

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITÉ KASDI MERBAH-OUARGLA

Année 2024



N° d'enregistrement :
/...../...../...../...../

FACULTE DES HYDROCARBURES, ENERGIES RENOUVELABLE
ET SCIENCE DE LA TERRE

DÉPARTEMENT DE SCIENCE DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

THESE

Présentée pour obtenir le Diplôme de **Doctorat en Sciences**

Spécialité : **Géologie**

**Impact des eaux d'irrigation sur les sols des
périmètres irrigués dans la région de Ouargla
(modélisation et implication sur la gestion
des ressources hydriques et édaphiques)**

Présentée et soutenue publiquement

par :

M. Mohammed Hicham BOUTELLI

le 20/02/ 2024

Devant le jury composé de :

M. BELKSIER Med Salah	MCA	Univ.K.M – Ouargla.	Président
M. ZEDDOURI Aziez.	Professeur	Univ.K.M – Ouargla.	Directeur de Thèse.
M. ZEGAIT Rachid	MCA	Univ.K.M – Ouargla.	Examineur
M.AZLAOUI Mohamed	MCA	Univ Z.A – Djelfa	Examineur
M.BOUBELLI Salim	MCA	Univ – Ghardaïa	Examineur
M.BOUZNAD I. Eddine	MCA	Univ 8 May 1945 –Guelma	Examineur

Table de Matières

<i>Liste des figures</i>	<i>vi</i>
<i>Liste des graphiques</i>	<i>vii</i>
<i>Liste des Tableaux</i>	<i>ix</i>
<i>Dédicace</i>	<i>x</i>
<i>Remerciements</i>	<i>xi</i>
<i>Résumé</i>	<i>xii</i>
<i>ملخص</i>	<i>xvii</i>
<i>Abstract</i>	<i>xix</i>
INTRODUCTION GENERALE	- 1 -
I.1. Introduction :	- 5 -
I.2. Sols salés et salinisation des sols	- 5 -
I.2.1. TERRES ET LEUR SALINISATION LE MONDE ET EN ALGERIE	- 5 -
I.2.2. DEFINITION DE LA SALINISATION	- 7 -
I.2.3. LA SALINITE	- 7 -
I.2.4. TYPES DE SALINISATION DU SOL ET COMPREHENSION DES MECANISMES	- 7 -
I.2.4.1. Salinisation	- 8 -
a) La primaire ou naturelle Salinisation	- 8 -
b) La secondaire Salinisation	- 8 -
c) Salinité globale	- 9 -
I.2.4.2. Sodisation	- 9 -
a) Sodicité	- 9 -
b) Alcalinisation	- 9 -
b-1) Alcalinité :	- 10 -
I.2.5. CLASSES DES SOLS SALES	- 10 -
I.2.5.1. Sols salins :	- 11 -
I.2.5.2. Sols salins à alcalins :	- 11 -
I.2.5.3. Sols alcalins :	- 11 -
I.2.6. MOYENS DE PROTECTION DU SOL CONTRE LA SALINISATION	- 12 -
I.2.7. AMENAGEMENT ET RESTAURATION DES SOLS SALINS	- 12 -
I.2.7.1. Drainage	- 12 -
I.2.7.2. Lessivage	- 13 -
I.2.7.3. Amendement en sable	- 13 -
I.3. Principaux sels solubles	- 13 -
I.3.1. CHLORURES	- 13 -
I.3.2. SULFATES	- 14 -
I.3.3. CARBONATES	- 14 -
I.4. Solubilité des sels	- 15 -
I.4.1. TEMPERATURE :	- 15 -
I.4.2. FORCE IONIQUE	- 15 -
I.4.3. LE PH	- 16 -
I.4.4. PRESENCE D'AUTRES SELS	- 16 -
I.5. Les sels solubles et leurs mouvements dans le sol	- 16 -
I.5.1. LA LIXIVIATION	- 16 -
I.5.2. LA CAPILLARITE	- 16 -
I.5.3. THERMODIALYSE	- 16 -
I.6. Impact des sels dissous sur le sol	- 17 -

I.6.1. AU NIVEAU DE SA STRUCTURE	- 17 -
I.6.2. AU NIVEAU DE LA PERMEABILITE	- 17 -
I.6. Conclusion.....	- 17 -
II.1. Introduction	- 19 -
II.2. Définition de l'irrigation :.....	- 19 -
II.3. L'irrigation dans le monde.....	- 19 -
II.4. Inconvénients et Avantages.....	- 20 -
II.4.1. LES AVANTAGES	- 20 -
a) Augmentation de la production.....	- 20 -
b) Protection et préservation des milieux	- 20 -
c) Elargissement des champs et la diversification des produits	- 20 -
d) Assurance de la sécurité alimentaire	- 20 -
II.4.2. LES INCONVENIENTS.....	- 21 -
a) Problème de dégradation des sols agricoles	- 21 -
b) La consommation excessive de l'eau	- 22 -
c) La réduction des réserves d'eau	- 22 -
d) Les pertes dues aux techniques traditionnelles	- 22 -
e) Assèchement des milieux aquatiques	- 23 -
II.5. L'irrigation en Algérie	- 23 -
II.6. l'irrigation et leurs impacts dans la région de Ouargla.....	- 24 -
II.6.1. DEGRADATION DU SOL DE OUED RIGH ET DE OUARGLA	- 25 -
II.7. Conclusion :.....	- 26 -
I.1. Introduction.....	- 27 -
I.2. Situation géographique :	- 27 -
I.3. Contexte géologique.....	- 28 -
I.4. Contexte hydrogéologique :.....	- 30 -
I.4.1. CONTINENTAL INTERCALAIRE (CI).....	- 32 -
I.4.2. COMPLEXE TERMINAL (CT).....	- 33 -
I.5. Conclusion :	- 34 -
II.1. Introduction :.....	- 36 -
II.2. Données climatologiques.....	- 36 -
II.2.1. TEMPERATURES	- 36 -
II.2.2. PLUVIOMETRIE	- 37 -
II.2.2.1. Diagramme pluviothermique	- 38 -
II.2.2.2. Quotient pluviothermique de Louis Emberger :	- 39 -
II.2.3. HUMIDITE RELATIVE DE L'AIR.....	- 40 -
II.2.4. EVAPORATION	- 41 -
II.2.5. VITESSE DE VENT	- 42 -
II.3. Conclusion	- 43 -
I.1. Introduction :	- 44 -
I.2. Présentation des Sites expérimentaux.....	- 44 -
I.3. Echantillonnage du sol et de l'eau d'irrigation.....	- 45 -
I.4. Données hydrochimiques.....	- 46 -
I.4.1. ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES :	- 47 -

