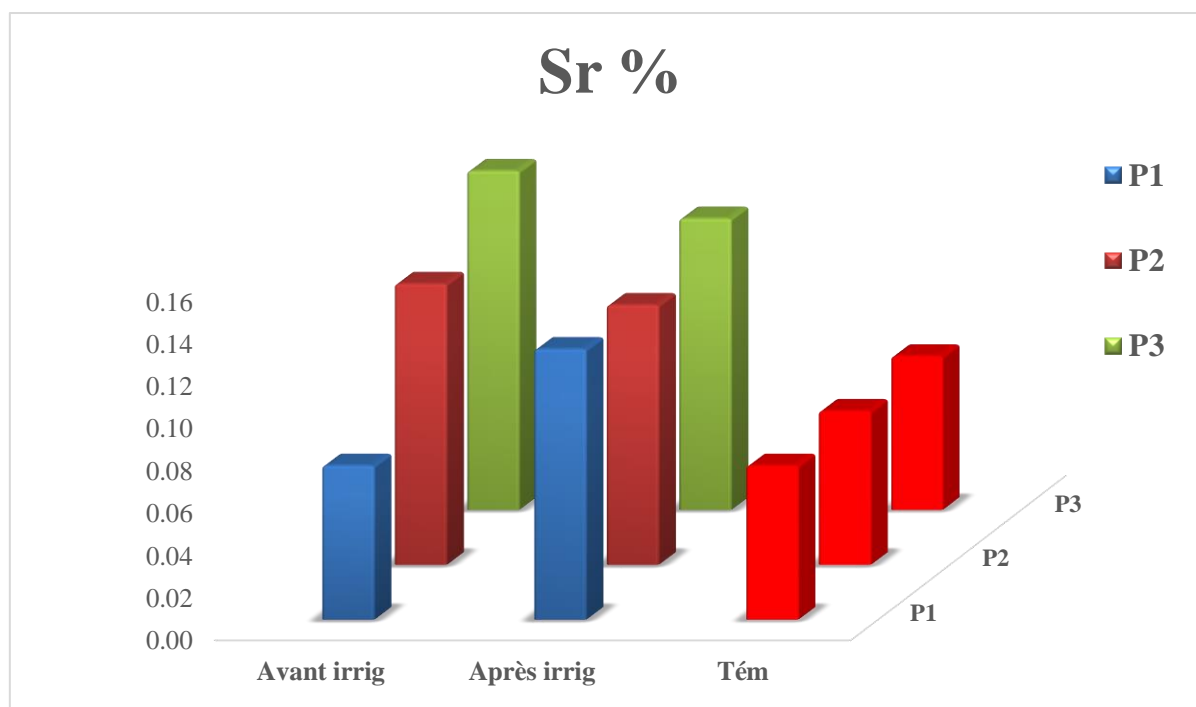


Figure 76. Variation de strontium dans les sols du périmètre de K'sob avant et après irrigation.

✚ Cobalt (Co)

Les valeurs du cobalt mesurées dans la parcelle (P1) varient entre 0.003 % et 0.002 % avant et après l'irrigation. Ainsi, on constate le même résultat dans la parcelle (P2), soit 0.002 % avant et après l'irrigation. Dans la parcelle (P3), les concentrations sont de 0.003 % avant l'irrigation et de 0.002 % après l'irrigation. La parcelle témoin non irriguée présente quant à elle une moyenne de 0.002 %. Ces résultats obtenus dépassent les normes admises par l'OMS (0.001 %) (WHO, 2003) (Fig.75). En outre, on remarque une diminution des concentrations de cobalt dans le sol après l'irrigation, car le cobalt est présent sous forme de cations métalliques solubles, associés à d'autres métaux comme le cuivre et le nickel, et plus disponibles pour les plantes dans les sols alcalins.

Les taux élevés de ces métaux dans notre région peuvent s'expliquer par la présence de dépôts minéraux riches en cobalt, par la nature des sols argileux riches en matière organique ou par les rejets de l'exploitation minière et de l'industrie métallurgique dans la région de BBA.

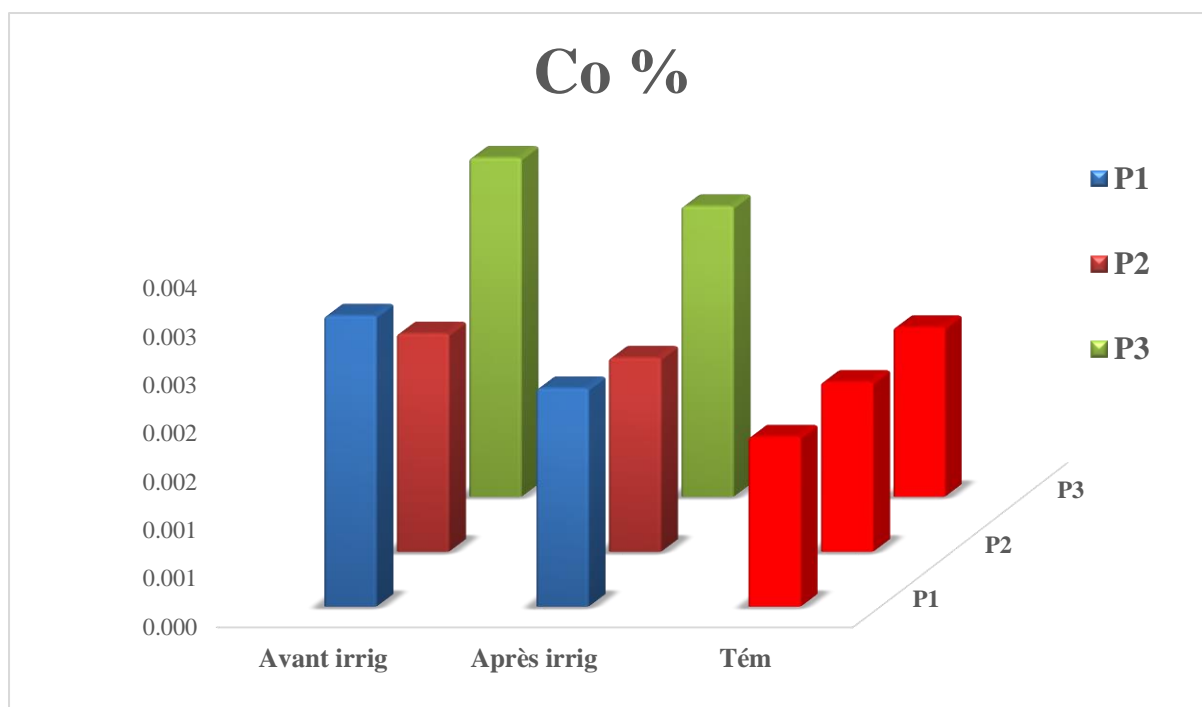


Figure 77. Variation du cobalt dans les sols du périmètre de K'sob avant et après irrigation.

4. Analyse statistiques des données des sols.

L'analyse statistique des variables des sols a été réalisée afin de décrire la relation entre les paramètres des sols avant et après l'irrigation. L'analyse de ces caractéristiques et la génération des graphes ont été effectuées à l'aide du logiciel statistique (R). L'étude statistique appliquée est la statistique descriptive (Box-plot), l'analyse en composantes principales (ACP) et la classification hiérarchique sur composantes principales (CAH). Les variables sélectionnés pour l'étude sont (pH. CE. Sal. Ca^{+2} . K^{+} . C. MO. Mg^{+2} . Na^{+} . $P2O5$. Fe. Zn. Cu. Al. Ti. Sc. S. Sr. Mn. AS. Co. Ni).

4.1. Statistique descriptive

Les résultats des analyses statistiques descriptives des données du sol de la région de K'sob sont illustrées dans les figures (76. 77. et 78), où chaque figure présente des résultats quantitatifs descriptifs pour les paramètres étudiés avant et après l'irrigation.

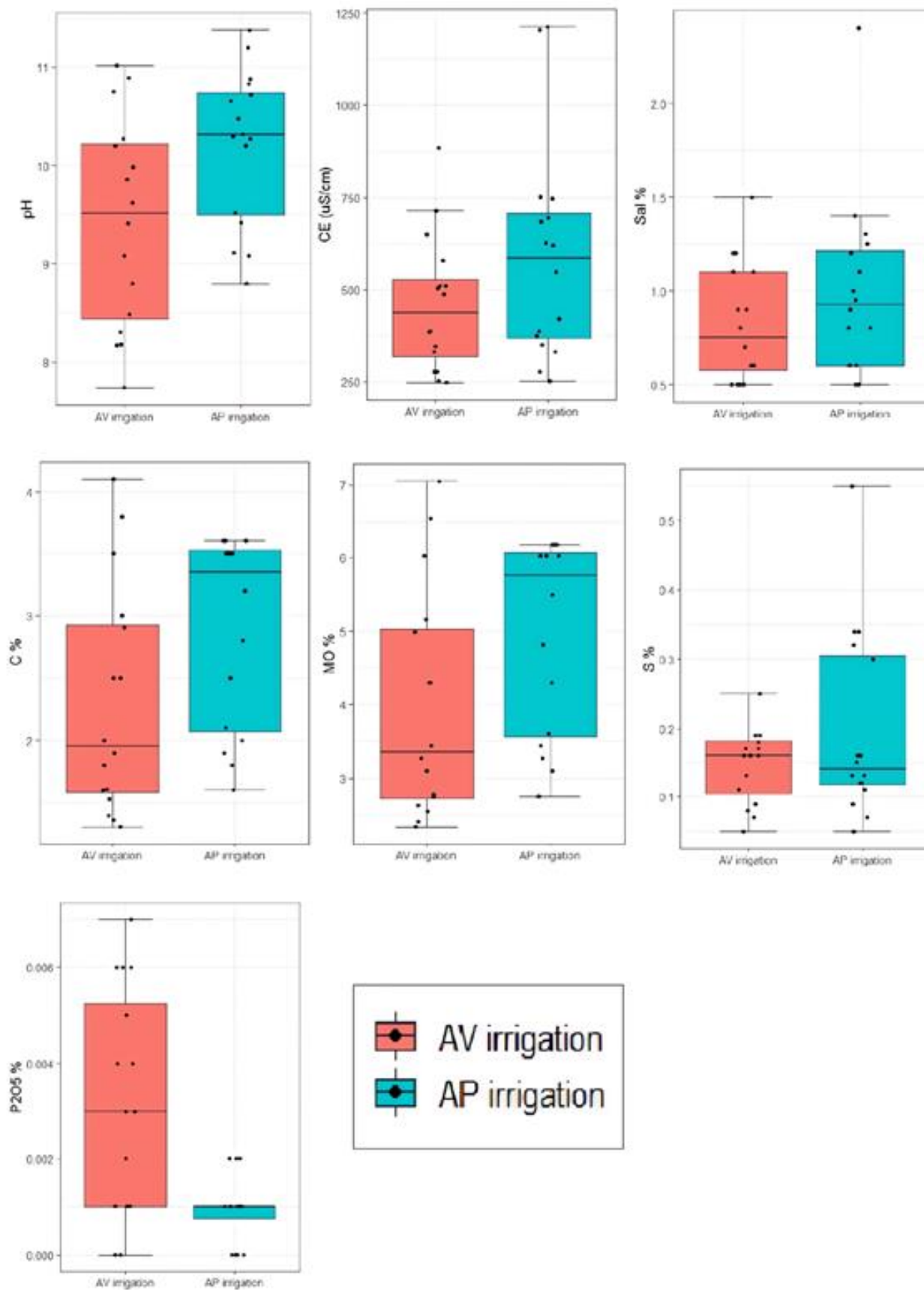


Figure 78. Paramètres physico-chimiques du sol avant et après irrigation.

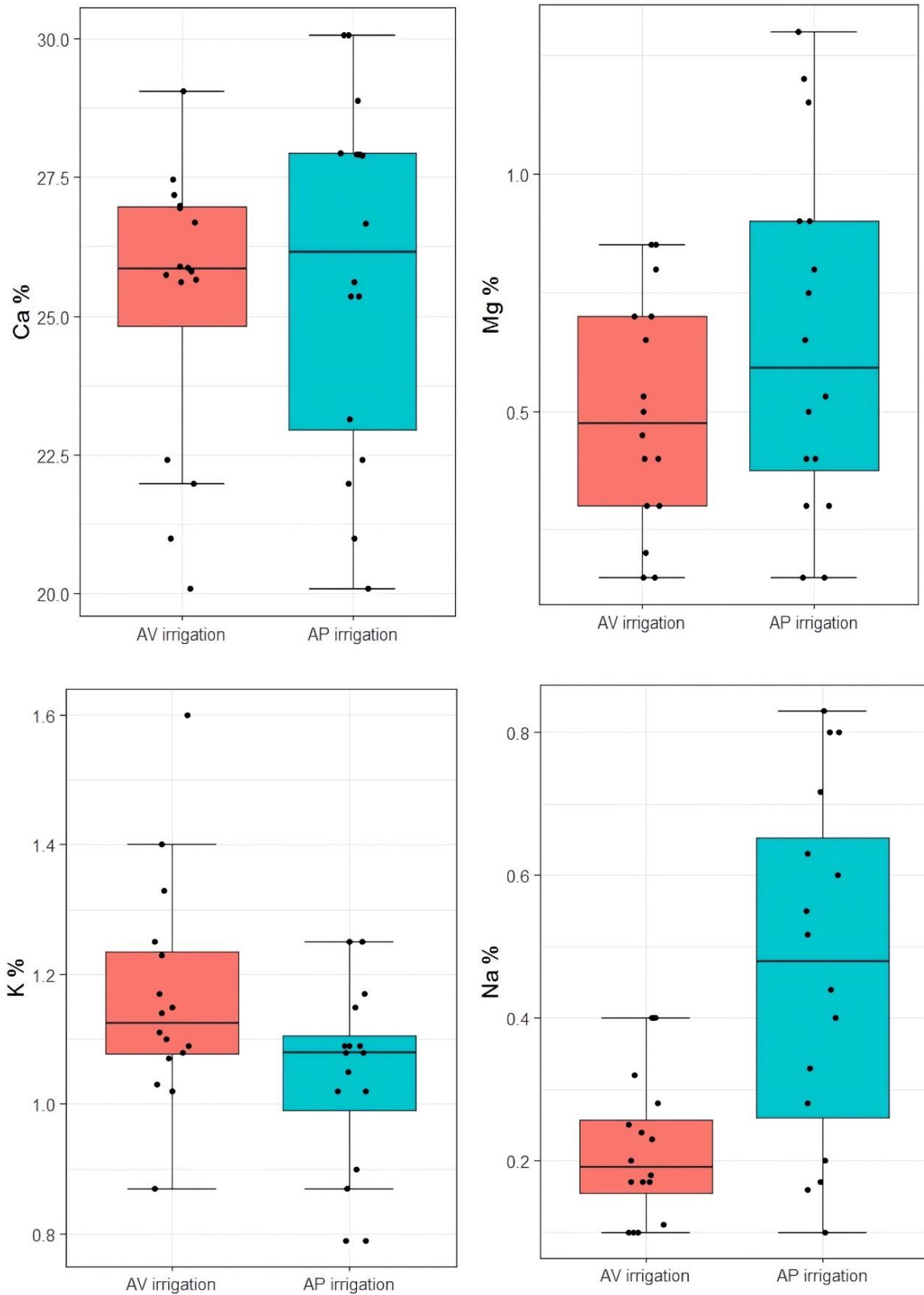


Figure 79. Bases échangeables du sol avant et après irrigation.

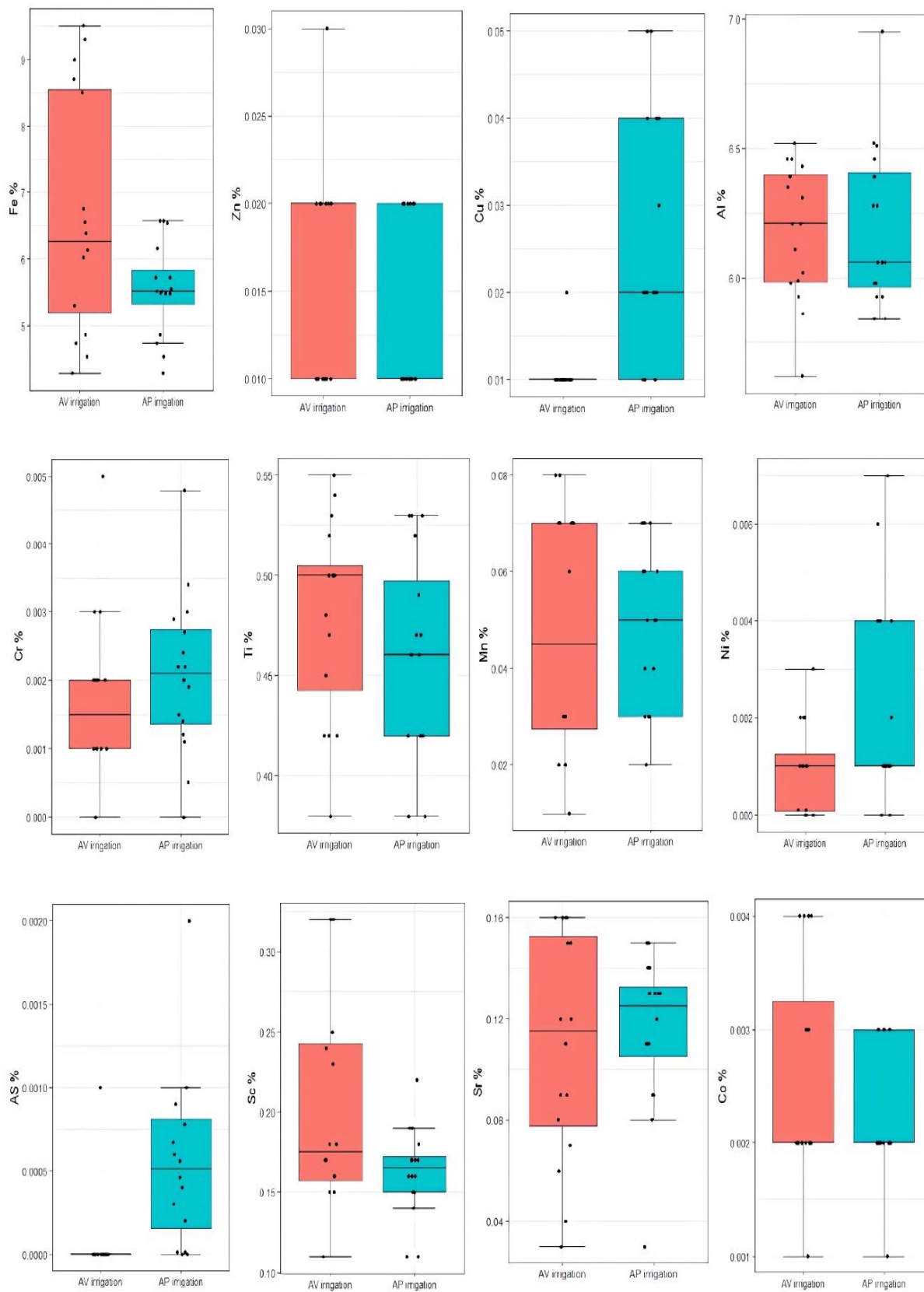


Figure 80. Eléments des traces métalliques (ETM) avant et après irrigation.