I.5. Outils informatiques	- 48 -
I.6. Méthodes de prélèvement et d'analyse :.....	- 48 -
I.6.1. SORTIES DE PROSPECTION :	- 48 -
I.6.2. CARACTERISATION DES EAUX ET SOLS	- 49 -
I.6.2.1. Humidité résiduelle des échantillons du sol	- 49 -
I.6.2.2. Analyses granulométrique	- 49 -
a) Coefficient d'uniformité	- 49 -
b) Coefficient de courbure	- 49 -
I.6.2.3. Extraction de la solution du sol	- 50 -
I.6.2.3.1. Préparation de l'extrait dilué 1/5	- 50 -
I.6.2.4. Dosage du calcaire	- 51 -
I.6.2.5. Le gypse.....	- 51 -
I.6.2.6. Conductivité électrique et le pH	- 52 -
I.6.2.7. Dosage des anions	- 52 -
a) Les Chlorures	- 52 -
b) Les Sulfates	- 52 -
c) Carbonates et bicarbonates.....	- 53 -
I.6.2.7. Dosage des cations	- 53 -
a) Sodium et potassium	- 53 -
b) Calcium et Magnésium.....	- 54 -
I.6.2.8. Résidu sec.....	- 54 -
I.7. Conclusion.....	- 54 -
II.1. Résultats des mesures et des analyses.....	- 55 -
II.1.1. INTRODUCTION	- 55 -
II.1.2. DONNEES HYDROCHIMIQUES	- 55 -
II.1.2.1. Paramètres physiques	- 55 -
II.1.2.2. Electrolytes minéraux.....	- 55 -
a) Calcium (Ca ²⁺) et magnésium (Mg ²⁺).....	- 56 -
b) Sodium (Na ⁺) et Potassium (K ⁺)	- 56 -
c) Chlorure (Cl ⁻) et Sulfates (SO ₄ ²⁻).....	- 57 -
d) Bicarbonates (HCO ₃ ⁻).....	- 57 -
e) Indices de saturation :	- 58 -
II.1.2.3. CONCLUSION	- 59 -
II.1.3. RESULTATS D'ANALYSES DU SOL	- 59 -
II.1.3.1. Analyse granulométrique	- 59 -
II.1.3.2. Analyse physicochimique	- 60 -
II.1.3.2.1. Paramètres physiques	- 61 -
II.1.3.2.2. Electrolytes minéraux.....	- 61 -
a) Calcium (Ca ²⁺) et magnésium (Mg ²⁺)	- 62 -
b) Sodium (Na ⁺) et Potassium (K ⁺)	- 62 -
c) Chlorure (Cl ⁻) et Sulfates (SO ₄ ²⁻)	- 62 -
d) Bicarbonates (HCO ₃ ⁻).....	- 63 -
e) SAR et ESP	- 63 -
II.1.3.1. Conclusion	- 64 -
II.2. Interprétations et discussions des résultats	- 64 -
II.2.2. CARACTERISTIQUES GRANULOMETRIQUES DU SOL	- 65 -
II.2.2.1. Classes Granulométriques.....	- 65 -
II.2.2.2. Faciès et analyse des courbes granulométriques.....	- 65 -
II.2.2.3. Comportement sédimentaire du sable.....	- 68 -
II.2.2.4. Texture du sol.....	- 70 -
II.2.2. CARACTERISATION DE LA SALURE DES SOLS	- 71 -
II.2.2.1. La conductivité électrique	- 71 -
II.2.2.2. Le pH	- 74 -
II.2.2.3. Gypse et calcaire	- 75 -
II.2.2.4. Faciès géochimique du sol.....	- 76 -
a) Les anions	- 76 -

a) Les cations	- 76 -
II.2.2.5. Classification des sols salés	- 77 -
II.2.2.6. Conclusion	- 79 -
II.2.3. ETUDE DE LA MINERALISATION DES EAUX D'IRRIGATION	- 80 -
II.2.3.1. Diagramme ($Mg^{2+}/Na^+ : SO_4^{2-}/Cl^-$).....	- 81 -
II.2.3.2. Diagramme de Chadha	- 82 -
II.2.3.3. Corrélations entre les éléments majeurs.....	- 83 -
a) Ions majeurs Vis-à-vis aux sulfates et bicarbonates	- 83 -
b) Chlorures et sodium	- 88 -
II.2.3.4. Relation de la CE et les anions majeurs.....	- 91 -
II.2.3.5. Processus d'échanges de bases :	- 93 -
II.2.3.5.1. Indice d'échange de bases (i.e.b)	- 93 -
II.2.3.6. Interaction eaux sédiments	- 96 -
II.2.3.7. Diagramme de concentration	- 98 -
II.2.3.8. Equilibre sels/solution et comportement des ions	- 99 -
II.3. Conclusion	- 100 -
III.1. Introduction.....	- 100 -
III.2. Indice de qualité :	- 100 -
A) TAUX D'ADSORPTION DU SODIUM (SAR)	- 101 -
B) CONDUCTIVITE ELECTRIQUE (CE)	- 104 -
C) EVOLUTION DE LA CONDUCTIVITE PAR RAPPORT AU SAR	- 105 -
D) POURCENTAGE DE MAGNESIUM (%MG) :	- 107 -
E) POURCENTAGE EN SODIUM (%NA) :	- 108 -
F) EVOLUTION DE LA CONDUCTIVITE PAR RAPPORT AU %NA	- 109 -
G) INDICE DE PERMEABILITE (IP) :	- 111 -
H) RAPPORT DE KELLY (KR)	- 112 -
I) SALINITE POTENTIELLE (SP) :	- 114 -
J) CARBONATE DE SODIUM RESIDUEL (RSC) :	- 115 -
III.3. Evaluation globale de la qualité :	- 116 -
III.4. Conclusion.....	- 120 -
CONCLUSION GENERALE.....	- 121 -
RECOMMANDATIONS.....	- 123 -
Références bibliographiques	- 123 -

Liste des figures

Figure n°1 : classification des terres dégradées étaient établies en fonction de la gravité des pressions anthropiques et des tendances à la détérioration en 2015 (FAO. 2021) - 6 -

Figure n°2 : Situation géographique et découpage administratif de la wilaya de Ouargla selon la loi no 84-09 du 4 février 1984 de réorganisation du territoire algérien..... - 27 -

Figure n°3 : la géologie régionale de la région d'étude (a) : les domaines géologique aux territoires algériennes (WEC 2007) ; (b) : les affleurements géologique du Sahara. (OSS 2003)..... - 28 -

Figure n°4 : Espaces de référence identitaire saharienne de l'Algérie..... - 29 -

Figure n°5 : Coupe transversale illustrant la structure géologique à travers le Sahara - 30 -

Figure n°6 : Carte hydrogéologique du système aquifère CI et CT (UNESCO 1972) - 31 -

Figure n°7 : Représentation cartographique établie à l'état stationnaire de la piézométrie référence du Continental intercalaire (OSS 2003)..... - 32 -

Figure n°8 : Représentation cartographique établie à l'état stationnaire de la piézométrie référence du Complexe terminal (OSS 2003)..... - 34 -

Figure n°9 : situation géographique des périmètres étudiés Image extraite de Google Earth le 30/10/2018..... - 44 -

Figure n°10 : photos au sein des périmètres étudiés dans la région de Ouargla (a : périmètre El-Wifak ; b : périmètre des jeunes) - 45 -

Figure n°11 : photos présente la réalisation des sondages du sol au niveau des périmètres étudiés dans la région de Ouargla. - 45 -

Figure n° 12 : photos présente la réalisation des sondages du sol au niveau des périmètres étudiés dans la région de Ouargla (a : Eau Mio-pliocène ; b : Eau albienne). - 46 -

Figure n°13 : répartition des forages étudiés du CI et CT au niveau de la région étudiée - 47 -

Figure n° 14 : Agitation et filtration de l'extrait dilué 1/5 - 51 -

Figure n°15 : processus de mesure du calcaire..... - 51 -

Figure n°16 : mesure de la teneur en chlorures par le spectrophotomètre DR 2800..... - 52 -

Figure n° 17 : mesure de la teneur en Carbonates et bicarbonates par la Méthode volumétrique de TAC et TA..... - 53 -

Figure n°18 : mesure de la teneur en Sodium et potassium par la photométrie à flamme Dr LANGE (JENWAY)..... - 53 -

Figure n°19 : mesure de la teneur en calcium et en magnésium par la Méthode volumétrique..... - 54 -

Figure n°20 : La répartition spatiale du SAR des eaux d'irrigation. (a) eau albienne (CT) ; (b) eau Mio-pliocène (CI)..... - 103 -

Figure n°21 : La répartition spatiale de la conductivité électrique CE des eaux d'irrigation. - 105 -

Figure n°22: La répartition spatiale du pourcentage en magnésium (%Mg) des eaux d'irrigation. (a) eau albienne (CI) ; (b) eau Mio-pliocène (CT). - 108 -

Figure n°23 : La répartition spatiale du pourcentage en sodium (%Na) des eaux d'irrigation. - 111 -

Figure 24: La répartition spatiale de l'indice de perméabilité (IP) (%Na) des eaux d'irrigation. (a) eau albienne (CI) ; (b) eau Mio-pliocène (CT). - 112 -

Figure n° 25: La répartition spatiale du Rapport de Kelly (KR) des eaux d'irrigation..... - 113 -

Figure n°26: La répartition spatiale de la salinité potentielle (SP) des eaux d'irrigation. - 114 -

Figure n° 27: La répartition spatiale du carbonate de sodium résiduel (RSC) des eaux d'irrigation. (a) eau albienne (CI) ; (b) eau Mio-pliocène (CT). - 115 -

Figure n°28: La carte finale de la qualité de l'eau d'irrigation Mio-pliocène dans la région de Ouargla - 118 -

Figure n°29: La carte finale de la qualité de l'eau d'irrigation Albienne dans la région de Ouargla - 119 -

Liste des graphiques

Graphique n°1: Variation de la moyenne mensuelle des températures dans la région d'Ouargla a été observée sur la période allant de 1996 à 2016. - 37 -

Graphique n°2 : Variation de la moyenne annuelle des températures dans la région d'Ouargla a été observée sur la période allant de 1996 à 2016. - 37 -

Graphique n°3 : Variation de la précipitation mensuelle maximale de la région de Ouargla pendant la période d'observation de 1996 à 2016..... - 38 -

Graphique n°4 : Variation de la précipitation annuelle cumulée de la région de Ouargla pendant la période d'observation de 1996 à 2016..... - 38 -

Graphique n°5 : La représentation graphique de diagramme Ombrothermique de Gaussen et Bagnouls pour Ouargla en 2004, l'année la plus pluvieuse..... - 39 -

Graphique n°6 : Climagramme d'Emberger définissant l'étage bioclimatique de la région étudiée selon les données mesurées de la station météorologique d'Ain El-Beida (1996-2016). - 40 -

Graphique n°7 : Variation de l'humidité moyenne relative de l'air dans la région de Ouargla pendant la période d'observation de 1996 à 2016..... - 41 -

Graphique n°8 : Variation de l'évaporation dans la région de Ouargla pendant la période d'observation de 1996 à 2016..... - 41 -

Graphique n°9 : Variation de l'évaporation annuelle dans la région de Ouargla pendant la période d'observation de 1996 à 2016..... - 42 -

Graphique n°10 : Variation de la vitesse du vent dans la région de Ouargla pendant la période d'observation de 1996 à 2016..... - 43 -

Graphique n°11 : Répartition des différentes catégories granulométriques de sable dans les zones étudiées..... - 65 -

Graphique n°12 : Courbes granulométriques du périmètre El-Wifak..... - 67 -

Graphique n°13 : Courbes granulométriques du périmètre les jeunes..... - 68 -

Graphique n°14 : Comportement sédimentaire du sable fin dans les périmètres étudiés - 69 -

Graphique n°15 : Comportement sédimentaire du sable grossier dans les périmètres étudiés - 69 -

Graphique 16 Catégorie sédimentaire du sable au niveau des périmètres étudiés pour trois niveaux de sondage (niveau de surface et médian et de profondeur) ; (a : périmètre El-Wifak ; b : périmètre des jeunes)..... - 70 -

Graphique n°17 : Diagramme de texture des sols étudiés..... - 71 -

Graphique n°18 : Evolution de la CE des sols en fonction de rapport ionique Cl^-/SO_4^{2-} - 72 -

Graphique n°19 : Evolution de la CE de la somme (Cl^-+Na^+)..... - 72 -

Graphique n°20 : Variation de la conductivité électrique (CE) des sols en fonction de la profondeur du sondage - 73 -

Graphique n°21 : Evolution du pH des sols en relation avec la profondeur - 74 -

Graphique n°22 : Evolution du taux de gypse des sols en fonction du rapport (SO_4^{2-}/Ca^{2+}) - 75 -