4.2. Analyse en composantes principales (ACP)

L'analyse factorielle des résultats obtenus (Tab. 36, Fig. 79) montre une valeur acceptable pour expliquer les caractéristiques des sols étudiés, où la variance cumulée est égale à 58.47 %.

Le premier facteur (F1) explique 26.42 % de la variance totale avec une valeur propre de 6.07. Le deuxième facteur (F2) explique 18.67 % de la variance totale avec une valeur propre de 4.29. Le troisième facteur (F3) exprime 13.37 % de la variance totale avec une valeur propre de 3.07.

Tableau 36. Composantes principales, valeurs propres et variance total pour le sol.

Parameters	Composant		
	F1	F2	F3
pH	0.405	0	-0.419
CE	0.639	0.164	-0.318
Sal	0.472	0.317	-0.373
Ca	0.804	0.058	0.033
K	-0.329	0.154	0.549
C	0.542	-0.600	0.397
MO	0.546	-0.593	0.392
Mg	0.345	0.110	0.186
Na	0.680	-0.550	-0.118
P2O5	0.139	0.391	0.591
Fe	0.336	0.807	-0.125
Zn	0.104	0.636	0.360
Cu	0.570	-0.093	0.033
Al	0.391	0.040	0.469
Cr	0.663	-0.160	0.270
Ti	0.425	0.577	0.600
Sc	0.175	0.634	-0.300
S	0.573	0.406	0.101
Sr	0.687	0.361	-0.385
Mn	0.508	-0.149	0.718
AS	0.724	-0.499	-0.091
Co	0.301	0.732	0.145
Ni	0.640	-0.157	-0.223
Valeur propre	6.078	4.296	3.076
Variance (%)	26.424	18.679	13.372
Cumulatif (%)	26.424	45.101	58.476

Le premier facteur (F1) est positivement corrélé aux éléments suivants : CE (0.639), calcium (0.804), carbone (0.542), MO (0.546), sodium (0.680), cuivre (0.570), chrome (0.663), soufre (0.573), strontium (0.687), manganèse (0.508), arsenic (0.724), nickel (0.640). Ce facteur ou cet axe peut être appelé «facteur de minéralisation». Il exprime la relation entre le facteur naturel et la salinisation des sols. Celle-ci est due à des processus géochimiques, comme la dissolution des minéraux du sous-sol par l'altération des roches sous l'impact des agents anthropiques.

Le deuxième facteur (F2) corrèle positivement avec le fer (0.807), le zinc (0.636), le titane (0.577), le scandium (0.634) et le cobalt (0.732) et corrèle négativement avec le carbone (-0.600), la MO (-0.593) et le sodium (-0.550). Ce facteur représente la relation entre le facteur anthropique et la contamination des sols par les éléments traces métalliques.

Le troisième facteur (F3) avait une corrélation positive avec le potassium (0.549), le phosphore total (0.591), le titane (0.600) et le manganèse (0.718). Cet axe ou ce facteur reflète le rôle d'un indicateur de la pollution agricole par l'application intensive d'engrais chimiques et de fumiers (S. Su et al., 2011).

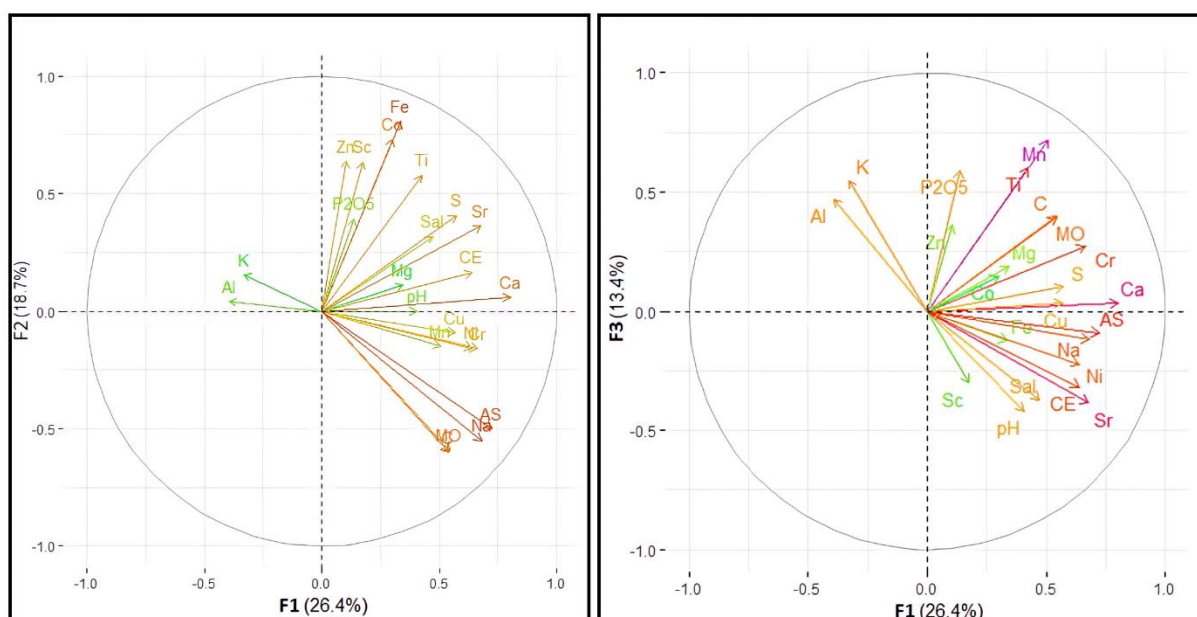


Figure 81. Corrélation des composantes principales des sols par la méthode de l'ACP.

4.3. Classification hiérarchique sur composantes principales des sols (CAH)

L'analyse de la classification hiérarchique CAH pour les parcelles étudiées est illustrée dans la (Fig. 80).

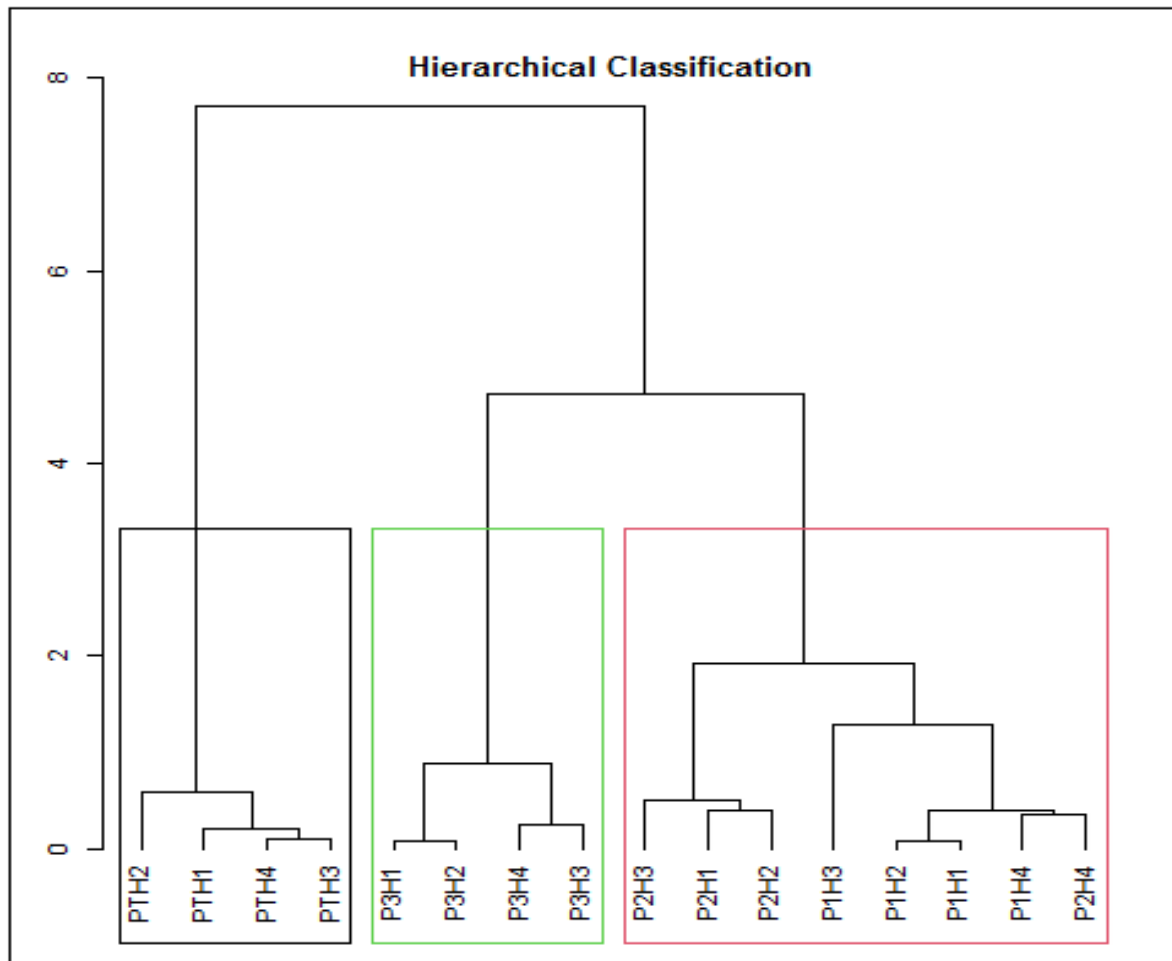


Figure 82. Dendrogramme de l'analyse hiérarchique montrant les groupes identifiés des sols.

Le dendrogramme indique trois groupes ou trois types de sols dans notre zone d'étude, répartis selon leur composition en éléments physico-chimiques et leur degré de contamination par les ETM.

Le groupe 1 montre une corrélation entre les différents horizons de la parcelle non irriguée témoin ($P_{\text{tém}}$). PTH2 sont corrélés avec PTH1. Le groupe (2) présente également une corrélation bien distincte entre les horizons de la parcelle P3H1. Le groupe (3) présente une corrélation bien distincte entre les horizons de la parcelle P3H1, P3H2 et P P3H4. Le groupe (3) représente une combinaison de corrélation entre les parcelles (1) et (2), où les différents horizons de ces parcelles sont bien corrélés entre eux.

L'utilisation des méthodes ACP et CAH pour l'analyse des paramètres des sols permet de connaître les groupes identiques de sols dans notre région, ainsi que les facteurs influant et déterminant la qualité de chaque groupe. À travers les résultats obtenus, on remarque que le facteur F1 influence le groupe (1). Cette relation explique la salinisation des sols et l'effet du facteur naturel lié à la géologie de la région. Par conséquent, les caractéristiques des sols de la

parcelle témoin ($P_{\text{tém}}$) résultent des facteurs naturels. Le facteur F2 influence le groupe (3), qui exprime l'effet du facteur anthropique sur la contamination des sols. Dans ce cas, les parcelles (P1) et (P2) sont contaminées par les métaux lourds. De même, le facteur F3 influence le groupe 2. Cette relation représente l'effet des polluants sur les terres agricoles. Le facteur de changement de caractère du sol dans la parcelle (P3) est l'utilisation et l'application intensive d'engrais chimiques et de fumiers.

Conclusion

Dans cette partie, l'étude des caractéristiques du sol dans le périmètre de K'sob avant et après irrigation montre que :

- ✓ L'analyse granulométrique dans notre région montre un type de sol avec une fraction dominante de limono-argileuse, mais aussi une fraction de limono-sableuse.
- ✓ Il présente une salinité élevée, un pH alcalin à très alcalin et une forte teneur en matière organique.
- ✓ Les résultats obtenus pour les bases échangeables montrent une forte concentration en calcium > 20 % et en potassium > 0.4 % et des valeurs modérées pour le magnésium et le sodium.
- ✓ Les concentrations en fer, cuivre, aluminium, manganèse et cobalt sont supérieures aux normes prescrites par l'OMS. D'autre part, les valeurs de zinc, chrome, titane, Nickel et arsenic restent dans les normes exigées.
- ✓ L'analyse statistique en utilisant les méthodes de l'ACP et de CAH montre que les sols peuvent être répartis en trois groupes ou types, et que chaque type est déterminé par un facteur (F). Chaque facteur influence et détermine les caractéristiques de chaque type de sol.

*Chapitre IV : Étude des effets
de la qualité des eaux
d'irrigation sur la culture et le
rendement de quelques
plantes cultivée dans la zone
d'étude*

Chapitre IV : Étude des effets de la qualité des eaux d'irrigation sur la culture et le rendement de quelques plantes cultivée dans la zone d'étude

Chapitre IV : Étude des effets de la qualité des eaux d'irrigation sur la culture et le rendement de quelques plantes cultivée dans la zone d'étude

1. Introduction

Avec l'augmentation et la croissance démographique actuelle en Algérie et dans la région méditerranéenne en général, les besoins en agriculture ont augmenté très rapidement ces dernières années pour assurer la sécurité alimentaire des populations. Dans la région de M'sila, le périmètre de K'sob a ainsi été transformé de l'arboriculture (abricotiers) à la culture des céréales et des légumes (fèves, ail, oignon, tomate, poivron). Cette transformation des cultures est liée aux besoins alimentaires des individus, ainsi qu'aux changements climatiques, à la modification des terres agricoles et à la qualité des eaux utilisées en irrigation. L'objectif de ce chapitre est basé sur l'étude et le choix de quelques plantes cultivées dans le périmètre de K'sob afin de donner une idée de l'effet de la qualité des eaux utilisées en irrigation et du rendement des cultures.

2. Méthodologie

2.1. Choix les sites des échantillonnages

Le choix des parcelles et le choix des plantes pour l'échantillonnage sont lié au choix et au prélèvement du sol. Chaque plante étudiée est donc associée à un prélèvement d'un échantillon de sol dans la même parcelle. Pour ce travail, nous avons choisi trois parcelles avec des plantes de types différents afin de mener à bien notre étude (Tab. 37).

Tableau 37. Site d'échantillonnage des plantes dans la zone d'étude.

Stations	Latitude	Longitude	Élévation (m)
P ₁	35°49'15.02"N	4°34'7.64"E	558
Plantes P ₂	35°46'53.80"N	4°33'19.99"E	521
P ₃	35°45'25.17"N	4°33'30.47"E	509

2.2. Choix des espèces végétales étudiées

Le choix des espèces végétales à utiliser pour notre travail et notre étude dépend de plusieurs conditions liées à la zone d'étude, telles que la nature du sol, le type d'eau d'irrigation (eau de surface ou souterraine) et la nature géologique de la région.

Chapitre IV : Étude des effets de la qualité des eaux d'irrigation sur la culture et le rendement de quelques plantes cultivées dans la zone d'étude

On a sélectionné trois types de plantes (fève, tomate et poivron) pour l'étude dans notre région:

- ✓ Pour l'étude de la fève, on a choisi la variété de fève de *Séville* à longue gousse. Cette variété se caractérise par des feuilles vertes et claires, une tige ferme, un contenant de 4 à 8 graines et une résistance à la gelée pendant les saisons froides. Elle possède également une longue saison de production.
- ✓ Pour la tomate, on a choisi la variété *Salimah*, considérée comme la meilleure variété en Algérie. Elle se caractérise par une grande résistance, une récolte précoce et une longue saison de production. Elle se caractérise par une tige à croissance indéterminée, par des fruits gros et ronds. Pour la culture de tomates dans notre région, l'agriculteur utilise un produit agricole qui réduit la salinité de l'eau (*Agriful Antisal*) pour éviter le problème de la salinité dans l'eau d'irrigation.
- ✓ Pour le poivron, on a choisi une variété locale appelée *Poivron d'Arabie*. Il est caractérisé par une tige courte, des feuilles vertes, de petits fruits et une récolte précoce sur une courte saison de production.

2.3. Description morphologique des plantes

2.3.1. Fève

La fève (*Vicia faba* L.) est une plante annuelle herbacée qui pousse dans plusieurs régions du monde. Sa hauteur peut parfois dépasser 180 cm. Elle est caractérisée par une tige simple et dressée, creuse et de section quadrangulaire (**Mezani, 2011**).

Ses feuilles sont vertes, claires, rondes et entières (**Mappa, 2010**). Elles ont deux folioles à la base de la tige. Elles ont la capacité d'absorber l'azote atmosphérique pour leurs besoins et leur cycle de croissance. Les fleurs sont de forme papilionacée, mesurant de deux à trois centimètres de longueur, et sont de couleur blanche, parfois marron ou violette. Chaque aile est recouverte d'une trace noire ou marron (**Duc, 1997**).

D'après (**Chaux & Foury, 1994**), la fève est allogame pour 40 à 60 % de sa floraison et les bourdons assurent principalement la pollinisation. Il faut donc faire attention aux produits de traitement utilisés lors de la floraison.

Les fruits se forment sur des gousses charnues, longues de 10 à 20 cm selon le type ou la variété de fève. Ils sont composés de 4 à 9 graines dans la phase jeune, puis leur couleur passe du vert au noir une fois mûrs (**Chaux & Foury, 1994**).

Chapitre IV : Étude des effets de la qualité des eaux d'irrigation sur la culture et le rendement de quelques plantes cultivée dans la zone d'étude

La fève est une plante adaptée au froid. Elle peut être plantée en hiver et consommée lorsqu'elle est verte, ou bien se formerait en gousse mature. Pour une récolte abondante, il est nécessaire de l'arroser, car elle est sensible au manque d'eau. En revanche, pour la qualité du sol, pas nécessaire. En revanche, des sols profonds et froids à faible acidité sont souhaitables.