Graphique n°23 : Caractéristiques géochimiques du sol analysé basées sur les rapports Ca^{2+}/Na^+ et SO_4^{2-}/Cl^- - 77 -

Graphique n°24 : Classification des sols salés au niveau des périmètres selon la CE et ESP..... - 78 -

Graphique n°25 : Abaissement du SAR en fonction de la somme de Ca^{2+} et Mg^{2+} - 79 -

Graphique n°26 : Degré d'alcalinisation de du sol pour les deux périmètres étudiés - 79 -

Graphique n° 27 : Faciès géochimiques de l'eau Mio-pliocène et Albienne par les rapports Mg^{2+}/Na^+ et SO_4^{2-}/Cl^- - 81 -

Graphique n°28 : Diagramme Chadha pour les faciès chimiques des eaux des aquifères étudiés dans la région de Ouargla..... - 82 -

Graphique n°29 : Corrélacion de concentration SO_4^{2-} vis-à-vis de Mg^{2+} - 83 -

Graphique n°30 : Corrélacion de concentration SO_4^{2-} vis-à-vis de Ca^{2+} - 84 -

Graphique n°31 : Corrélacion de concentration SO_4^{2-} vis-à-vis de IS de gypse - 84 -

Graphique n°32 : Corrélacion de concentration SO_4^{2-} vis-à-vis du Na^+ - 84 -

Graphique n°33 : Corrélacion de concentration SO_4^{2-} vis-à-vis au Cl^- - 85 -

Graphique n°34 : Corrélacion de la concentration SO_4^{2-} vis-à-vis aux HCO_3^- - 85 -

Graphique n°35 : Corrélacion entre les concentrations HCO_3^- vis-à-vis au Ca^{2+} - 86 -

Graphique n°36 : Corrélacion entre les concentrations HCO_3^- vis-à-vis du Mg^{2+} - 86 -

Graphique n°37 : Corrélacion du rapport (SO_4^{2-}/Cl^-) vis-à-vis du ($1/Cl^-$) - 87 -

Graphique n°38 : Évolution du rapport (SO_4^{2-}/Cl^-) vis-à-vis au ($1/Ca^{2+}$)..... - 87 -

Graphique n°39 : Corrélation en Cl^- vis-à-vis au $(Na^+ + K^+)$ dans les eaux d'irrigation à la région de Ouargla	- 88 -
Graphique n°40 : Relations entre sodium et le chlore dans les eaux d'irrigation souterraines à la région de Ouargla.....	- 89 -
Graphique n°41 : Corrélations entre le Ca^{2+} en fonction du Na^+ dans les eaux d'irrigation souterraines dans la région de Ouargla	- 90 -
Graphique n°42 : Corrélations entre le Ca^{2+} en fonction du Cl^+ dans les eaux d'irrigation souterraines dans la région de Ouargla	- 90 -
Graphique n°43 : Processus chimique des échanges cationique de Cl et CT dans la région de Ouargla	- 91 -
Graphique n°44 : La relation entre la CE et le rapport carbonates/évaporites dans les eaux d'irrigation à la région de Ouargla (a : la nappe Miopliocène ; b : la nappe albienne).....	- 92 -
Graphique n°45 : La relation entre la CE et le rapport Cl / SO_4^{2-} dans les eaux du d'irrigation à la région de Ouargla (a : la nappe Miopliocène ; b : la nappe albienne).....	- 93 -
Graphique n° 46 : Evolution de l'i.e.b, dans les eaux d'irrigation dans la région de Ouargla (a : la nappe Miopliocène ; b : la nappe albienne).....	- 95 -
Graphique n°47 : Mise en valeur les échanges fondamentaux avec la relation entre $[Ca^{2+} + Mg^{2+} - HCO_3^- - SO_4^{2-}]$ et $[Na^+ + K^+ - Cl^-]$ dans les eaux du Miopliocène et du l'albien.....	- 96 -
Graphique n°48 : Indice de saturation vis-à-vis aux principaux minéraux (carbonatés/sulfatés) ...	- 97 -
Graphique n°49 : Evolution des concentrations des éléments majeurs en fonction du facteur de concentration dans l'eau d'irrigation de la nappe Miopliocène	- 98 -
Graphique n°50 : Evolution de l'indice de saturation des minéraux dans l'eau Miopliocène en fonction du facteur de concentration.	- 99 -
Graphique n°51: Evolution de la conductivité par rapport au pouvoir alcalinisant (SAR) selon le diagramme de log Wilcox.....	- 106 -
Graphique n°52: Evolution de la conductivité par rapport au pourcentage de Na (%Na) selon le diagramme de Wilcox.....	- 110 -

Liste des Tableaux

Tableau n°1: SAR et degrés d'alcalinisation des sols (Servant 1975)..... - 10 -

Tableau n°2 : Propriétés des diverses classe de sols salés (Daoud et Halitim 1994) - 12 -

Tableau °3 : Solubilité maximum des principaux sels dans l'eau en g/1000 cm³ - 15 -

Tableau n°4 : Données climatiques de Ouargla sur la période d'observation (1996-2016) (ONM 2016) - 36 -

Tableau n°5 : Définition de type de climat de Ouargla selon l'indice Emberger sur la période d'observation (1996-2016)..... - 40 -

Tableau n°6 : Localisation des sondages au niveau des périmètres..... - 47 -

Tableau n°7 : Résultats d'analyses des paramètres physiques des forages choisis au niveau de la wilaya d'Ouargla pour les deux nappes étudiées - 55 -

Tableau n°8 : Résultats d'analyses de Calcium (Ca²⁺) et magnésium (Mg²⁺) des forages choisis au niveau de la wilaya de Ouargla pour les deux nappes étudiées - 56 -

Tableau n°9 : Résultats d'analyses de Sodium (Na⁺) et Potassium (K⁺) des forages choisis au niveau de la wilaya d'Ouargla pour les deux nappes étudiées..... - 56 -

Tableau n°10 : Résultats d'analyses de Chlorure (Cl⁻) et Sulfates (SO₄²⁻) des forages choisis au niveau de la wilaya d'Ouargla pour les deux nappes étudiées..... - 57 -

Tableau n°11 : Résultats d'analyses de bicarbonates (HCO₃⁻) des forages choisis à Ouargla pour les deux nappes étudiées..... - 58 -

Tableau n°12 : Résultats des IS pour les deux nappes étudiées..... - 58 -

Tableau n°13 : Catégories granulométrique des sables aux différents sondages..... - 60 -

Tableau n°14 : Type de la granulométrie du sable pour les deux périmètres - 60 -

Tableau n°15 : Résultats analytiques des paramètres physiques du sol des différents sondages..... - 61 -

Tableau n°16 : Résultats d'analyses de Calcium (Ca²⁺) et magnésium (Mg²⁺) des sols au niveau des périmètres étudiés - 62 -

Tableau n°17 : Résultats d'analyses de Sodium (Na⁺) et Potassium (K⁺) des sols au niveau des périmètres étudiés - 62 -

Tableau n°18 : Résultats d'analyses de Chlorure (Cl⁻) et Sulfates (SO₄²⁻) des sols au niveau des périmètres étudiés - 63 -

Tableau 19 Résultats de teneurs en bicarbonates (HCO₃⁻) des sols au sein des périmètres étudiés- 63 -

Tableau n°20 : Résultats de calcul de SAR et ESP des sols au sein des périmètres étudiés..... - 63 -

Tableau n°21 : Résultats de calcul des différents indices de qualité de l'eau d'irrigation dans la région de Ouargla - 101 -

Tableau n°22 : Qualité des eaux d'irrigation selon l'indice SAR..... - 102 -

Tableau n°23 : Qualité des eaux d'irrigation selon la conductivité (CE) - 104 -

Tableau n°24: Qualité des eaux d'irrigation selon le couplement SAR et CE..... - 105 -

Tableau n°25: Qualité des eaux d'irrigation selon l'indice (%Mg) - 107 -

Tableau n°26: Qualité des eaux d'irrigation selon le pourcentage en sodium (%Na) - 109 -

Tableau n°27: Qualité des eaux d'irrigation selon l'indice de perméabilité (IP) - 111 -

Tableau n°28: Qualité des eaux d'irrigation selon l'indice de rapport de Kelly (KR)..... - 113 -

Tableau n°29: Qualité des eaux d'irrigation selon l'indice de salinité potentielle (SP) - 114 -

Tableau n°30: Qualité des eaux d'irrigation selon le carbonate de sodium résiduel (RSC)..... - 115 -

Tableau n°31. Evaluation qualitatif globale des eaux d'irrigation de la région de Ouargla..... - 116 -

Dédicace

Je dédie ce travail à l'âme de mon père que je regrette profondément. Je prie Allah de lui accorder Sa miséricorde et d'illuminer sa tombe

À ma chère mère, que je prie Allah de préserver et de prolonger sa vie.

À mon épouse, qui m'a soutenu et encouragé dans les moments difficiles.

À mes chères filles Mayar, Djihane, Riham et Hadil et à mon cher fils Mohamed Mouhab

À mes chères sœurs et à mes chers frères

À mes chères amies Salah, Aïmed, Slimane, Zouhir, Taïb...

Mohammed Hicham BOUTELLI

Remerciements

Cette thèse n'aurait pu voir le jour sans la contribution précieuse de plusieurs individus que je tiens à remercier sincèrement. En premier lieu, je souhaite exprimer ma profonde gratitude envers mon directeur de thèse, le Professeur Aziez Zeddori, responsable du Laboratoire des réservoirs souterrains pétroliers, gaziers et aquifères à l'Université Kasdi Merbah Ouargla. Il m'a honoré en supervisant, guidant, corrigeant et enrichissant ce travail de recherche.

Je tiens également à remercier chaleureusement le président du jury d'expertise et les membres respectés du jury qui ont accepté de juger et d'évaluer cette thèse. Mes remerciements vont également à M. Bordji Essadek, technicien en agronomie et agriculteur dans les zones étudiées, qui nous a généreusement ouvert les portes de son domaine et nous a accompagnés lors de la collecte d'échantillons et de la prospection des zones agricoles.

Je suis reconnaissant envers M. ZEGDOU Madani, ingénieur d'État et chef du Bureau de la base de données au service d'hydraulique agricole à la Direction des ressources en eau de la wilaya de Ouargla, pour son accueil bienveillant et pour avoir facilité notre accès aux archives des études et des données relatives aux forages agricoles. Les recherches approfondies, la collecte de données et l'analyse des échantillons n'auraient pas été possibles sans la collaboration du personnel de la Direction des ressources en eau de la wilaya de Ouargla, du laboratoire de l'Algérienne des eaux et du laboratoire de travaux publics du Sud (LTPS), et je leur adresse mes sincères remerciements.

Je souhaite exprimer ma gratitude envers ma famille, ma mère, mes frères et mes sœurs, pour leur soutien indéfectible tout au long de mon parcours. Chacun d'entre eux mérite ma reconnaissance personnelle. Je suis également reconnaissant envers ma femme, qui a partagé avec moi les hauts et les bas que nous avons traversés durant mon doctorat et qui ne m'a jamais découragé, mais au contraire, m'a encouragé à aller jusqu'au bout de cette thèse.

Je tiens à remercier du fond du cœur mes collègues Aïmed SALHI, Salah Eddin BENECHIKH, Slimane KHOULDI, Lazhari ZOUAOUID et Taïb BOULAMAIZ, qui m'ont soutenu moralement et intellectuellement tout au long de ce processus.

Enfin, mes remerciements vont à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de cette thèse.

Mohammed Hicham BOUTELLI

Résumé

L'utilisation de l'irrigation par les eaux souterraines est incontournable pour la plupart des cultures dans les régions arides, où l'évaporation est élevée et les précipitations sont rares et irrégulières. Cependant, cette pratique peut avoir des conséquences préjudiciables à long terme sur la qualité de l'eau et favoriser le développement de processus tels que la sodisation, la salinisation ou l'alcalinisation des sols.

Le présent travail a été réalisé au niveau des périmètres agricoles représentatifs irrigués dans la commune de Hassi Ben Abdallah à la région d'Ouargla par les eaux de la nappe Mio-pliocène et albiennne. Les principaux objectifs de ce travail sont :

- L'évaluation de l'impact de l'utilisation de ces eaux en irrigation. Dans ce contexte, un diagnostic détaillé de la situation actuelle de ces périmètres a été réalisé à travers une campagne d'échantillonnage et une analyse de l'eau et du sol.
- L'évaluation de la qualité physico-chimique des eaux souterraines utilisées en irrigation dans la région de Ouargla avec l'établissement d'une cartographie spatiale des différents indices de qualité de ces eaux

La spatialisation permettra d'établir des modèles de classification de ces ressources selon leur qualité et leur aptitude à l'irrigation. Pour cela, nous avons collecté les analyses physico-chimiques de 38 forages d'eau d'irrigation bien répartie sur la totalité de territoire de la région étudiée, 27 forages captent la nappe Mio-pliocène (CT) et 11 forages de la nappe albiennne (CI). Les cartes thématiques ont été créées en utilisant un système d'information géographique (SIG) pour examiner et comparer la répartition spatiale de ces indices.