2.3.2. Tomate

La tomate, cultivée comme plante, est une espèce de la famille des Solanacées (*Solanum lycopersicum*). Cette famille contient plusieurs espèces bien connues, telles que le poivron, la pomme de terre, le tabac et l'aubergine (**Van Dam et al., 2005**).

La tomate possède un appareil végétatif caractérisé par une tige rigide, pleine et anguleuse, qui dépasse 2 m de long. Les feuilles sont disposées en spirale sur la tige et mesurent entre 15 et 50 cm de long et entre 10 et 30 cm de large. Les folioles sont rondes avec des extrémités obliques et recouvertes de poils glanduleux. Parfois, les bases des grandes folioles sont pincées. L'inflorescence est une grappe de 6 à 12 fleurs. Le pétiole mesure entre 3 et 6 cm (**Shankara et al., 2005**).

(**Van Dam et al., 2005**) ont décrit les fleurs de la tomate comme étant des fleurs hermaphrodites de 1.5 à 2 cm de diamètre, avec 6 pétales jaunes mesurant 1 cm de longueur. L'ovaire compte entre 2 et 9 carpelles. D'une manière générale, la plante est autogame, mais une fécondation croisée peut se produire.

Le fruit de la tomate prend la forme de baies charnues et rondes, de mesures 2 à 15 cm au stade précoce de la croissance. La taille du fruit varie en fonction de la variété de tomate et des conditions de culture. La couleur des fruits varie du jaune au rouge en passant par l'orange. Les graines du fruit de la tomate sont de forme rein ou poire. Elles sont nombreuses et sont enveloppées d'une couleur beige, et mesurent de 3 à 5 mm et de 2 à 4 mm de large (**Gallais & Bannerot, 1992**).

Le système racinaire de la tomate est très développé par rapport aux autres espèces. Elle présente une racine principale puissante qui dépasse 50 cm de profondeur et les autres racines forment une ramification dense et active sur les premières couches du sol (**Chaux & Foury, 1994**).

La tomate, comme légume, est devenue un produit plus consommable dans le monde entier, car elle est riche en eau et contient des antioxydants, indispensables au corps humain, et c'est aussi un aliment important pour l'être humain.

Chapitre IV : Étude des effets de la qualité des eaux d'irrigation sur la culture et le rendement de quelques plantes cultivée dans la zone d'étude

2.3.3. Poivron

Le poivron fait partie de la famille des solanacées (*Capsicum sp*). Il a été découvert pour la première fois en Amérique du Sud et en Amérique centrale. Il est présent dans le monde entier, surtout dans les régions tropicales et subtropicales (**Pochard et al., 1992**).

Le poivron se caractérise par une tige de hauteur comprise entre 40 et 50 cm au maximum, avec des feuilles alternes, lancéolées et vert brillant. Il possède aussi de nombreuses fleurs de petite taille de couleur blanche. Le fruit du poivron se forme en baie ; sa pulpe étant très petite, elle forme une sorte de capsule volumineuse portant plusieurs grains.

La culture du poivron exige des conditions favorables, comme un sol bien drainé et riche en matière organique, un pH modéré et une irrigation permanente dans les régions où le sol est sableux.

2.4. Méthodes du suivi

Pour le suivi des plantes choisies, trois échantillons représentatifs ont été sélectionnés dans chaque parcelle étudiée. Bien sûr, elles sont irriguées par les eaux de Oued K'sob. Un seul échantillon a été irrigué par l'eau traitée pour comparer les résultats après la récolte (Fig. 81).

La période de suivi s'est déroulée entre 2020 et 2021 (Tab. 38). Les paramètres de suivi ont été basés sur les paramètres morphométriques, tels que la vitesse de croissance de la plante, la hauteur finale, la longueur finale des racines et le diamètre de la tige, ou encore le nombre moyen de fleurs et de fruits pour chaque plante.

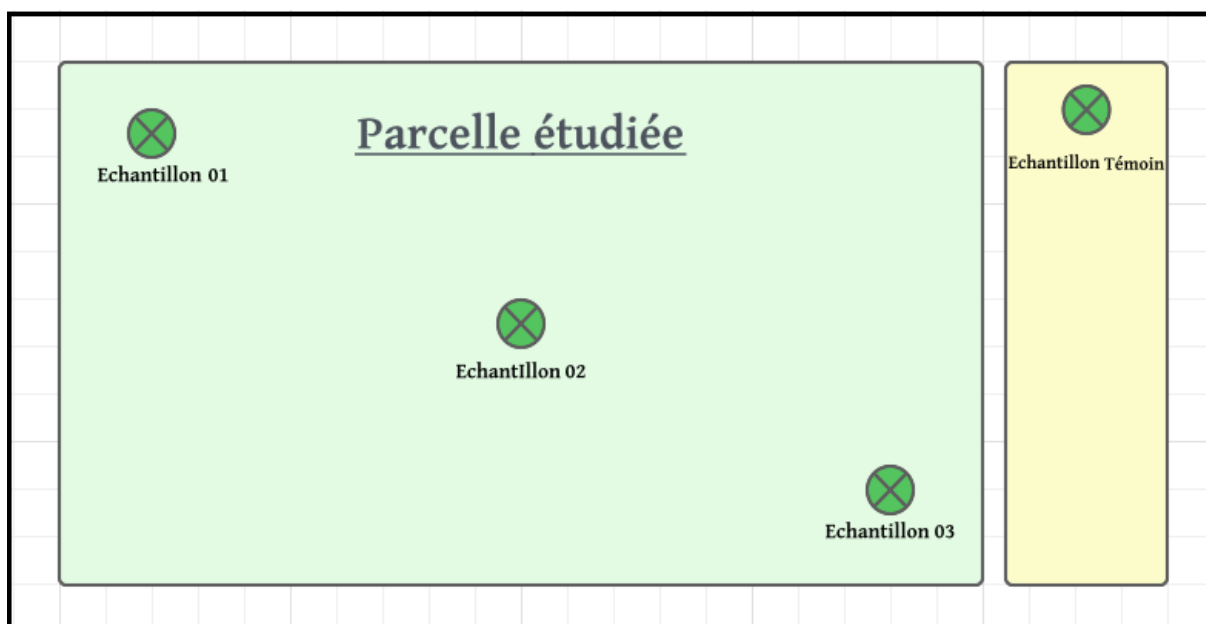


Figure 83. Distribution des échantillons choisis dans chaque parcelle étudiée.

Chapitre IV : Étude des effets de la qualité des eaux d'irrigation sur la culture et le rendement de quelques plantes cultivée dans la zone d'étude

Tableau 38. Période du suivi pour les plantes choisies.

Type de plante	Date des plantations	Date des récoltes
Fève	Septembre 2020	Février 2021
Tomate	Février 2021	Fin de juin 2021
Poivron	Avril 2021	Fin de juin 2021

3. Résultats et interprétations

3.1. Fève

3.1.1. Vitesse de croissance de la plante

Les résultats obtenus montrent la variation de la vitesse de croissance de chaque échantillon de fève à chaque étape de plantation, mesurée en cm par jour allant sur une période de suivi de 90 jours (Fig. 82).

La vitesse de croissance des échantillons (01 et 02) reste relativement lente tout au long des différentes étapes de la plantation. À chaque phase, ces deux échantillons présentent des résultats nettement inférieurs à ceux de l'échantillon témoin (Tém), qui se distingue par une croissance beaucoup plus rapide et régulière. D'autre part, l'échantillon témoin (Tém) affiche la meilleure croissance. Cette croissance lente pourrait être due à plusieurs facteurs, tels que la qualité de l'eau utilisée pour l'irrigation, la composition du sol, ou d'autres conditions environnementales spécifiques à ces deux échantillons. En revanche, l'échantillon 03 présente des résultats plus encourageants, avec une vitesse de croissance proche de celle observée chez l'échantillon témoin. Il montre tout de même une meilleure progression que les échantillons 01 et 02, ce qui suggère qu'il pourrait avoir bénéficié de conditions de culture légèrement plus favorables ou de meilleures capacités d'adaptation aux conditions existantes.

L'utilisation des eaux de Oued K'sob pour l'irrigation, une eau polluée et saline, a tendance de provoquer un stress hydrique chez les plantes. Les racines des plantes risquent d'avoir des difficultés à absorber l'eau du sol, entraînant une baisse du potentiel hydrique et oblige les plantes à utiliser plus d'énergie pour puiser l'eau dont elles ont besoin pour leur croissance. Cela se traduit par une vitesse de croissance ralentie, comme le cas pour les échantillons 01 et 02, dont la croissance est restée lente à tous les stades de plantation (Saeed, & El-Nadi, 1997).

Chapitre IV : Étude des effets de la qualité des eaux d'irrigation sur la culture et le rendement de quelques plantes cultivée dans la zone d'étude

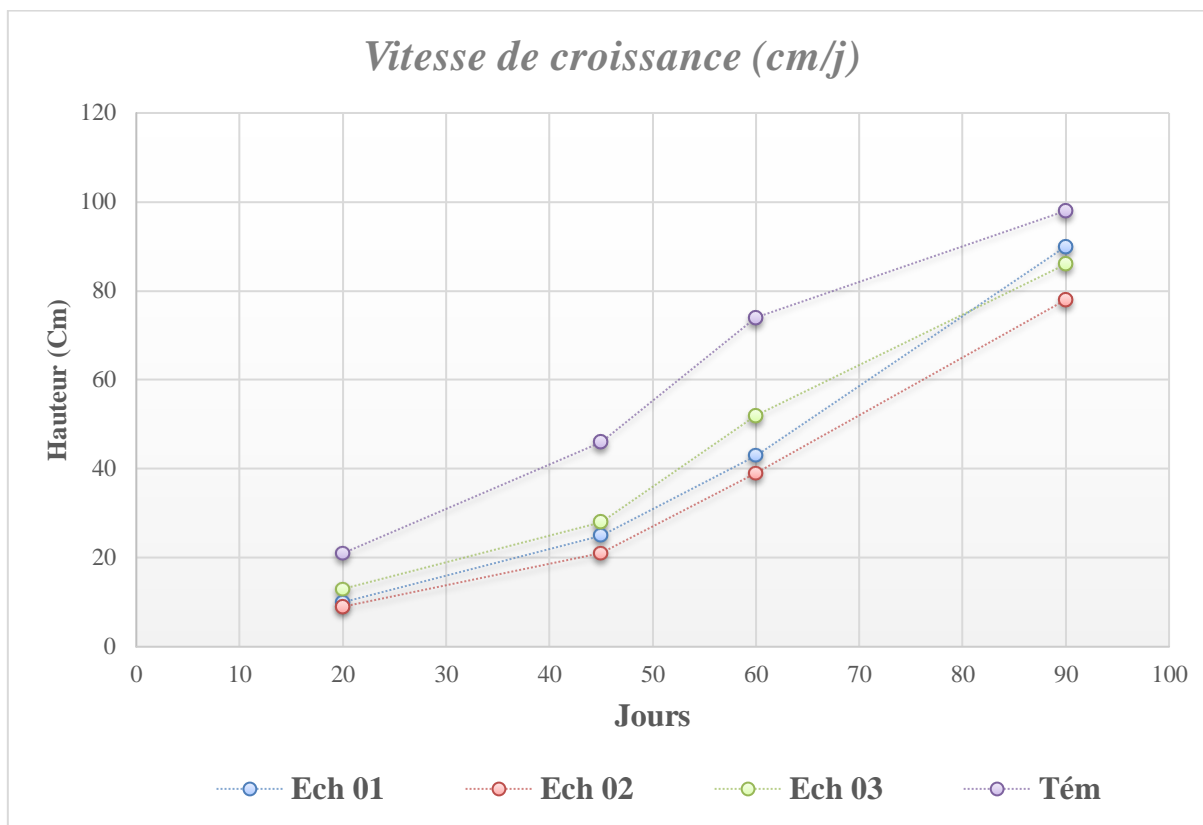


Figure 84. Vitesse de croissance de fève.

3.1.2. Hauteur final de la plante

La figure 83 présente de manière détaillée les résultats concernant la hauteur finale des plantes de fève pour l'ensemble des échantillons observés au cours de l'étude. Pour l'échantillon (01), la hauteur mesurée atteint 110 cm, ce qui représente la plus faible croissance parmi les échantillons étudiés. L'échantillon (02) montre une légère augmentation, atteignant une hauteur de 118 cm. Quant à l'échantillon (03), il présente la hauteur la plus importante avec une valeur mesurée de 127 cm. Enfin, l'échantillon témoin (Tém), utilisé comme point de référence dans cette étude, affiche la plus grande hauteur avec une mesure de 145 cm, indiquant une meilleure croissance que celle observée dans les autres échantillons. Ces variations de hauteur entre les différents échantillons pourraient s'expliquer par des différences dans les conditions de croissance, l'effet de l'irrigation sur le sol, l'apport en nutriments ou encore l'exposition à la lumière.

Certains des échantillons, comme Ech 01 (110 cm) ou Ech 02 (118 cm), ont été irrigués avec de l'eau polluée et saline contenant des produits chimiques. Cela pourrait justifier la croissance plus limitée observée chez ces plantes. En effet, l'eau saline aurait pu provoquer un stress

Chapitre IV : Étude des effets de la qualité des eaux d'irrigation sur la culture et le rendement de quelques plantes cultivée dans la zone d'étude

osmotique, rendant l'absorption d'eau plus difficile pour les plantes, et par conséquent entraînant une absorption inefficace des nutriments et un développement compromis (Kabir et al., 2021).

D'autre part, la faible disponibilité en eau utilisable et l'accumulation de sels toxiques dans les tissus végétaux auraient conduit à une réduction de la photosynthèse et, par conséquent, à une croissance moins prononcée par rapport à l'échantillon témoin (145 cm), qui aurait pu bénéficier d'une eau de meilleure qualité (eau traité).

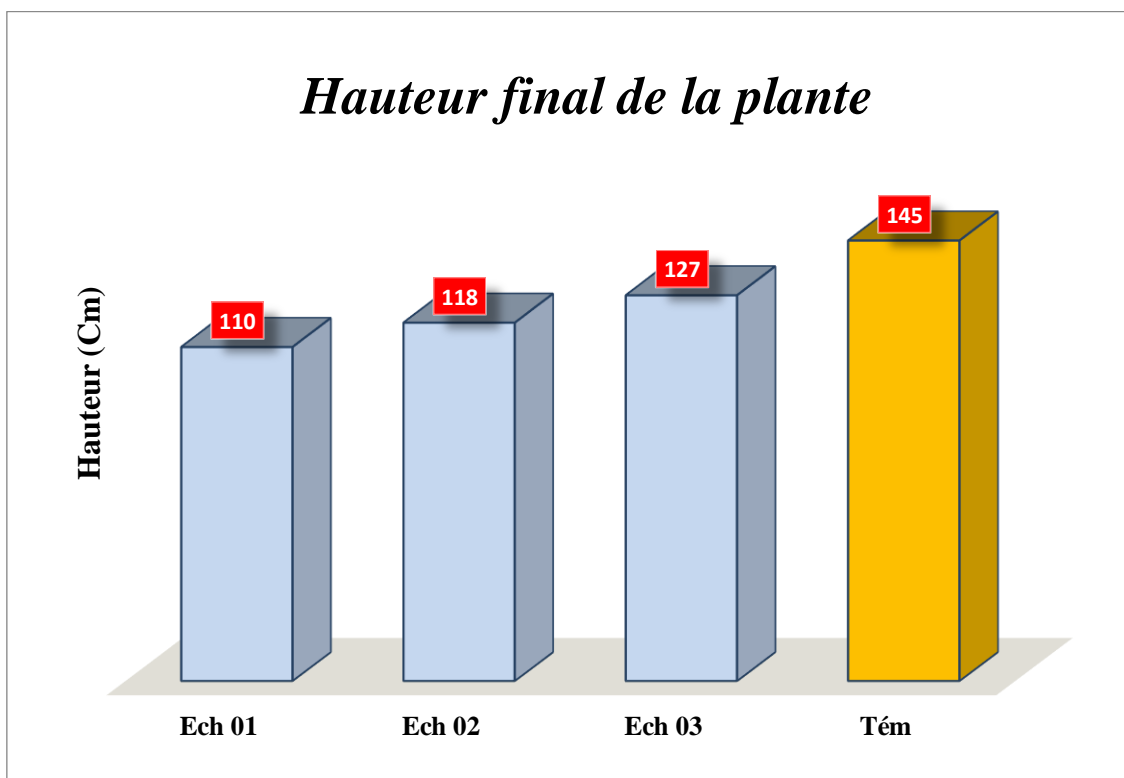


Figure 85. Hauteur final de la plante de fève.

3.1.3. Longueur final des racines de la plante

La longueur des racines est en effet un facteur important pour la croissance des plantes, car elle joue un rôle fondamental dans l'absorption de l'eau et des éléments essentiels nécessaires à la plante, ainsi que dans sa stabilité et sa fixation dans le sol.

La figure 83 illustre les mesures finales de la longueur des racines de la fève pour chacun des échantillons étudiés. Les résultats révèlent des différences significatives entre les échantillons, l'échantillon (Ech 01) présente une longueur finale des racines de 28 cm, tandis que l'échantillon (Ech 02) montre une longueur légèrement supérieure de 36 cm. De même, l'échantillon (Ech 03) affiche une longueur des racines de 32 cm. En parallèle, il est important de noter que les racines de l'échantillon témoin (Tém) mesurent 38 cm, ce qui constitue la plus

Chapitre IV : Étude des effets de la qualité des eaux d'irrigation sur la culture et le rendement de quelques plantes cultivées dans la zone d'étude

grande longueur observée dans cette série d'expériences. Ces résultats permettent d'établir des comparaisons claires entre les différents échantillons étudiés, montrant l'impact potentiel des traitements appliqués sur la croissance des racines. Ainsi, ces résultats similaires à ceux de la longueur des racines de la plante de fève entre tous les échantillons choisis sont liés aux caractéristiques du sol (sols argileux) et l'eau saline utilisée pour l'irrigation qui limitent l'allongement des racines pour la plante (Min et al., 2014).