La caractérisation physique et pédologique du sol a montré que le sol des périmètres étudiés, est un sol de texture sableuse, ce qui permet de dire que notre sol est filtrant et drainant caractérisé par une forte perméabilité mais à faible capacité de rétention. Ce sol est pauvre en matière organique. La caractérisation chimique du sol indique une valeur moyenne de pH pour les différents échantillons est proche de celle de l'eau d'irrigation. La Conductivité électrique (CE) est de 0,24 et 2,85 dS/m. à travers cette étude nous avons remarqué qu'il y a un processus de transfert des sels entre l'eau d'irrigation et le sol.

L'étude qualitative de eaux Mio-pliocène utilisées à des fins d'irrigation, démontre que ces ressources, se classent dans trois catégories (bonne ; admissible et médiocre pour l'irrigation). L'analyse de la qualité des eaux a montré que selon le taux de sodium (%Na), 74% des forages sont de moyenne qualité (admissible à l'irrigation), 7,41% des forages sont de qualité médiocre (inaptes pour l'irrigation). A partir de diagramme de Wilcox les eaux utilisées dans la wilaya de Ouargla sont totalement de mauvaises qualités. Une minéralisation très excessive, exprimée par la conductivité électrique, pour les eaux Mio-pliocènes, elle varie entre 2340 $\mu\text{S}/\text{m}$ et 6520 $\mu\text{S}/\text{m}$ et celles albiennes varie entre 2330 $\mu\text{S}/\text{m}$ et 3840 $\mu\text{S}/\text{m}$. cette conductivité présentent un grand danger d'alcalinisation.

Le faciès le plus dominant dans l'eau Mio-pliocène est chloruré sodique (81,48% des échantillons) et d'un degré moindre, un faciès secondaire chloruré magnésien (18,52% des échantillons), avec l'absence d'un faciès sulfaté magnésien. Pour l'eau d'irrigation albiennne le faciès les plus dominants est le chloruré sodique, il regroupe la majorité des échantillons.

Mots clés : Impact ; Irrigation ; Sol ; classification ; Indices ; qualité ; Périmètre, Ouargla.

ملخص

إن اللجوء إلى استخدام المياه الجوفية لسقي غالبية المحاصيل ضرورة حتمية في المناطق الجافة التي تتميز بالتبخّر الشديد وندرة الهطول وعدم انتظام الأمطار. مما يمكن أن يسبب تأثيرات ضارة قد تظهر على المدى الطويل، على المياه وعلى التربة من خلال ظاهرة التملح.

لقد تم إنجاز هذا البحث على مستوى المحيطات الفلاحية بمنطقة حاسي بن عبد الله بورقلة والتي تستخدم مياه الحوض الجوفي الميولبوسيني والبياني للسقي. أن الأهداف الرئيسية التي سطرت لهذا العمل هي كالآتي:

- ◀ تقييم أثر استخدام هذه المياه في السقي حيث تم إجراء تشخيص تفصيلي للوضع الحالي لهذه المناطق من خلال حملة أخذ العينات وتحليل المياه والتربة.
- ◀ تقييم الجودة الفيزيائية والكيميائية للمياه الجوفية المستخدمة في السقي بمنطقة ورقلة مع وضع خريطة مكانية لمؤشرات الجودة المختلفة لهذه المياه.

إن التحديد المكاني يسمح لنا بوضع نماذج لتصنيف لهذه الموارد المائية وفقا لجودتها ومدى ملاءمتها للسقي. ولهذا قمنا بجمع التحليلات الفيزيائية والكيميائية لـ 38 بئرًا من مياه السقي الموزعة على كامل أراضي المنطقة التي تمت دراستها، 27 بئرًا تلتقط طبقة المياه الجوفية الميولبوسانية و 11 بئرًا من طبقة المياه الجوفية الألبانية. وقد تم إنجاز الخرائط باستخدام نظام المعلومات الجغرافية بهدف دراسة ومقارنة التوزيع المكاني لهذه المؤشرات.

أظهر التوصيف الفيزيائي للتربة المدروسة أنها تربة ذات قوام رملي، ذات ترشيح عالي حيث انها تتميز بنفاذية عالية ولكن بقدرة احتفاظ منخفضة وفقيرة بالمواد العضوية. تشير الخصائص الكيميائية للتربة إلى أن متوسط قيمة الرقم الهيدروجيني للعينات المختلفة قريب من قيمته في مياه السقي. الناقلية الكهربائية تتغير من 0.24 إلى 2.85 ديسي سيمانس/م. ومن خلال هذه الدراسة لاحظنا أن هناك عملية انتقال للألاح بين المياه والتربة المسقية.

الدراسة النوعية للمياه المستخدمة لأغراض السقي باستخدام مجموعة من معايير الجودة بينت أن هذه المياه مصنفة إلى ثلاث فئات (مياه ذات نوعية جيدة، مقبولة وريئة للسقي). كما أظهر تحليل نوعية المياه أنه بحسب نسبة الصوديوم (%Na) على سبيل المثال لا الحصر، أن 74% من الآبار هي ذات جودة متوسطة (تعتبر صالحة للسقي)، و 7,41% من الآبار ذات نوعية رديئة (غير صالحة للسقي). حسب مخطط ويلكوكس، فإن المياه المستخدمة في ورقلة وضواحيها ذات نوعية رديئة تماما. ملوحة جد عالية، معبر عنها بقيم الناقلية الكهربائية، بالنسبة لمياه طبقة الميولبوسان، حيث تتراوح قيم الناقلية بين 2340 ميكروسيمنز/م و 6520 ميكروسيمنز/م وفي مياه الطبقة الألبانية تتراوح قيمتها بين 2330 ميكروسيمنز/م و 3840 ميكروسيمنز/م. تمثل هذه الناقلية العالية خطراً كبيراً لتملح التربة الزراعية.

أكثر السحنات السائدة في مياه الميولبوسين هي كلوريد الصوديوم (81,48% من العينات) وبدرجة أقل سحنات كلوريد المغنسيوم الثانوية (18,52% من العينات) مع عدم وجود سحنة كبريتات المغنسيوم. أما بالنسبة لمياه السقي في الألبان فإن كلوريد الصوديوم هي السحنة المهيمنة في أغلب العينات.

الكلمات المفتاحية: أثر، السقي، التربة، التصنيف، معايير، نوعية، المحيطات، ورقلة.

Abstract

The use of groundwater irrigation is essential for most crops in arid regions, where evaporation is high, and precipitation is rare and irregular. However, this practice can have long-term detrimental consequences on water quality, leading to processes such as sodification, salinization, or soil alkalization.

This study was conducted in the irrigated representative agricultural perimeters in the municipality of Hassi Ben Abdallah in the Ouargla region, utilizing water from the Mio-Pliocene and Albian aquifers. The main objectives of this study include:

- Evaluating the impact of using these waters for irrigation. A detailed assessment of the current situation of these perimeters was carried out through a sampling campaign and analysis of both water and soil.
- Assessing the physico-chemical quality of groundwater used for irrigation in the Ouargla region, along with establishing a spatial mapping of different water quality indices.

Spatial analysis will enable the establishment of classification models for these resources based on their quality and suitability for irrigation. For this purpose, physico-chemical analyses of 38 irrigation water wells were collected, well-distributed across the entire territory of the study region, with 27 wells tapping into the Mio-Pliocene aquifer (CT) and 11 wells from the Albian aquifer (CI). Thematic maps were created using Geographic Information System (GIS) to examine and compare the spatial distribution of these indices.

The physical and soil characterization showed that the soil in the studied perimeters is sandy, indicating a filtering and draining soil with high permeability but low retention capacity. The soil is also low in organic matter. Chemical characterization of the soil indicates that the pH values for different samples are close to those of the irrigation water. Electrical conductivity (EC) ranges from 0.24 to 2.85 dS/m. Through this study, a salt transfer process between irrigation water and soil was observed.

The qualitative study of waters used for irrigation shows that these resources fall into three categories (good, acceptable, and poor for irrigation). Water quality analysis based on sodium percentage (%Na) revealed that 74% of wells are of average quality (acceptable for irrigation), while 7.41% of wells are of poor quality (unsuitable for irrigation). According to the Wilcox diagram, waters used in the Ouargla region are of very poor quality, with excessive mineralization expressed by electrical conductivity. For Mio-Pliocene waters, it ranges from 2340 $\mu\text{S}/\text{m}$ to 6520 $\mu\text{S}/\text{m}$, and for Albian waters, it ranges from 2330 $\mu\text{S}/\text{m}$ to 3840 $\mu\text{S}/\text{m}$. This conductivity poses a significant risk of soil alkalization.

The dominant facies in the Mio-Pliocene water is chloride-sodium (81.48% of samples) and to a lesser extent, a secondary magnesium-chloride facies (18.52% of samples), with the absence of a magnesium sulfate facies. For Albian irrigation water, the dominant facies is sodium chloride, which comprises the majority of the samples.

Keywords: Impact; Irrigation; Soil; Classification; Index; Quality; Perimeter; Ouargla.



INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La stratégie de développement agricole repose sur la capacité à gérer, améliorer et étendre l'agriculture irriguée. Avec la croissance de l'industrie et de l'agriculture d'un côté, et l'augmentation de la population et de l'urbanisation de l'autre côté, la demande en eau augmente rapidement dans le Sahara algérien, caractérisé par un climat aride. Néanmoins, en raison des conditions climatiques défavorables et de la sécheresse persistante sur plusieurs années, l'irrigation devient indispensable dans les zones arides et semi-arides, qui couvrent 84 % de la superficie de l'Algérie (Chehema 2011), où les facteurs principaux affectant la productivité agricole comprennent la disponibilité des ressources en eau, leur qualité, ainsi que la salinité des sols. (Zid 1991). Le recour à l'irrigation est due au développement agricole dans ces régions. Par conséquent l'irrigation devient alors importante et nécessaire à toute mise en culture afin d'assurer la satisfaction alimentaires de la population croissante (Lahlou, Badraoui et al. 2002).

La culture de 15% des terres arables irriguées contribuent avec 35 à 40 % de la production mondiale de la nourriture. Pendant les 30 ans prochains, l'accroissement de la population mondiale imposera une augmentation de 60% aux pays en voie de développement et de 20% de la production alimentaire aux pays développés afin d'assurer les actuels niveaux de la consommation nutritive (Lahlou, Badraoui et al. 2002).

Avec plus de 90% de la consommation d'eau aux pays d'Afrique subsaharienne, l'agriculture sans conteste est le plus grand utilisateur par rapport de toutes les utilisations d'eau (Shiklomanov 2000). Les importants volumes d'eau apportés pour l'irrigation des espaces agricoles exigent un contrôle et une maîtrise de l'usage des ressources hydriques et édaphiques. L'irrégularité et la rareté de quantités annuelles que ce soit en ce qui concerne les ressources en eaux de surface ou les eaux souterraines ralentissent le développement et crée des problèmes et des difficultés pour gérer rationnellement les réserves en eau. Ceci a conduit les gestionnaires de ces ressources à prospecter et exécuter la réalisation plus de forages, de puits d'eau et d'ouvrages hydrauliques.

Deux grands aquifères emmagasinent d'importantes réserves en eau dans le Sahara septentrional, principalement le Complexe Terminal (CT) et le Continental Intercalaire (CI). Le développement de l'agriculture au Sahara algérien a conduit à l'évolution du nombre de forages et de exploitation, cette évolution a provoqué une augmentation des prélèvements de 0,6 milliard de m³ /an en 1970 à 1,5 milliards de m³/an en 2000 (OSS 2003). Les eaux souterraines continentales contiennent des sels minéraux solubles en raison des processus d'enrichissement

qui se produisent lors de leur passage à travers les formations géologiques. La principale source de ces sels provient des formations sédimentaires d'origine marine, où d'importantes quantités de sels solubles sont transportées par les flux d'eau (Marlet et Job, 2006).

L'impact de la qualité de l'eau d'irrigation sur les plantes et les cultures constitue une préoccupation majeure des planificateurs responsables de l'aménagement des territoires dans les zones arides (Landeau et Monition, 1977). Les eaux d'irrigation riches en sels peuvent fixer le sodium au niveau du milieu adsorbant au sein des sols irrigués, donc un processus de salinisation apparaît, avec ses conséquences possibles pour les caractéristiques du sol : La tendance de l'argile à se disperser, à la détérioration structurelle, à la perte de perméabilité et à l'asphyxie des plantes. La gravité de la salinisation dépend des caractéristiques du sol soumis à l'irrigation, de la qualité de l'eau, des conditions de leur fonctionnement et en particulier la performance et l'efficacité du drainage. Cependant, ces pratiques d'arrosage ont entraîné des changements dans les performances des sols et un accroissement du risque de salinisation. En Algérie, la salinité affecte plus de 20 % des sols irrigués. (Douaoui et Hartani, 2007) (Gouaidia, Guefaifia et al. 2013).