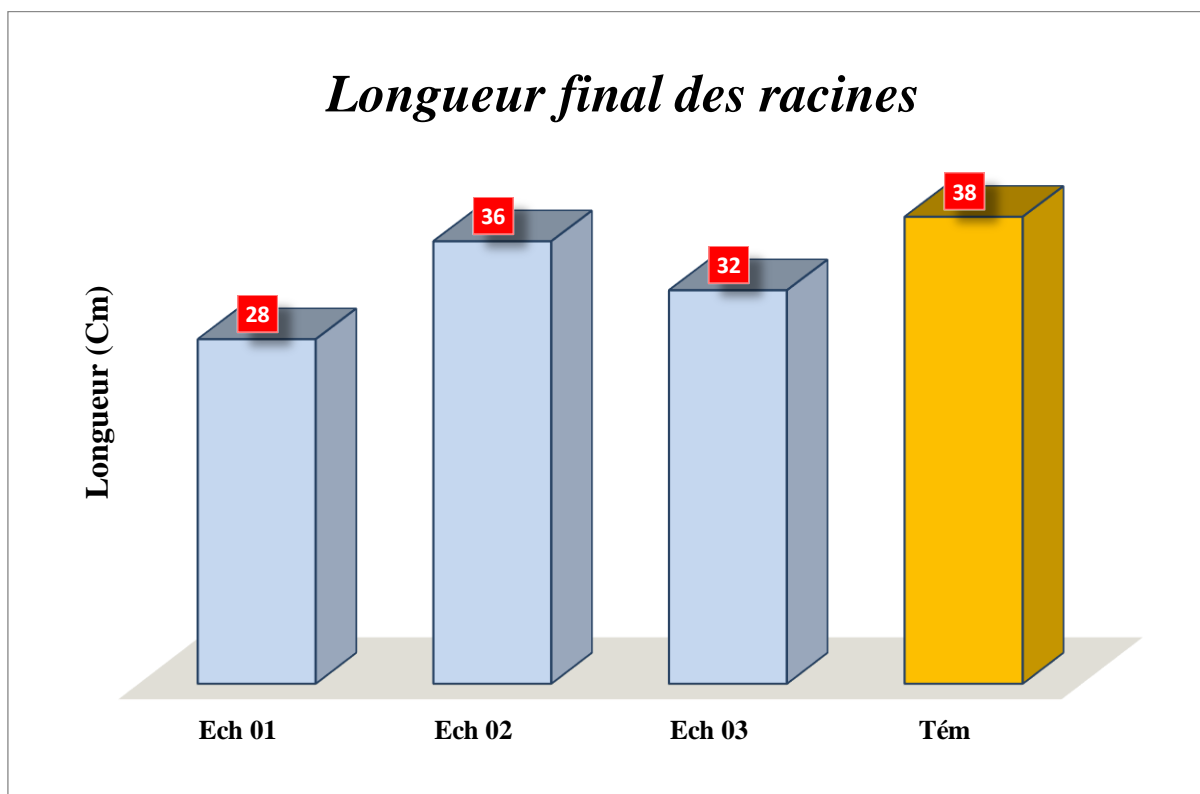


Figure 86. Longueur final des racines de la plante de fève.

3.1.4. Nombre moyen de fleurs par plante

L'inflorescence est considérée comme le stade le plus important du cycle de vie des plantes. Pour la fève, l'inflorescence commence après 55 jours, selon la variété cultivée (précoce ou tardive) (Chaux & Foury, 1994). Dans la présente étude, nous avons estimé le nombre moyen de fleurs par plante de fève en comptant à partir de l'apparition de la première fleur dans la plante jusqu'à la récolte.

La figure (Fig. 85) montre le nombre moyen de fleurs par plante de fève dans tous les échantillons étudiés. Pour l'échantillon (Ech 01), le nombre moyen de fleurs est estimé à 24 fleurs. Pour l'échantillon (Ech 02), il est de 29 fleurs. Alors pour l'échantillon (Ech 03), il est

Chapitre IV : Étude des effets de la qualité des eaux d'irrigation sur la culture et le rendement de quelques plantes cultivées dans la zone d'étude

également de 35 fleurs. En outre, l'échantillon témoin (Tém) présente un nombre moyen de 37 fleurs.

On constate que tous les échantillons choisis ont un rythme de floraison similaire et un nombre moyen de fleurs presque identique. Cela est dû à la disponibilité des éléments essentiels pour la floraison de la fève dans les sols de notre région d'étude, tels que le phosphore et le potassium (Kotaix et al., 2022).

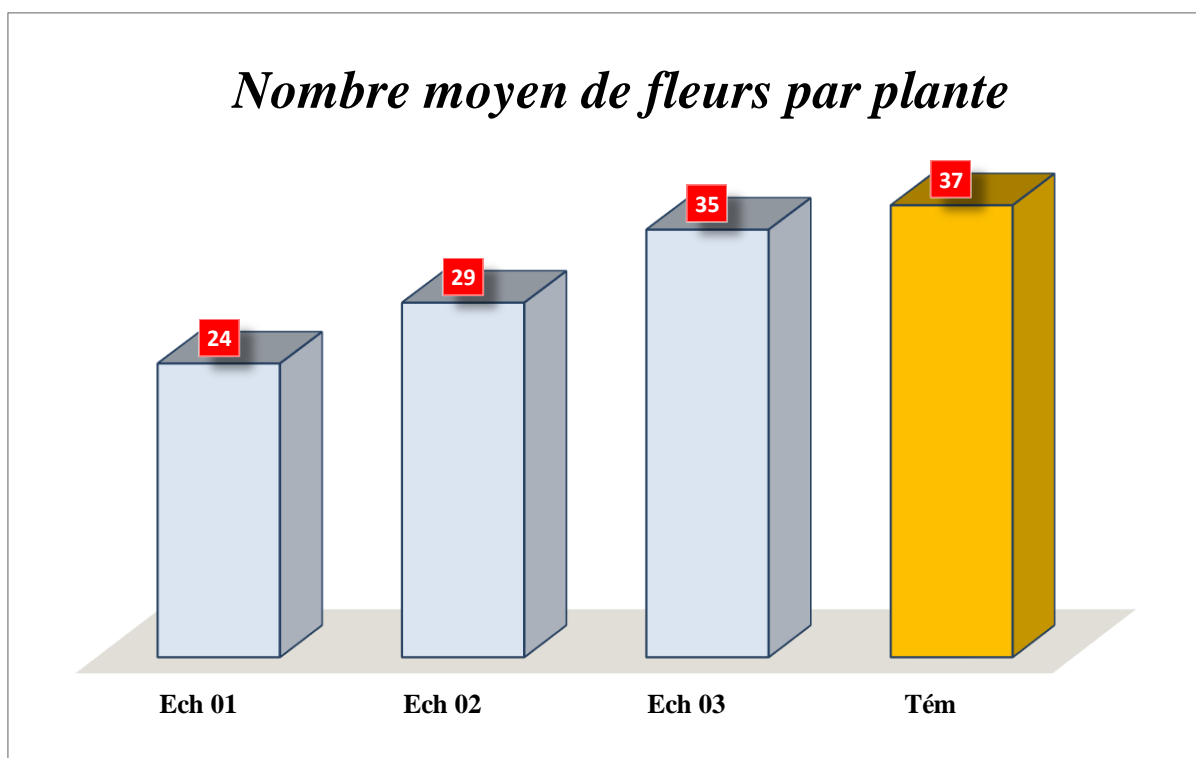


Figure 87. Nombre moyen de fleurs par plante de fève.

3.1.5. Nombre moyen de fruits par plante

Le fruit de la plante de fève se forme et apparaît sous la forme de gousses contenant entre une et huit graines chacune. Le comptage du nombre de fruits pour chaque échantillon a été effectué durant la récolte.

La figure 85 présente les résultats du nombre moyen de fruits par plante de fève pour tous les échantillons étudiés. L'échantillon (Ech 01) présente en moyenne 15 gousses par plante, alors que l'échantillon (Ech 02) en contient 13. L'échantillon (Ech 03) affiche un nombre moyen de 22 gousses par plante. L'échantillon témoin (Tém), qui n'a probablement pas été exposé à des conditions d'eau polluée ou saline, atteint un rendement optimal de 25 gousses par plante.

D'après ces résultats, on remarque qu'il y a une légère différence entre le rendement de la plante de fève dans tous les échantillons étudiés et celui de l'échantillon témoin. Ces variations

Chapitre IV : Étude des effets de la qualité des eaux d'irrigation sur la culture et le rendement de quelques plantes cultivée dans la zone d'étude

soulignent l'impact potentiel de la qualité de l'eau sur la production de fruits, les échantillons ayant subi un stress hydrique ou salin produisant moins de gousses par plante comparé à l'échantillon témoin (Botían et al., 2005).

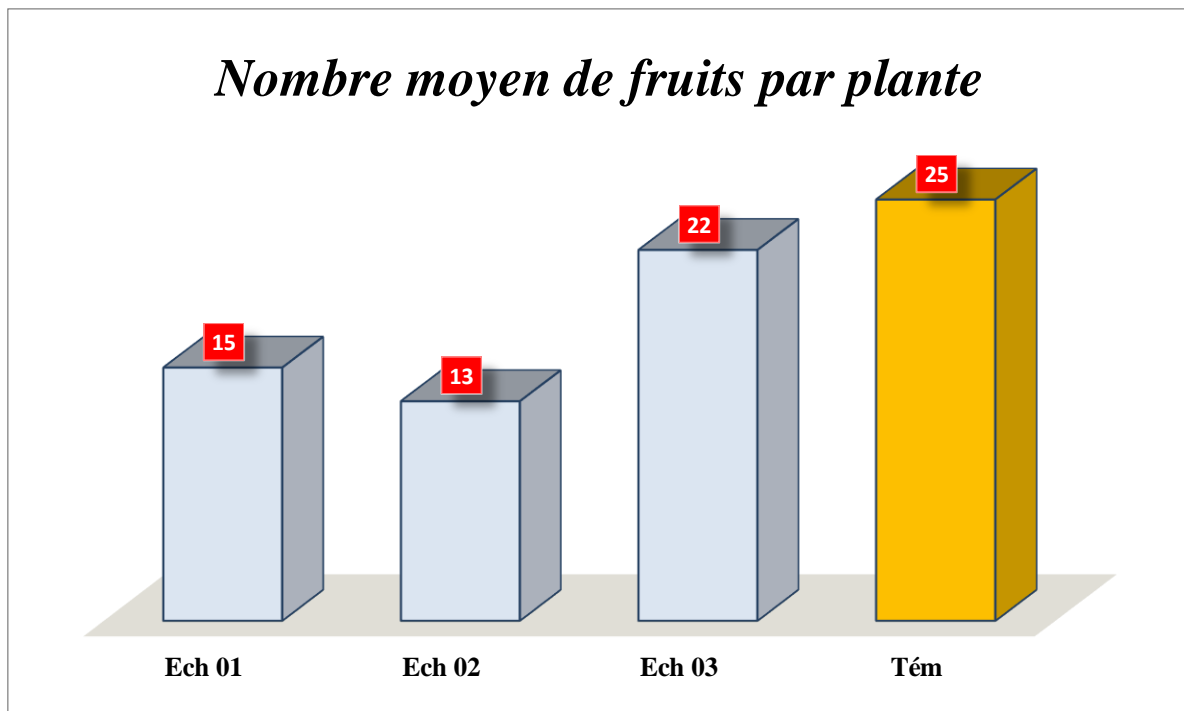


Figure 88. Nombre moyen de fruits par plante de fève.

3.2. Tomate

3.2.1. Vitesse de croissance de la plante

La vitesse de croissance des plantes de tomate varie en fonction de la variété et des conditions de culture, qu'il s'agisse de serres ou de plein champ. L'utilisation d'engrais peut également avoir un impact sur la croissance. Dans notre cas, le suivi de la culture de tomates se fait en plein champ.

La figure (Fig.87) illustre la vitesse de croissance, en cm par jour, des différents échantillons de tomates à chaque stade de plantation dans la parcelle étudiée. Les échantillons (1 et 2) présentent une vitesse de croissance moyenne à tous les stades de plantation par rapport à l'échantillon témoin. En revanche, l'échantillon (Ech 03) affiche des résultats de croissance plus faibles que les autres échantillons. Par ailleurs, l'échantillon témoin (Tém) affiche les meilleurs résultats de croissance à tous les stades de plantation.

L'eau saline augmente la concentration de sels dans le sol, ce qui crée un stress osmotique. Cela rend plus difficile pour les racines d'absorber l'eau nécessaire à la plante. Les sels tels que le sodium (Na) et le chlorure (Cl) peuvent s'accumuler dans les tissus de la plante et atteindre

Chapitre IV : Étude des effets de la qualité des eaux d'irrigation sur la culture et le rendement de quelques plantes cultivée dans la zone d'étude

des niveaux toxiques. Cette accumulation peut entraîner des dommages aux cellules et aux tissus végétaux, perturbant les fonctions métaboliques normales. En conséquence, la plante peut souffrir de déshydratation ce qui peut ralentir la croissance des racines, des tiges et des feuilles (Li et al., 2015).

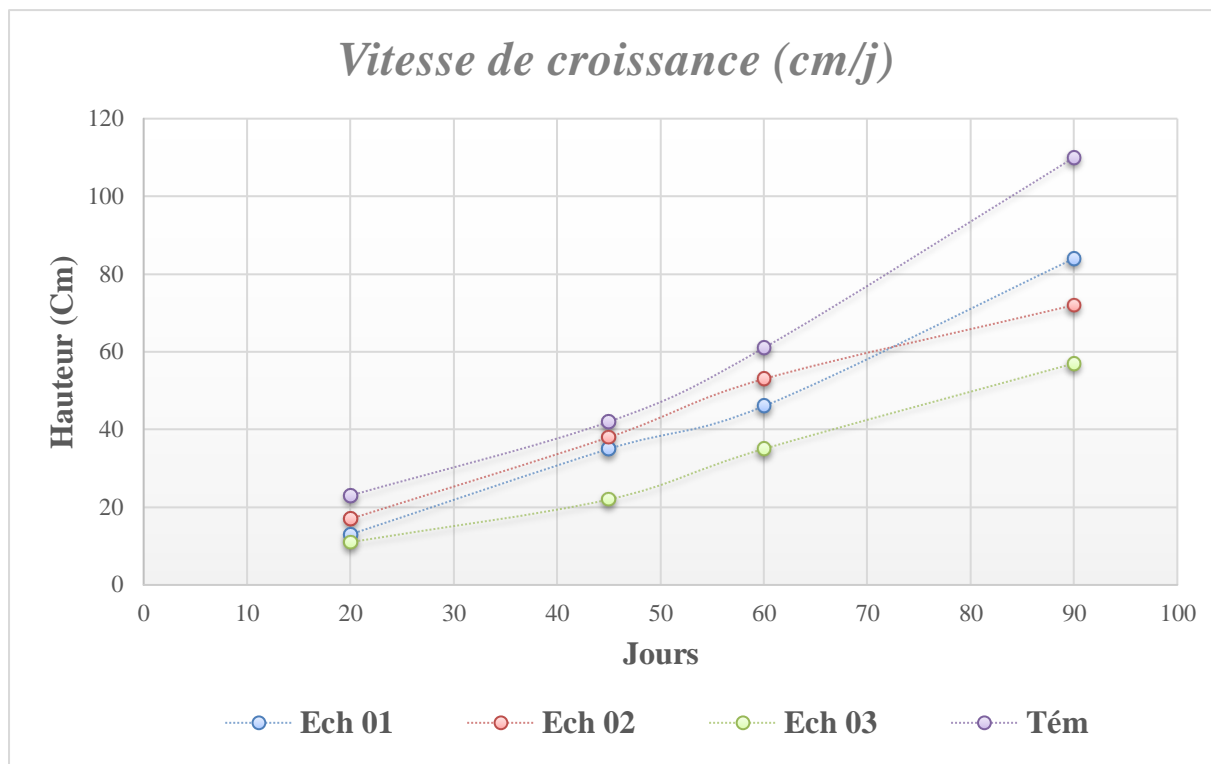


Figure 89. Vitesse de croissance de la tomate.

3.2.2. Hauteur final de la plante

L'analyse de la figure 88 fournit des informations détaillées sur la hauteur finale des tomates dans les différents échantillons étudiés. Les résultats montrent que l'échantillon témoin (Tém) se distingue nettement avec la hauteur la plus élevée, atteignant 195 cm. En revanche, les échantillons (Ech 01) et (Ech 02) présentent des hauteurs de croissance moindres, respectivement de 147 cm et 128 cm. Ces résultats indiquent que ces échantillons ont expérimenté des conditions légèrement moins favorables par rapport au témoin. L'échantillon (Ech 03) affiche la hauteur la plus faible parmi tous les échantillons, avec une mesure finale de seulement 94 cm.

La différence de hauteur entre les échantillons étudiés peut être attribuée au taux d'absorption des éléments nécessaires à la croissance dans chaque échantillon, en raison de l'accumulation de sels dans les racines de la plante. Bien que l'augmentation des maladies puisse être causée par l'humidité du sous-sol due à l'irrigation intensive (Garane et al., 2019).

Chapitre IV : Étude des effets de la qualité des eaux d'irrigation sur la culture et le rendement de quelques plantes cultivée dans la zone d'étude

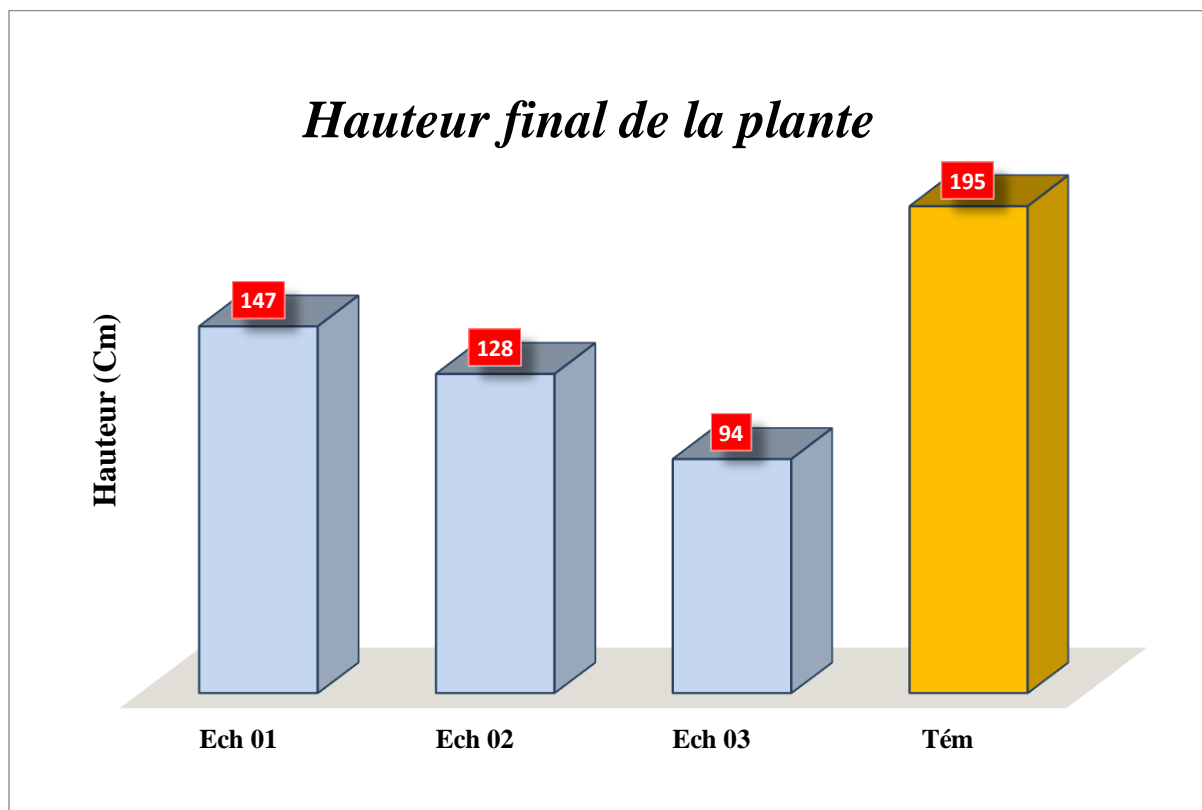


Figure 90. Hauteur final de la plante de tomate.

3.2.3. Longueur final des racines de la plante

Les racines de la plante de tomate sont sensibles aux facteurs externes tels que le climat et l'irrigation. Elles jouent un rôle essentiel dans l'absorption des éléments majeurs tels que l'azote (N), le phosphore (P), le potassium (K), le calcium (Ca) et le magnésium (Mg), ainsi que des éléments mineurs tels que le fer (Fe), le cuivre (Cu), le zinc (Zn), le bore (B) et le manganèse (Mn), pour leur besoin en croissance optimale (**Konfe et al., 2019**).

Selon les résultats illustrés dans la figure 89, la longueur finale des racines de tomates pour les différents échantillons étudiés est la suivante : l'échantillon 01 affiche une longueur des racines de 45 cm, l'échantillon 02 mesure 39 cm, et l'échantillon 03 présente une longueur de 37 cm. En comparaison, l'échantillon témoin (Tém) montre la longueur des racines la plus importante, atteignant 50 cm.

La présence élevée de sels dans l'eau et par conséquent dans le sol complique l'absorption de l'eau par les racines. Le stress osmotique causé par l'eau saline entrave la capacité des plantes à absorber suffisamment d'eau du sol, ce qui peut entraîner une déshydratation et ralentir leur croissance (**Min et al., 2014**).

Chapitre IV : Étude des effets de la qualité des eaux d'irrigation sur la culture et le rendement de quelques plantes cultivée dans la zone d'étude

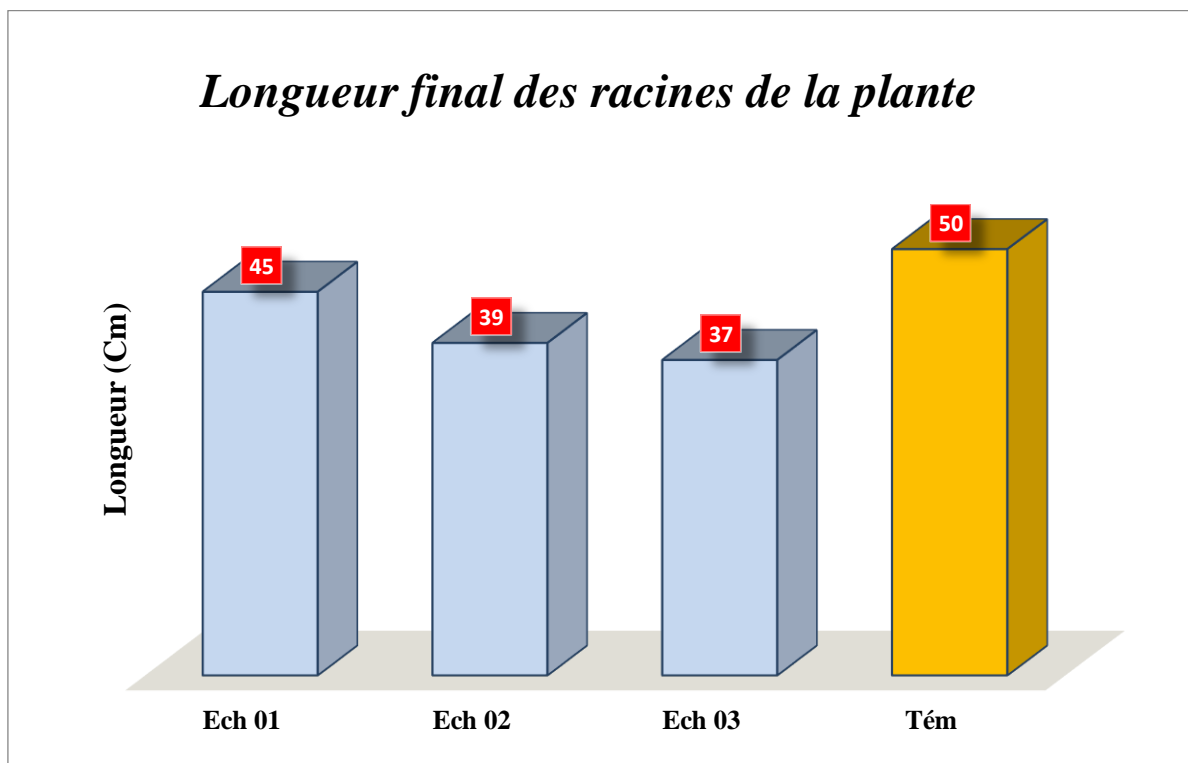


Figure 91. Longueur final des racines de la plante de tomate.

3.2.4. Diamètre finale de la tige principale

La figure 90 illustre les résultats concernant le diamètre final de la tige principale des tomates. L'échantillon 01 affiche un diamètre final de 1.9 cm. tandis que l'échantillon 02 mesure 1.7 cm. L'échantillon 03 présente le diamètre final de tige le plus élevé, avec 2.1 cm. Par ailleurs, l'échantillon témoin (Tém) atteint un diamètre final de tige de 2 cm.

La croissance de la tige principale de la tomate est liée à la présence de conditions optimales pour une meilleure croissance, telles que la lumière, la température ambiante et les éléments majeurs tels que l'azote, le phosphore, le potassium, ainsi que le besoin en alimentation hydrique avec une irrigation régulée.

En effet, les polluants dans l'eau peuvent modifier la structure du sol, affectant son aération et sa capacité à retenir l'eau et les nutriments. Un sol moins favorable peut entraîner une croissance médiocre des tiges, avec un diamètre réduit (Álvarez et al., 2012).

Chapitre IV : Étude des effets de la qualité des eaux d'irrigation sur la culture et le rendement de quelques plantes cultivées dans la zone d'étude

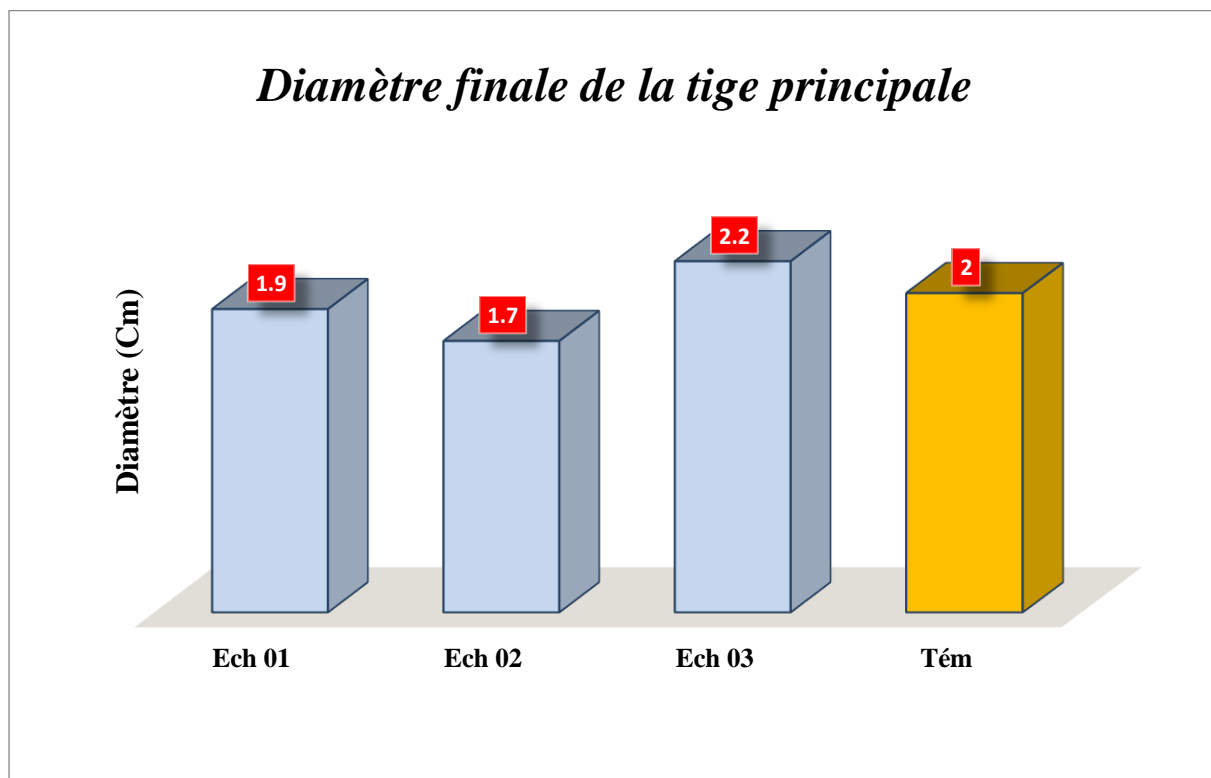


Figure 92. Diamètre finale de la tige principale de tomate.

3.2.5. Nombre moyen de bouquets par plante

L'apparition du premier bouquet floral dans la tomate est un signe du début de l'inflorescence, qui se produit généralement après 45 à 50 jours de plantation.

D'après la figure 91, les résultats concernant le nombre moyen de bouquets par plante de tomate sont les suivants : l'échantillon témoin (Tém) affiche le plus grand nombre de bouquets, avec une moyenne de 8 bouquets par plante. En comparaison, l'échantillon (Ech 01) montre une moyenne de 7 bouquets par plante, l'échantillon (Ech 02) en a 6 par plante, et l'échantillon (Ech 03) présente le nombre le plus bas, avec seulement 4 bouquets par plante.

Les résultats obtenus montrent que le nombre de bouquets par plante augmente avec la hauteur de la tige principale de la tomate. L'eau saline peut limiter la croissance en hauteur des tiges en raison du stress osmotique et des dommages cellulaires ce qui entraîne une compétition entre les plantes pour la lumière ou pour l'allongement des racines en fonction de leurs besoins et pour leur progéniture. Une hauteur de tige réduite peut entraîner une diminution du nombre de bouquets produits où les plantes plus petites peuvent avoir une capacité réduite à développer des inflorescences abondantes (Bao & Li, 2010).

Chapitre IV : Étude des effets de la qualité des eaux d’irrigation sur la culture et le rendement de quelques plantes cultivée dans la zone d’étude

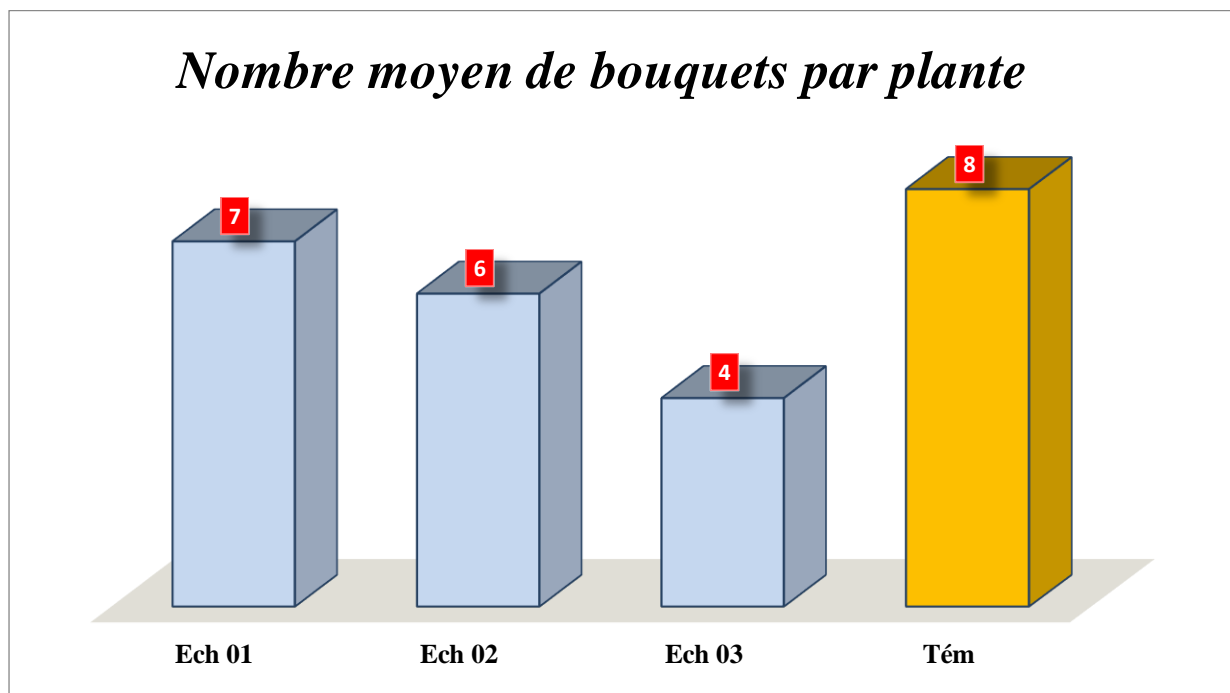


Figure 93. Nombre moyen de bouquets par plante de la tomate.

3.2.6. Nombre moyen des fleurs par plante

L’inflorescence et l’apparition de fleurs dans la plante de tomate nécessitent une alimentation hydrique régulière (réduisant la quantité d’eau) et l’apport régulier de phosphore par pulvérisation. Ils sont également influencés par les températures nocturnes et diurnes ambiantes (Ndjiliw, 2018).

L’analyse de la figure 92 montre le nombre moyen de fleurs par plante de tomate dans les parcelles étudiées. L’échantillon témoin (Tém) affiche le nombre le plus élevé, avec une moyenne de 72 fleurs par plante. En comparaison, l’échantillon (Ech 01) présente une moyenne de 63 fleurs, l’échantillon (Ech 02) en compte 54, et l’échantillon (Ech 03) montre le nombre moyen le plus bas, avec seulement 36 fleurs.

On remarque qu’il y a une grande différence entre les échantillons des parcelles choisies et l’échantillon témoin en termes de rythme de floraison et de nombre moyen de fleurs. Cela est dû à la qualité des eaux utilisées pour l’irrigation et à l’effet de la salinité sur l’absorption des éléments essentiels à la floraison dans les sols de notre région d’étude, tels que le phosphore assimilable, le bore, le potassium et les autres éléments mineurs.

Chapitre IV : Étude des effets de la qualité des eaux d'irrigation sur la culture et le rendement de quelques plantes cultivées dans la zone d'étude

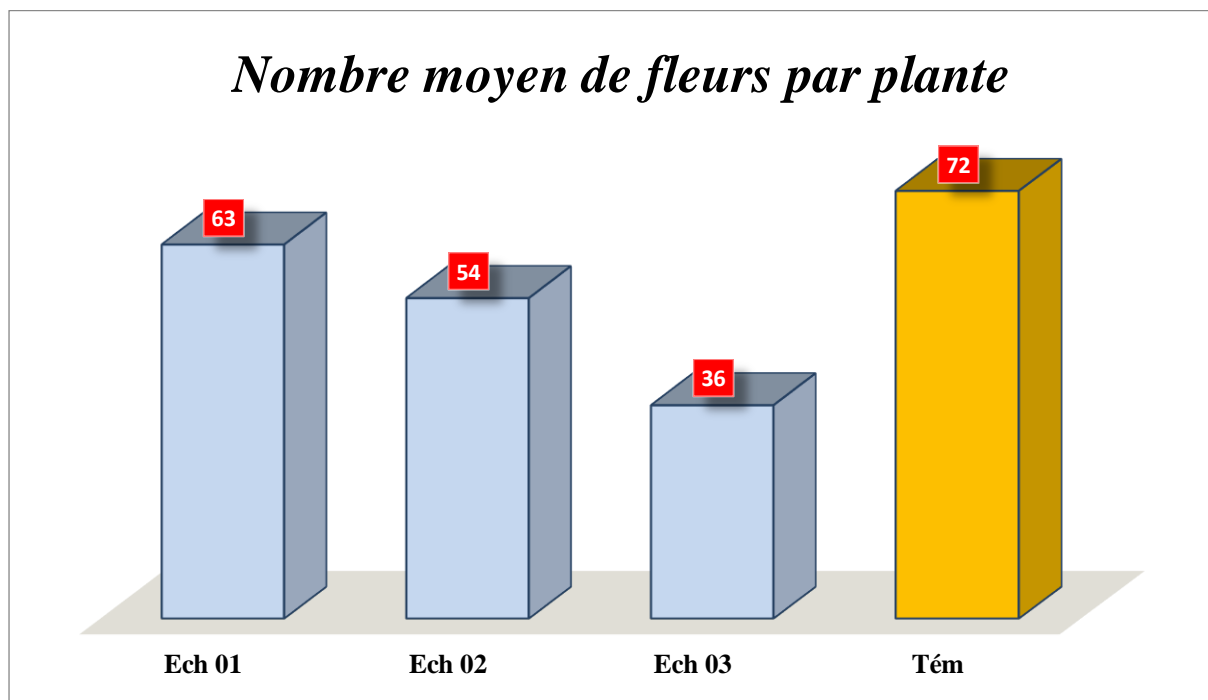


Figure 94. Nombre moyen de fleurs par plante de tomate.

3.2.7. Nombre moyen de fruits par plante

Le comptage du nombre de fruits pour chaque échantillon a été effectué à chaque récolte de tomates. La figure 93 présente les résultats obtenus dans les parcelles étudiées. Pour l'échantillon (Ech 01), la production de fruits est de 37 fruits par plante, tandis que dans l'échantillon (Ech 02), elle est de 33 fruits. En outre, l'échantillon (Ech 03) présente la production la plus faible avec une moyenne de 21 fruits par plante. La production la plus élevée a été observée pour l'échantillon témoin (Tém) avec une moyenne de 48 fruits par plante.

La différence entre le rendement et la production de fruits de tomate entre les échantillons étudiés en comparaison avec l'échantillon témoin est plus remarquable en raison de l'absence de pollinisation de la plupart des bouquets de fleurs des échantillons. Par ailleurs, la variation du taux d'absorption de potassium et de magnésium entre les échantillons, nécessaires à la production de fruits, est due à la saturation des sols provoquée par l'influence des eaux de Oued K'sob. Les sols saturés affectent la disponibilité de ces nutriments, ce qui perturbe la croissance des plantes et la formation des fruits. Cela explique pourquoi le rendement global des échantillons est considérablement inférieur à celui de l'échantillon témoin.

Chapitre IV : Étude des effets de la qualité des eaux d’irrigation sur la culture et le rendement de quelques plantes cultivées dans la zone d’étude

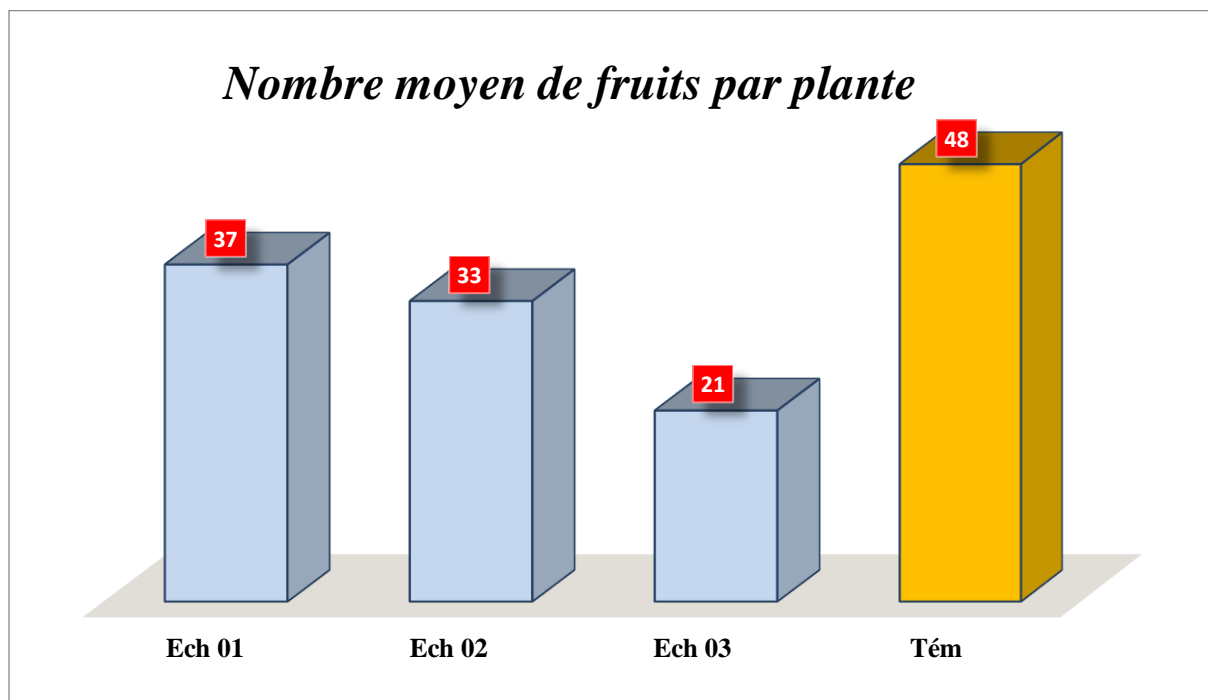


Figure 95. Nombre moyen de fruits par plante de tomate.

3.3. Poivron

3.3.1. Vitesse de croissance de la plante

Les cultures de poivrons dans notre région sont considérées comme des cultures de saison chaude, dont la vitesse et le rythme de croissance augmentent avec les températures élevées, ce qui accélère le processus de floraison.

La figure 94 montre la vitesse de croissance du poivron, exprimée en cm par jour, pour tous les échantillons étudiés dans les parcelles. Les résultats montrent que les échantillons (1, 2 et 3), soumis à l’eau de Oued K’sob, présentent des vitesses de croissance similaires. Cependant, l’échantillon témoin (Tém), irrigué avec de l’eau traitée, affiche une croissance nettement plus rapide entre 45 et 60 jours.

L’accumulation de sels dans les tissus végétaux ainsi que les polluants dans l’eau, tels que les substances chimiques, peuvent perturber les processus métaboliques de la plante, réduisant sa capacité à croître normalement (Li et al., 2015).

Chapitre IV : Étude des effets de la qualité des eaux d'irrigation sur la culture et le rendement de quelques plantes cultivée dans la zone d'étude

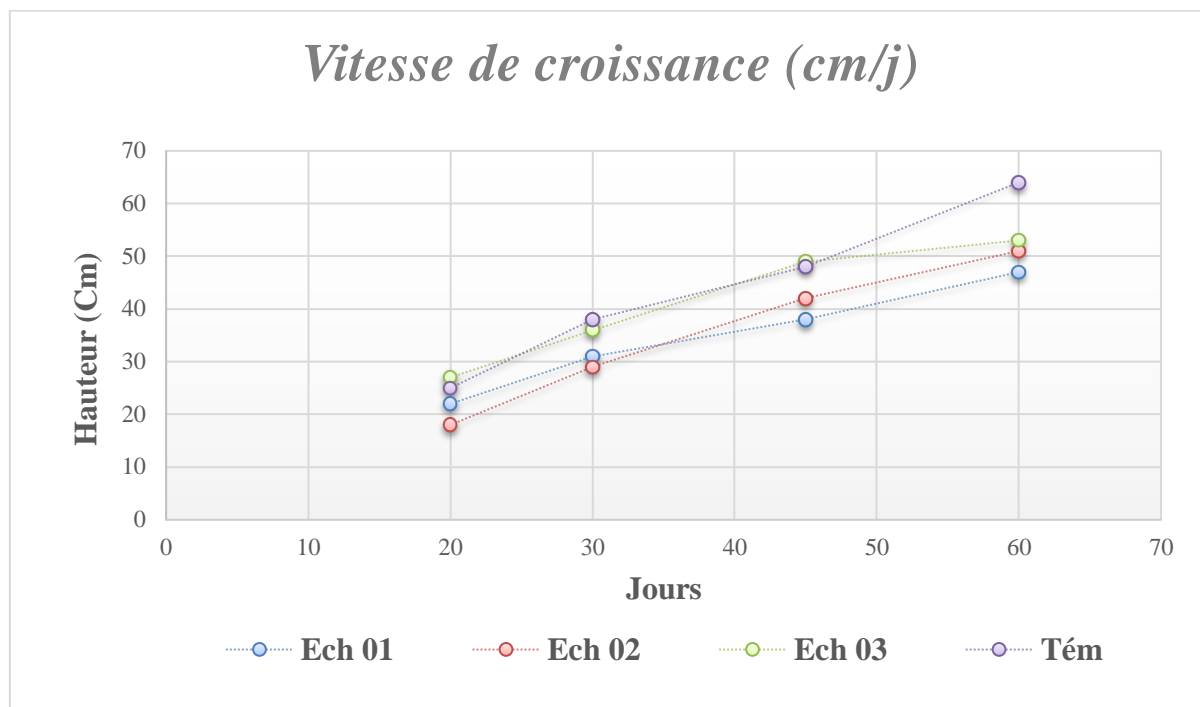


Figure 96. Vitesse de croissance de poivron.

3.3.2. Hauteur final de la plante

L'analyse de la figure 95 présente les résultats concernant la hauteur finale des plantes de poivron dans les parcelles étudiées. L'échantillon (Ech 01) atteint une hauteur de 52 cm, tandis que l'échantillon (Ech 02) affiche la plus grande hauteur avec 69 cm. L'échantillon (Ech 03) atteint 58 cm. En comparaison, l'échantillon témoin (Tém) présente une hauteur de 67 cm.

Les résultats obtenus dans votre étude montrent que les poivrons irrigués avec de l'eau polluée affichent une hauteur plus faible, à l'exception de l'échantillon (Ech 02) en raison d'une absorption réduite de l'eau et des nutriments, ainsi que des effets toxiques des polluants sur les racines et les tissus des plantes.

3.3.3. Longueur final des racines de la plante

Les résultats obtenus pour la longueur finale des racines de poivron sont présentés dans la figure (96). On y voit que : l'échantillon (Ech 01) présente une longueur finale des racines de 21 cm, l'échantillon (Ech 02) une longueur de 18 cm et l'échantillon (Ech 03) une longueur de 20 cm. Le résultat le plus élevé observé dans les racines de l'échantillon témoin (Tém) est de 28 cm.

Ces résultats fournissent des informations sur les performances des racines de poivron dans notre sol. On remarque une légère différence entre la croissance racinaire des échantillons choisis, l'échantillon témoin présentant de bons résultats en termes de longueur racinaire,

Chapitre IV : Étude des effets de la qualité des eaux d'irrigation sur la culture et le rendement de quelques plantes cultivées dans la zone d'étude

probablement en raison de la salinité, ce qui réduit leur allongement dû à l'effet des eaux de Oued K'sob utilisées pour l'irrigation.

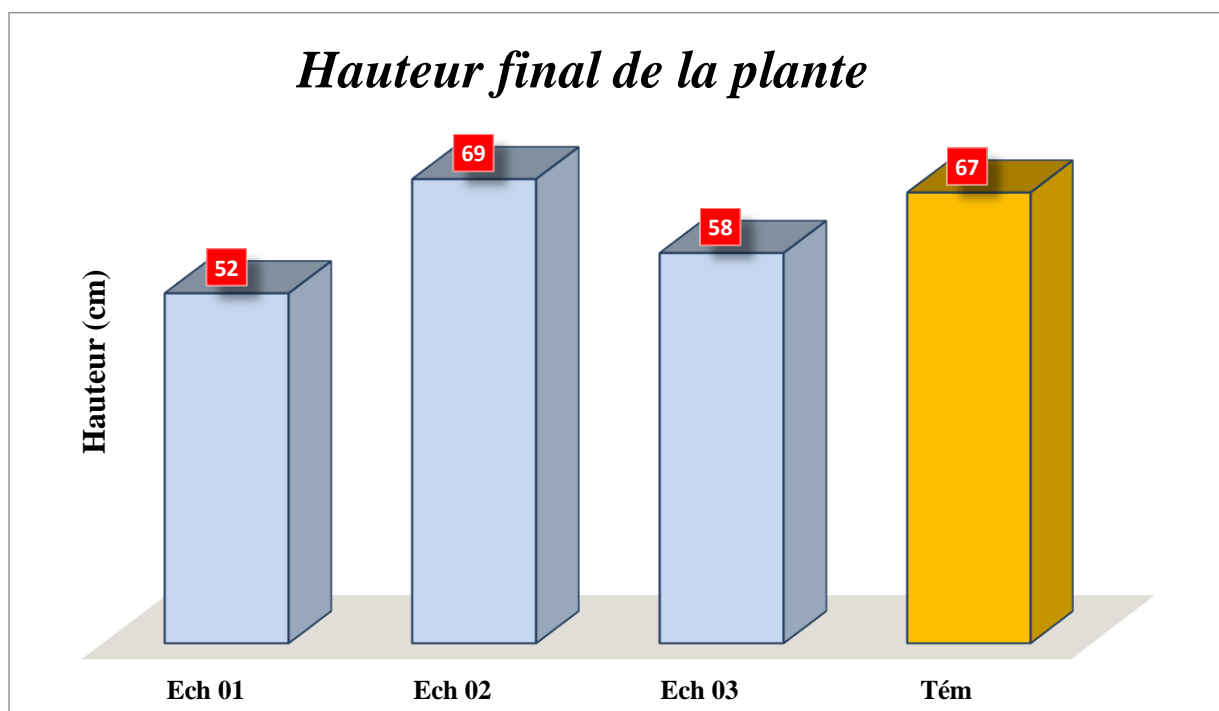


Figure 97. Hauteur finale de la plante de poivron.

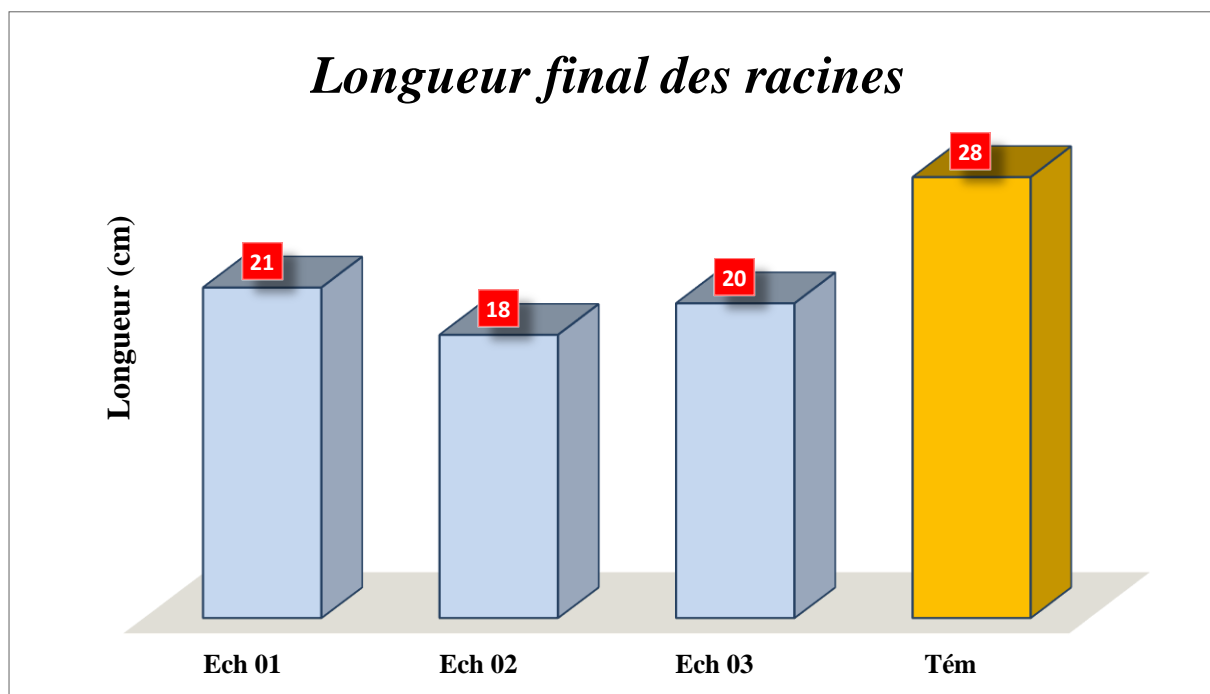


Figure 98. Longueur finale des racines de la plante de poivron.

Chapitre IV : Étude des effets de la qualité des eaux d'irrigation sur la culture et le rendement de quelques plantes cultivée dans la zone d'étude

3.3.4. Nombre moyen de fleurs par plante

L'inflorescence dans le poivron est sensible aux changements des facteurs environnementaux, comme la température, et favorise généralement les températures chaudes. Les fleurs de la plante de poivron apparaissent sous la forme de petites fleurs de couleur blanche et jaune (Liu et al., 2020).

Les résultats obtenus (Fig. 97) présentent le nombre moyen de fleurs par plante de poivron dans les parcelles étudiées. L'échantillon (Ech 01) compte en moyenne 15 fleurs par plante, tandis que l'échantillon (Ech 02) en affiche 13 et l'échantillon (Ech 03) en compte 14. L'échantillon témoin (Tém) enregistre le nombre le plus élevé, avec une moyenne de 22 fleurs par plante.

L'irrigation avec l'eau du Oued K'sob, a un impact négatif sur le nombre moyen de fleurs par plante de poivron. Les contaminants et les sels présents dans l'eau, perturbent l'absorption des nutriments essentiels et l'eau par les racines. Cela entraîne un stress hydrique et nutritionnel, réduisant la floraison des plantes. Ainsi, les échantillons irrigués avec cette eau montrent un nombre moyen de fleurs inférieur à celui de l'échantillon témoin, qui bénéficie d'une eau plus propre, ce qui explique ses meilleurs résultats (Kotaix et al., 2022).

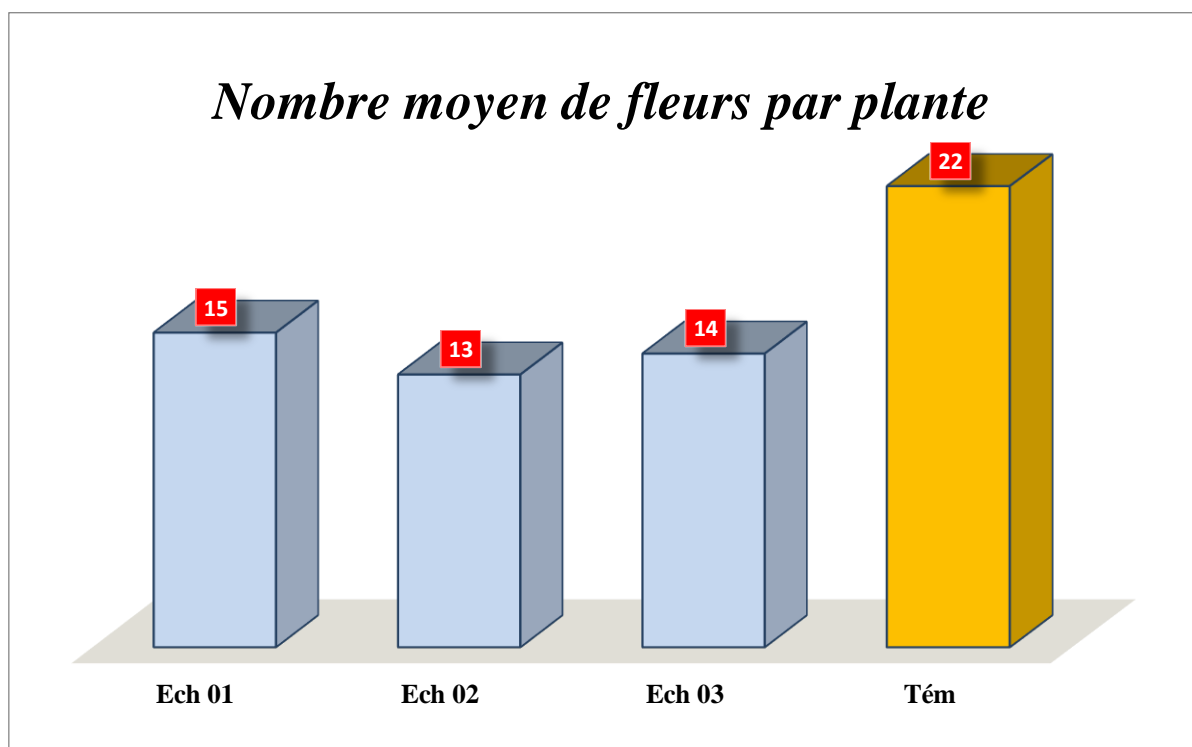


Figure 99. Nombre moyen de fleurs par plante de poivron.

Chapitre IV : Étude des effets de la qualité des eaux d'irrigation sur la culture et le rendement de quelques plantes cultivées dans la zone d'étude

3.3.5. Nombre moyen de fruits par plante

L'apparition et la production des premiers fruits dans la plante de poivron sont très courtes par rapport aux autres cultures maraîchères de notre région. Le comptage du nombre de fruits par plante pour chaque échantillon choisi a donc été effectué durant la récolte. La figure 98 présente la production de chaque échantillon. L'échantillon (Ech 01) affiche une production moyenne de 11 fruits, alors que l'échantillon (Ech 02) présente la production la plus faible avec 9 fruits. L'échantillon (Ech 03) produit en moyenne 12 fruits. La production la plus élevée a été observée pour l'échantillon témoin (Tém) avec une moyenne de 16 fruits par plante.

Ces résultats obtenus indiquent une similarité entre le rendement des échantillons étudiés avec une légère différence avec l'échantillon témoin en terme du rythme de floraison et le nombre moyen de fleurs. Cette variation s'explique par la qualité de l'eau utilisée pour l'irrigation, ainsi que par l'effet de la salinité sur l'absorption des éléments essentiels à la floraison, tels que le phosphore assimilable, le bore, le potassium et d'autres éléments mineurs, dans les sols de la région étudiée (Botían et al., 2005).

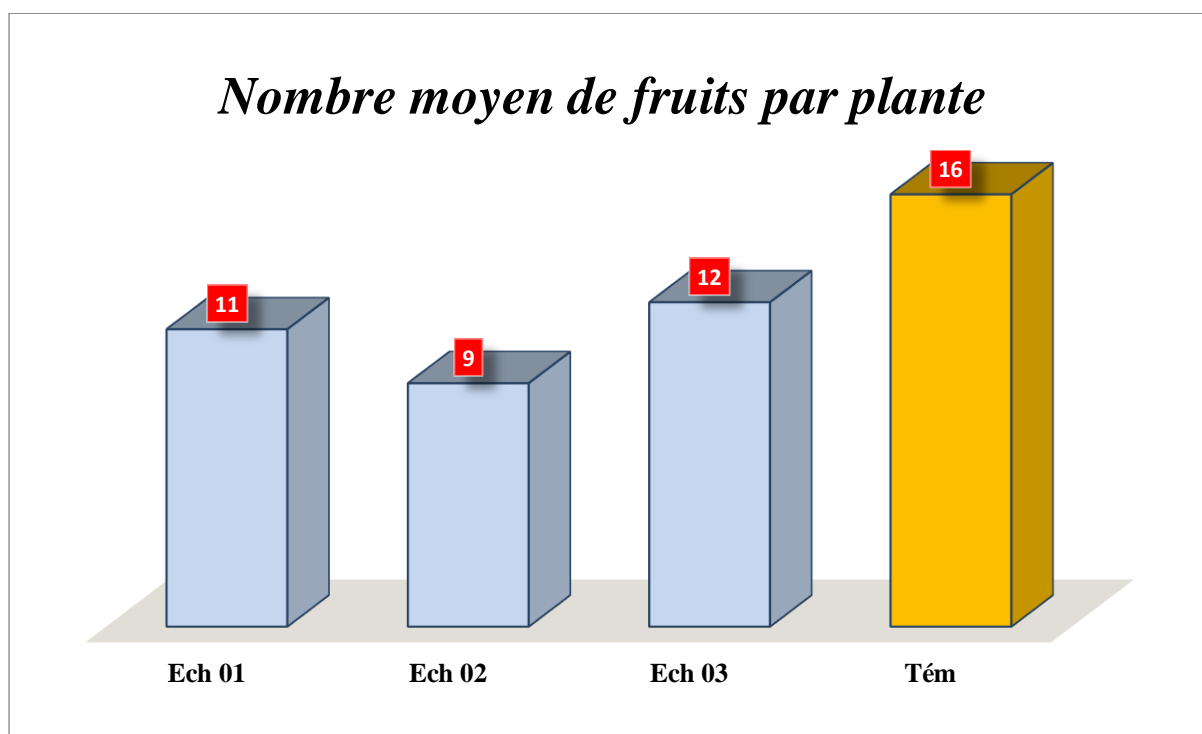


Figure 100. Nombre moyen de fruits par plante de poivron.

Chapitre IV : Étude des effets de la qualité des eaux d'irrigation sur la culture et le rendement de quelques plantes cultivées dans la zone d'étude

Conclusion

Cette étude, réalisée au niveau de la région de K'sob à M'sila, fournit des informations générales sur l'effet des eaux d'irrigation de Oued K'sob sur les cultures et le rendement de quelques plantes cultivées dans la région. On a observé notamment :

- ✓ Pour la fève, l'effet des eaux d'irrigation se manifeste particulièrement sur la vitesse de croissance. Les autres paramètres, tels que la hauteur finale de la plante, la longueur des racines et le nombre moyen de fleurs et de fruits, sont presque semblables à l'échantillon témoin avec une légère disparité.
- ✓ Pour la tomate, l'effet des eaux d'irrigation se manifeste dans l'ensemble des paramètres étudiés. Ainsi, il existe une grande différence entre les échantillons choisis et l'échantillon témoin, surtout pour le rendement des fruits.
- ✓ Pour le poivron, l'effet des eaux d'irrigation se manifeste uniquement dans la longueur des racines de la plante, avec une légère différence dans le rendement des fruits. Les autres paramètres sont presque similaires à ceux de la plante témoin.

Généralement, les plantes et les cultures de fèves sont les meilleures espèces végétales adaptées à cette eau et présentent des résultats similaires à l'échantillon témoin, avec un bon rendement. Le poivron aussi, mais avec un rendement légèrement inférieur.

*Conclusion générale
et perspectives*

Conclusion générale et perspectives

La région du K'sob, ou le périmètre de K'sob, est un pôle agricole très important. Localisée au Nord-est de la wilaya de M'sila à l'Est algérien, elle s'étend entre la région montagneuse au Nord et les régions des plaines au Sud dans la région de M'sila. Cependant, le problème majeur dans cette région est la détérioration de la qualité des eaux d'irrigation et son impact sur les sols et les plantes des terres agricoles.

Une étude réalisée à Oued K'sob sur la qualité physico-chimique des eaux et sur les caractéristiques des sols dans le périmètre a permis de suivre l'état des plantes. Elle a mené aux conclusions suivantes :

La région de K'sob est caractérisée par un climat méditerranéen semi-aride et des précipitations non homogènes avec une moyenne annuelle de 197 mm/an. Le climat de la région est divisée en deux saisons : une saison chaude et sèche et une saison froide et peu humide. L'étude géologique montre que la région de K'sob est liée au bassin du Hodna du point de vue de la structure géologique, dans la partie Nord. Le quaternaire se compose de roches calcaires et d'alluvions actuelles ou récentes sur le fond de l'Oued K'sob ou sur les berges, contenant des cailloutis, des sables calcaires ou parfois des vases.

Pour la qualité de l'eau d'irrigation de Oued K'Sob, les résultats obtenus montrent une forte minéralisation. Cela est peut être dû à la présence de roches riches en sel et en gypse dans la région. Selon Piper, les eaux de Oued K'sob présentent un faciès chloruré sodique et potassique ou sulfaté sodique. On y trouve également des concentrations élevées de calcium, magnésium, sodium, potassium, sulfates, chlorures et bicarbonates, ce qui confirme la dominance du faciès chimique trouvé. Le calcium et le magnésium se trouvent dans la nature sous forme de bicarbonates ou de sulfates, ce qui explique la présence de ces deux éléments dans cette eau. Quant au chlorures, leur présence est liée à la géologie de la région, à la présence de gypse et de calcaire, ainsi qu'à la pollution agricole par les pesticides et aux déchets domestiques dans l'Oued K'sob. La présence des sulfates peut être augmentée par les activités industrielles dans la zone proche de l'Oued. L'existence des bicarbonates dans l'eau est due à la dissolution des évaporites ou à la décomposition des strates géologiques au Nord de la région. D'autre part, les valeurs obtenues pour les nitrates et les nitrites ainsi que la DCO indiquent que les eaux de l'Oued K'sob sont polluées.

Selon les diagrammes de SAR, de Riverside, la classification de Wilcox et le calcul de l'IWQI, on peut classer les eaux de l'Oued K'sob dans trois catégories différentes en fonction de leur composition en éléments chimiques.

L'analyse statistique par ACP et CAH montre que les eaux de l'Oued K'sob peuvent être réparties en trois groupes ou classes. Chaque groupe représente un type d'eau, et chaque type d'eau est influencé par un facteur déterminant (F). Chacun de ces facteurs est lié à des raisons naturelles ou anthropiques qui déterminent la qualité de cette eau de l'Oued K'sob. En résumé, la qualité de l'eau de l'Oued K'sob en vue d'un usage agricole est mauvaise et celle-ci n'est utilisée que pour les circonstances exceptionnelles.

Pour l'étude des caractéristiques du sol, les résultats obtenus montrent des types du sol avec une fraction dominante limono-argileuse et une fraction moins importante limono-sableuse. Le taux de salinité est élevé, le pH est alcalin à très alcalin et le sol est riche en matière organique. Cela est dû à l'irrigation excessive par les eaux de Oued K'sob qui contiennent des sels comme le calcium, le magnésium et le potassium, ainsi qu'à l'effet des roches alcalines dans la région et à l'utilisation d'engrais et de fertilisants. On observe également une forte concentration en calcium avant et après irrigation, ainsi qu'une forte concentration en potassium et des valeurs modérées pour le magnésium et le sodium. Cette forte teneur en calcium est liée à la composition minérale du sous-sol, qui contient des roches calcaires et des roches dolomitiques riches en calcium, et pour le potassium, trouvées en lien avec l'utilisation intensive d'engrais comme les NPK. D'autre part, le sol est saturé en calcium ce qui rend l'adsorption du magnésium et du sodium très difficile. Pour les éléments des traces métalliques (ETM), les concentrations de fer, de cuivre, d'aluminium, de manganèse et de cobalt dépassent les normes de l'OMS. D'autre part, les valeurs du zinc, du chrome, du titane, du Nickel et l'arsenic sont dans les normes. Les fortes concentrations des éléments des traces métalliques (ETM) dans la région de K'sob peuvent être d'origine naturelle, par la décomposition des roches ou par la présence de dépôts rocheux dans les strates géologiques, ou d'origine anthropique, par les rejets d'eaux usées et de déchets industriels dans les eaux d'irrigation ainsi que l'utilisation intensive et l'accumulation d'engrais chimiques dans la composition du sol.

L'analyse statistique par l'ACP et le CAH, montre trois groupes ou trois types des sols divisés selon leurs caractéristiques et chaque type du sol est déterminé par un facteur (F) influent, soit naturelle ou anthropique.

Afin d'évaluer les effets des eaux d'irrigation sur le rendement des cultures et les plantes cultivées dans la région de K'sob, on a trouvé :

Dans les cultures de fèves, l'effet des eaux d'irrigation se manifeste uniquement sur la vitesse de croissance. Les autres paramètres, tels que la hauteur finale de la plante, la longueur des racines et le nombre moyen de fleurs et de fruits, sont presque identiques à ceux de l'échantillon

témoin. Ces résultats similaires de la croissance entre les échantillons liés à des conditions favorables et optimales pour cette plante dans notre région d'étude. D'autre part, les cultures de tomate présentent des résultats différents pour l'ensemble des paramètres étudiés. On constate notamment une grande différence au niveau du rendement des fruits. Ces résultats peuvent être liés aux besoins en lumière et en température ambiante optimale, ainsi qu'aux besoins en éléments majeurs et à l'alimentation hydrique régulée. Pour les cultures de poivron, les résultats du suivi montrent que tous les paramètres étudiés sont proches similaires à ceux de la plante témoin. L'effet de l'eau d'irrigation apparaît uniquement dans la longueur des racines de la plante, avec une légère différence dans le rendement des fruits.

Cette étude a montré que les cultures de fèves sont les meilleures espèces végétales adaptées à cette eau et présentent des résultats similaires à l'échantillon témoin, avec un bon rendement. Le poivron donne également de moins bons résultats avec un rendement moins élevé. La culture de tomate donne les résultats les plus faibles et les moins bons.

Recommandations et perspectives

Pour améliorer de la qualité des eaux d'irrigation et l'augmentation du rendement des cultures, il est souhaitable de prendre les mesures suivantes :

- ✓ La diminution des rejets d'eaux usées et des sources de pollution dans les eaux de l'oued K'sob ;
- ✓ Améliorer le processus de distribution de l'eau du barrage de K'sob à toutes les exploitations agricoles de la région ;
- ✓ Développer une stratégie d'intervention sur l'agriculture et le développement rural dans la région de K'Sob ;
- ✓ L'utilisation de méthodes et de matériel moderne pour l'irrigation afin de réduire le gaspillage tout en savant les besoins des plantes cultivées ;
- ✓ La réduction de l'utilisation des engrais chimiques et l'utilisation des engrais organiques pour améliorer la structure du sol ;
- ✓ L'exploitation de nouvelles ressources en eau près de l'Oued K'sob, comme les retenues collinaires à usage agricole ;
- ✓ La sensibilisation des agriculteurs aux méthodes d'irrigation intensive et au risque de salinité des cultures.
- ✓ Enfin, choisir des cultures tolérantes aux conditions climatiques de la région et adaptées aux eaux d'irrigation utilisées.

*Références
bibliographiques*

Références bibliographiques

AFNOR, N. (1979). Recueil des normes françaises. Eaux-Méthodes d'essais.

Aiello, R., Cirelli, G. L., & Consoli, S. (2007). Effects of reclaimed wastewater irrigation on soil and tomato fruits: a case study in Sicily (Italy). *Agricultural Water Management*, 93(1–2), 65–72.

Álvarez, S., Gómez-Bellot, M. J., Castillo, M., Bañón, S., & Sánchez-Blanco, M. J. (2012). Osmotic and saline effect on growth, water relations, and ion uptake and translocation in *Phlomis purpurea* plants. *Environmental and Experimental Botany*, 78, 138-145.

Akkan, T., Yazicioglu, O., Yazici, R., & Yilmaz, M. (2018). Assessment of irrigation water quality of Turkey using multivariate statistical techniques and water quality index: Siddikli Dam Lake. *Desalination and Water Treatment*, 115, 261.

Al-Ghobari, H. M. (2011). The effect of irrigation water quality on soil properties under center pivot irrigation systems in central Saudi Arabia. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 145, 507–516.

Alloway, B. J. (2012). Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability (Vol. 22). Springer Science & Business Media.

Almeida, C., Quintar, S., González, P., & Mallea, M. (2008). Assessment of irrigation water quality. A proposal of a quality profile. *Environmental Monitoring and Assessment*, 142(1), 149–152.

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

Anjos, L., Gaistardo, C. C., Deckers, J., Dondeyne, S., Eberhardt, E., Gerasimova, M., Harms, B., Jones, A., Krasilnikov, P., & Reinsch, T. (2015). World reference base for soil resources 2014 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps.

Aouissi, A. (2009). Microbiologie et physico-chimie de l'eau des puits et des sources de la région de Guelma (Nord-Est de l'Algérie).

- APHA. (1995).** Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.
- Archambault, C., Combe, M., & Ruchard, J. P. (1975).** Le plateau des phosphates: ressources en eau. Notes et Mémoires Du Service. Géologique Du Maroc, 231, 239–258.
- Aubert, G. (1976).** Les sols sodiques en Afrique du nord. Ann INA EL Haraaach.p 06.
- Aubert, G. (1978).** Méthodes d'analyses des sols. edit: crdp, marseille, 191p.
- Awol, M. J., & Adugna, A. T. (2021).** Assessing the industrial effluent effect on irrigation water quality and farm soil near Kombolcha Town, Ethiopia. Journal of Chemistry, 2021, 19.
- Bagnouls, F. (1953).** Saison sèche et indice xéothermique. Bull Soc His Nat Toulouse, 88, 193–239.
- Baize, D. (2000).** Teneurs totales en «métaux lourds» dans les sols français: résultats généraux du programme ASPITET. Le Courrier de l'Environnement de l'INRA, 40, 39–54.
- Bao, H., & Li, Y. (2010).** Effect of stage-specific saline irrigation on greenhouse tomato production. Irrigation science, 28, 421-430.
- Belghiti, M. L., Chahlaoui, A., Bengoumi, D., & El Moustaine, R. (2013).** Etude de la qualité physico -chimique et bactériologique des eaux souterraines de la nappe plio-quadernaire dans la région de Meknès (Maroc). LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782, 14.
- Benrabah, S., Bousnoubra, H., Kherici, N., & Cote, M. (2013).** Caractérisation de la qualité des eaux de l'oued Kebir Quest (Nord Est algerien). Synthèse: Revue Des Sciences et de La Technologie, 26, 30–39.
- Botía, P., Navarro, J. M., Cerdá, A., & Martínez, V. (2005).** Yield and fruit quality of two melon cultivars irrigated with saline water at different stages of development. European Journal of Agronomy, 23(3), 243-253.
- Bouaroudj, S., Menad, A., Bounamous, A., Ali-Khodja, H., Gherib, A., Weigel, D. E., & Chenchouni, H. (2019).** Assessment of water quality at the largest dam in Algeria (Beni Haroun Dam) and effects of irrigation on soil characteristics of agricultural lands. Chemosphere, 219, 76–88. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.193>.
- Bouaroudj, S., & Dhaou-El-Djabine, K. (2015).** Evaluation de la qualité des eaux d'irrigation des oueds: Rhumel et Boumerzoug (Constantine). Revue LJEE, 24&25.

Bounouira, H. (2007). Etude des qualités chimiques et géochimiques du bassin versant de Bouregreg. Université Pierre et Marie Curie-Paris VI.

Bourenane, A., Daoud, R., & Roumair, Z. M. (2019). Bieu caractéristiques Qualitative et Quantitative Des Déchets Plastiques de la Commune de M'sila. Université Mohamed Boudiaf-M'sila.

Bouthier, A., & Danjou, D. (2009). Bilan de deux campagnes d'essais de fertilisation soufrée. Perspectives Agricoles, 353, 48.

Bozdağ, A. (2016). Assessment of the hydrogeochemical characteristics of groundwater in two aquifer systems in Çumra Plain, Central Anatolia. Environmental Earth Sciences, 75(8), 1–15.

Bradaï, A., Douaoui, A., & Marlet, S. (2008). Qualité des eaux souterraines utilisées en irrigation et risques de dégradation des sols dans la plaine du Bas-Cheliff, Algérie. Economies d'eau En Systèmes Irrigués Au Maghreb, 7-p.

Bray, R. H. (1945). Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. Soil Science, 59(1), 39–46.

Bruker. (2019). Saint V8. 40A and Sadabs. Bruker AXS Inc Madison, Wisconsin, USA.

Chaux, C., & Foury, C. (1994). Productions légumières: Généralités. 2. Légumes feuilles, tiges, fleurs, racines, bulbes. 3. Légumineuses potagères, légumes fruits. Technique et Documentation.

Cheloufi, R., Alayat, H., & Messaadia, H. (2017). Effet d'un apport de deux types de fumiers de bétail sur la biodégradation de deux herbicides (Glyphosate et 2, 4-D) dans les sols agricoles de périmètre irrigable de Bounamoussa, extrême Nord Est Algérien. Afrique Science, 13(5), 161–173.

Clément, R., & Galand, A. (1979). Irrigation par aspersion et réseaux collectifs de distribution sous pression.

Delas, J. (2000). La fertilisation de la vigne. Editions Féret.

Duc, G. (1997). Faba bean (*Vicia faba* L.). Field Crops Research, 53(1–3), 99–109.

Durand, J. H. (1983). Les sols irrigables, Agence de coopération culturelle et technique. PU France.

El Behairy, Ra. A., El Baroudy, A. A., Ibrahim, M. M., Kheir, A., & Shokr, M. S. (2021). Modelling and assessment of irrigation water quality index using GIS in semi-arid region for sustainable agriculture. *Water, Air, & Soil Pollution*, 232(9), 1–19.

FAO. (1976). A Framework for land évaluation. FAO Soils Bulletin 32. Rome.

FAO. (1996). Etude agro-pédologique. Circonscription de Constantine. Rome, pp 146 -150.

Gallais, A., & Bannerot, H. (1992). Amélioration des espèces végétales cultivées. Objectifs et critères de sélection. Editions Quae.

Garane, A., Some, K., Nikiema, J., Ouango, K., Traore, M., & Sawadogo, M. (2019). Fréquences d'application d'engrais minéraux: Impact sur les variables de croissance et de développement de la tomate hivernale.

Gauchers, G. (1968). Traité de pédologie agricole. Le sol et ces caractéristiques agronomiques.

Gaujous, D. (1995). La pollution des milieux aquatiques: aide-mémoire. Lavoisier.

Giri, A., Bharti, V. K., Kalia, S., Kumar, K., & Khansu, M. (2022). Hydrochemical and quality assessment of irrigation water at the trans-himalayan high-altitude regions of Leh, Ladakh, India. *Applied Water Science*, 12(8), 1–20.

Grosvernier, P. (1991). Un triangle granulométrique pour les• tourbes: analyse semi-automatique et représentation graphique. *Science Du Sol*, 29(1), 23–35.

Gueroui, Y. (2014). Caractérisation Hydrochimique et Bactériologique des Eaux Souterraines de L'aquifère Superficiel de la Plaine de Tamlouka (Nord-Est Algérien).

Gueroui, Y., Maoui, A., & Touati, A. S. (2015). Hydrochemical and bacteriological investigation in groundwater of the Tamlouka Plain, north-east of Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(5), 2417–2432.

Guiraud, R. (1973). Evaluation post triasique de l'avant pays de la chaine algine en Algérie, d'après l'étude de bassin de Hodna et des régions voisines.

Hadbaoui, I. (2013). Les parcours steppiques dans la région de M'Sila: quelle gestion pour quel devenir. Mémoire de Magistère, Université Kasdi Merbah, Ouargla.

Harivandi. (1999). Interpreting turfgrass irrigation water test result. *Water Journal of California*, 8009 (Univ of California, division of agriculture and natural resources), 9.

Hinge, G., Bharali, B., Baruah, A., & Sharma, A. (2022). Integrated groundwater quality analysis using Water Quality Index, GIS and multivariate technique: a case study of Guwahati City. *Environmental Earth Sciences*, 81(16), 1–15.

Islam, M. S., & Shamsad, S. (2009). Assessment of irrigation water quality of Bogra district in Bangladesh. *Bangladesh Journal of Agricultural Research*, 34(4), 507–608.

JORA. (2011). Journal Officiel de la République Algérienne : Décret exécutif n° 11-125 du 17 Rabie Ethani 1432 correspondant au 22 mars 2011 relatif à la qualité de l'eau de consommation humaine.

JORA. (2012). Journal Officiel de la République Algérienne : Décret exécutif n° 41 du 8 Safar 1433 correspondant au 2 janvier 2012 pour objet de fixer les spécifications des eaux usées épurées utilisées à des fins d'irrigation.

Kabata-Pendias, A., & Pendias, H. (2001). Trace elements in soils and plants CRC Press Inc. Boca Raton, FL, USA.

Kabir, M. Y., Nambeesan, S. U., Bautista, J., & Díaz-Pérez, J. C. (2021). Effect of irrigation level on plant growth, physiology and fruit yield and quality in bell pepper (*Capsicum annuum* L.). *Scientia Horticulturae*, 281, 109902.

Kachi, N., Kachi, S., & Bousnoubra, H. (2016). Effects of Irrigated Agriculture on Water and Soil Quality (Case Perimeter Guelma, Algeria). *Soil & Water Research*, 11.(2)

Khelif, S. (2018). Impact de l'irrigation avec les eaux usées sur la qualité des sols agricoles et des eaux souterraines de la région de Fesdis-Région nord de Batna. UB1.

Konfe, Z., Zonou, B., & Hien, E. (2019). Influence d'intrants innovants sur les propriétés du sol et la production de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) et d'aubergine (*Solanum melongena* L.) sur un sol ferrugineux tropical en zone soudano-sahélienne au Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 13(4), 2129–2146.

Kotaix, A. J. A., Kouassi, Y. F., Assi, E. G. M., Izzrie, L. D. M.-P., Kouadio, K. H., Kassin, K. E., Coulibaly, K., & Koko, L. A. (2022). Effets du phosphore et du potassium sur la fertilité

chimique du sol et des paramètres de rendement du cacaoyer. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 16(5), 2413–2423.

Kouadra, R., & Demdoun, A. (2020). Hydrogeochemical characteristics of groundwater and quality assessment for the purposes of drinking and irrigation in Bougaa area, Northeastern Algeria. *Acta Geochimica*, 39(5), 642–654.

Kükrer, S., & Mutlu, E. (2019). Assessment of surface water quality using water quality index and multivariate statistical analyses in Saraydüzü Dam Lake, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(2), 1–16.

Lambiéno, Y. E., Lompo, D. J. P., Sako, A., & Nacro, H. B. (2020). Evaluation des teneurs en éléments traces métalliques des sols soumis à l'apport des déchets urbains solides. *Int. J. Biol. Chem. Sci*, 14(9), 3361–3371.

Leroy J.B. (1999). La pollution des eaux (4eme édit). Presses Universitaires de France.

Li, C., Lei, J., Zhao, Y., Xu, X., & Li, S. (2015). Effect of saline water irrigation on soil development and plant growth in the Taklimakan Desert Highway shelterbelt. *Soil and Tillage Research*, 146, 99-107.

Lilia, Z. (2016). Evaluation de la pollution des sols et des eaux de la plaine de Bounamoussa et essais de dépollution. Thèse en vue de l'obtention du diplôme de doctorat, département de biologie, université Badji Mokhtar - Annaba.

Liu, Y., Chen, Y., Wang, Y., Chen, J., Huang, Y., Yan, Y., Li, L., Li, Z., Ren, Y., & Xiao, Y. (2020). Total phenolics, capsaicinoids, antioxidant activity, and α -glucosidase inhibitory activity of three varieties of pepper seeds. *International Journal of Food Properties*, 23(1), 1016–1035.

Loué, A. (1979). Interaction du potassium avec d'autres facteurs de croissance.

Makhzoum, Y., & Mahdid, B. (2019). Hydrologie du bassin du Hodna: Construction d'une base de données à l'aide d'un SIG. Université Mohamed Boudiaf de M'sila.

Maoui, A. (2007). Evolution et origine du chimisme des eaux de l'aquifère superficiel de Zaâfrane: région de la steppe Sud Algéroise. Etude de la variation spatiale de la salinité et ses risques sur les sols et la végétation. Université de Annaba-Badji Mokhtar.

- Mappa, D. (2010).** Les productions légumières: cahier d'activités. Educagri Editions.
- Martonne, E. de. (1923).** L'ancien delta du Var et les vallées des Alpes-maritimes. *Annales de Géographie*, 32(178), 313–338.
- McBride, G. B., & Rutherford, J. C. (1983).** Handbook on estimating dissolved oxygen depletion in polluted rivers. *Water & Soil Miscellaneous Publication*, 51.
- Meeting, J. F. E. C. on F. A., Additives, J. F. E. C. on F., & Organization, W. H. (2002).** Evaluation of certain mycotoxins in food: Fifty-Sixth report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (Vol. 56). World Health Organization.
- Meireles, A. C. M., Andrade, E. M. de, Chaves, L. C. G., Frischkorn, H., & Crisostomo, L. A. (2010).** A new proposal of the classification of irrigation water. *Revista Ciência Agronômica*, 41, 349–357.
- Mezani, S. (2011).** Bioécologie du bruche de la fève *Bruchus rufimanus* Boh. (Coleoptera: Bruchidae) dans des parcelles de variétés de fèves différentes et de féverole dans la région de Tizi-Rached (Tizi-Ouzou). Université Mouloud Mammeri.
- Min, W., Guo, H., Zhou, G., Zhang, W., Ma, L., Ye, J., & Hou, Z. (2014).** Root distribution and growth of cotton as affected by drip irrigation with saline water. *Field Crops Research*, 169, 1-10.
- Mohamed, G. (2014).** Caractérisation hydrochimique et évaluation des indicateurs de pollution dans l'environnement: cas de l'oued Seybouse et ses affluents dans le sous bassin de Guelma (Nord-Est Algérien). Guelma.
- Ndjiliw, S. (2018).** Prospections pour la mise au point d'une lutte biologique par conservation contre *Tuta absoluta* dans les cultures de tomate au Sénégal. Université Cheikh Anta Diop.
- OMS. (2011).** Organisation Mondiale de la Santé : Guidelines for drinking waterquality, 4th edn. World Health Organization, Geneva.
- Orsini, F., Kahane, R., Nono-Womdim, R., & Gianquinto, G. (2013).** Urban agriculture in the developing world: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33(4), 695–720.

- Palacios-Diaz, M. del P., Fernández-Vera, J. R., Hernández-Moreno, J. M., Amorós, R., & Mendoza-Grimón, V. (2023).** Effect of Irrigation Management and Water Quality on Soil and Sorghum bicolor Payenne Yield in Cape Verde. *Agriculture*, 13(1), 192.
- Parkhurst, D. L., & Appelo, C. A. J. (1999).** User's guide to PHREEQC (Version 2): A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. *Water-Resources Investigations Report*, 99(4259), 312.
- Paul, B. T., Clement, G. Y., Anita, K. P., & Dwayne, J. S. (2012).** Heavy metal toxicity and the environment. *Experientia Supplementum*, 101, 133–164.
- Piper, A. M. (1944).** A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 25(6), 914–928.
- Pochard, E., Palloix, A., & Daubèze, A. M. (1992).** Capsicum. *Amélioration Des Espèces Végétales Cultivées: Objectifs et Critères de Sélection.*, 420–474.
- Qasim, B. H. (2015).** Détermination, spéciation et biodisponibilité des éléments traces métalliques dans les sols contaminés et technosols. Université d'Orléans.
- Ram, A., Tiwari, S. K., Pandey, H. K., Chaurasia, A. K., Singh, S., & Singh, Y. V. (2021).** Groundwater quality assessment using water quality index (WQI) under GIS framework. *Applied Water Science*, 11(2), 1–20.
- Rezag, N. (2010).** Diagnostic hydro agricole et stratégie de gestion des irrigations du périmètre irrigué du K'sob, W. de M'sila. ENSA.
- Richards, L. A. (1954).** Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. *Handbook*, 60.
- Rodier J. (2005).** L'analyse De L'eau ; Eaux Naturelles, Eaux Résiduelles, Eaux De Mer. (8ème édit).
- Rodier, J. (2009).** L'Analyse de l'eau 9e édition. Entièrement Mise À Jour Dunod, Paris.
- Rousseaux, P. (1988).** Les métaux lourds dans les ordures menageres: origines, formes, chimiques, teneures. Etude ANRED-Ministère de l'Environnement.
- Saeed, I. A. M., & El-Nadi, A. H. (1997).** Irrigation effects on the growth, yield, and water use efficiency of alfalfa. *Irrigation Science*, 17, 63-68.

Saoudi, M., & Aicha, F. Z. (2017). Evaluation des potentialités pastorales des zones arides. Université de M'sila.

Seltzer, P. (1946). Le climat de l'Algérie. Inst. Météor. Et de Phys-Du globe. Univ. Alger.

Servant, J. M. (1976). Sur quelques aspects de la pédogénèse en milieu halomorphe: l'exemple des sols salés de la région méditerranéenne française.

Shankar, K., Elangovan, G., Balamurugan, P., & Saravanan, R. (2022). Spatial distribution of Groundwater quality assessment using Water Quality Index and GIS techniques in Thanjavur Taluk, Thanjavur District, Tamil Nadu, India. *Int J Civ Environ Agric Eng*, 4(2), 32–58.

Shil, S., Singh, U. K., & Mehta, P. (2019). Water quality assessment of a tropical river using water quality index (WQI), multivariate statistical techniques and GIS. *Applied Water Science*, 9(7), 1–21.

Singh, S. K., & Noori, A. R. (2022). Groundwater quality assessment and modeling utilizing water quality index and GIS in Kabul Basin, Afghanistan. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(10), 1–19.

Smiler, R. (2003). Diagramme: Parkhurst, D. L., & Appelo, C. A. J. (1999). User's guide to PHREEQC (Version 2): A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. *Water-Resources Investigations Report*, 99(425). Avignon, France.

Soltner, D. (1981). Phytotechnie générale: Les bases de la production végétale: le sol, le climat, la plante. Tome 1: Le sol, 10^{eme} édition. Sciences et Techniques Agricoles, Angers, France.

Soltner, D. (1996). Les bases de la production végétale-Phytotechnie générale. Sciences et Techniques Agricoles, 21.

Soltner, D. (1999). Les bases de la production végétale, Tome III La plante et son amélioration. Sciences et Techniques Agricoles, SAINTE-GEMMES-SUR LOIRE.

Su, C. (2014). A review on heavy metal contamination in the soil worldwide: Situation, impact and remediation techniques. *Environmental Skeptics and Critics*, 3(2), 24.

Su, S., Zhi, J., Lou, L., Huang, F., Chen, X., & Wu, J. (2011). Spatio-temporal patterns and source apportionment of pollution in Qiantang River (China) using neural-based modeling and

multivariate statistical techniques. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 36(9–11), 379–386.

Surdyk, N., Cary, L., Blagojevic, S., Jovanovic, Z., Stikic, R., Vucelic-Radovic, B., Zarkovic, B., Sandei, L., Pettenati, M., & Kloppmann, W. (2010). Impact of irrigation with treated low quality water on the heavy metal contents of a soil-crop system in Serbia. *Agricultural Water Management*, 98(3), 451–457.

Tatar, H. (1985). Les Milieux et l'Occupation du Sol dans le Bassin Versant du K'sob. Thèse Doct.3e cycle, Université de Caen (France).106 p.

Uncumusaoglu, A. A., & Akkan, T. (2017). Assessment of Stream Water Quality Using Multivariate Statistical Techniques. *Polish Journal of Environmental Studies*, 26.(4)

USDA. (1975). Keys to soil taxonomy. Cornell University.

Van Dam, B., Goffau, M. de, van Lidt de Jeude, J., & Naika, S. (2005). La culture de la tomate: production, transformation et commercialisation.

WHO. (2003). Atrazine in drinking-water: background document for development of WHO guidelines for drinking-water quality. World Health Organization.

WHO. (2021). A global overview of national regulations and standards for drinking-water quality.

Wilcox, Lv. (1955). Classification and use of irrigation waters (Issue 969). US Department of Agriculture.

Yesilnacar, M. I., & Gulluoglu, M. S. (2008). Hydrochemical characteristics and the effects of irrigation on groundwater quality in Harran Plain, GAP Project, Turkey. *Environmental Geology*, 54(1), 183–196.