Néanmoins, l'irrigation mal contrôlée provoque des détériorations considérables de la qualité de l'eau et du sol. En effet, à la fois la quantité et qualité d'eau ont un impact significatif sur le sol et les cultures. Les sels solubles qui existent dans l'eau d'irrigation et l'effet d'évaporation de l'air dans les zones irriguées conduisent fréquemment à la salinisation des sols, en particulier dans les régions arides et semi-arides (Lahlou, Badraoui et al. 2002). D'ordre générale la primaire salinisation est associée à l'abondance naturelle des sels qui existent dans le sol à côté des océans, des mers et des gisements de sel,... etc, et La secondaire salinisation est principalement causée par la teneur en sel dans l'eau d'irrigation.

Cependant, la salinité excessive des eaux d'irrigation est l'un des problèmes qu'affronte l'évolution agricole dans les régions arides, cette salinité peut constituer un grand risque qui limite les réserves en eau et les surfaces sol agricoles. Ce phénomène, largement répandu, pose des problèmes particulièrement sérieux dans les zones arides et semi-arides. Les principaux objectifs énoncés dans le cadre de cette étude sont les suivants :

- Caractérisation de l'impact de la qualité des eaux Mio-pliocènes et albiennes utilisés en irrigation dans le sol agricole au niveau des nouveaux périmètres dans la zone de Ouargla.

- L'explication de l'origine du chimisme des eaux d'irrigation en contact avec la lithologie de l'aquifère faisant appel à une approche pluridisciplinaire, notamment hydrogéologique et hydrochimique pour la compréhension de l'hydrogéochimie de ces systèmes aquifères et leur fonctionnement à l'échelle de la zone étudiée.
- Modélisation Spatialisée de la qualité des eaux de ces systèmes aquifères et appréciation de leur aptitude à l'irrigation et par conséquent, leur impact sur l'environnement à l'aide des indices caractérisant les eaux d'irrigation qualitativement.

Le manuscrit de la présente thèse est réparti en trois parties subdivisées en chapitres, avec une introduction et une conclusion générale et recommandations. La thèse est présentée selon la structure suivante :

La première partie est la synthèse bibliographique représente : la salinisation et sodisation des sols et les sels solubles et l'irrigation et leur impact (subdivisé en chapitre I ; II) :

- CH I. Salinisation et sodisation du sol et les sels solubles : ce chapitre est basé sur une recherche bibliographique qui met la lumière sur la salinisation des espaces agricoles à l'échelle du globe et en Algérie et à l'échelle locale dans la région de Ouargla en raison de l'impact de cette salinisation sur la production et la durabilité agricoles. Dans ce chapitre on va essayer d'expliquer le mouvement des sels dans les sols et leur mode d'accumulation au sein d'un profil du sol dans l'espace et le temps.
- CH II. L'irrigation et leur impact : dans ce chapitre on essaye d'aborder la situation de l'irrigation en Algérie et localement, et leur influence sur les plantes et les cultures.

La deuxième partie est le cadre physique représente : la situation en terme de la géographie, de la géologie et de l'hydrogéologie et l'étude du climat de la région étudiée (subdivisé en chapitre I et II) :

- CH I. Géographie, géologie et hydrogéologie de la région : ce chapitre concerne l'étude géologique en basant sur les données relatives à la géologie régionale et locale et l'identification des données hydrogéologiques pour les deux aquifères (le complexe Terminal et le continentale intercalaire).
- CH II. Contexte climatologique : à travers ce chapitre on va caractériser le climat de Ouargla par l'utilisation des données climatologiques pendant une période d'observation de 20 ans.

La troisième partie consacrée pour les méthodologies et les résultats représente : le matériel utilisés et les méthodes à suivre avec les différentes résultats obtenues et leurs discussions et l'étude de l'aptitude des eaux à l'irrigation (subdivisé en chapitre I, II et III) :

- CH I. Dans ce chapitre est consacré pour la présentation du matériel et des méthodes utilisées pour l'analyse et le prélèvement des échantillons.
- CH II. Ce chapitre récapitule les résultats de différentes analyses réalisé sur le sol et des eaux d'irrigation et leurs discussions pour comprendre les processus d'acquisition de la minéralisation des eaux et son impact sur le sol.
- CH III. Pour évaluer la convenance des eaux à l'irrigation on va consacrer ce chapitre afin de modéliser spatialement qualitativement de ces eaux on utilisant des nombreux indices de qualité.

En conclusion, une synthèse générale récapitule les principaux résultats et aboutira à des recommandations de recherche.

PARTIE I

Synthèse bibliographique

- **CH.I Salinisation et sodisation des sols et Sels solubles**
- **CH. II Impact des eaux d'irrigation sur le sol**

CHAPITRE I
Salinisation et sodisation des sols
et sels solubles

I.1. Introduction :

La salinisation des sols est un enjeu d'importance mondiale (Legros. 2009) en raison de son impact sur la durabilité et la productivité agricoles. Les problèmes de salinité surviennent dans toutes les conditions climatiques et peuvent résulter à la fois d'actions naturelles et induites par l'homme (Zaman, Shahid et al. 2018). D'une manière générale, Les sols salins se trouvent naturellement dans tous les types climat et sur tous les continents. (Szabolcs. 1989), mais les régions les plus vulnérables sont généralement celles caractérisées par un climat aride à semi-aride où les précipitations sont insuffisantes pour répondre aux demande en eau des cultures et lessivent les sels minéraux hors de la zone racinaire. (Zaman, Shahid et al. 2018)

La surface terrestre de la terre est de $13,2 \times 10^9$ ha, mais seulement 7×10^9 ha sont arables, dont seulement $1,5 \times 10^9$ ha sont actuellement cultivés (Massoud 1981). Parmi les terres cultivées, environ 23% sont salines et 37% sont sodiques. Des estimations plus anciennes décrivaient 10 % du total des terres arables comme étant affectée par la salinité et la sodicité, avec des effets s'étendant à plus de 100 pays sur tous les continents. (Szabolcs. 1989) Un milliard d'hectares sur les $13,2 \times 10^9$ hectares du territoire est ainsi recouvert de sols salins et/ou sodiques, et entre 25% et 30% des terres irriguées sont salines et essentiellement commercialement improductives (Zaman, Shahid et al. 2018)

Les sols salés sont directement liés à des sources de salinité d'origine géologique (évaporites), hydrogéologique (eaux souterraines) ou liées à l'hydrologie (eau de mer). Les processus de formation des sols salés impliquent la redistribution des sels dans les paysages pédologiques par divers agents, tels que l'eau qui mobilise les sels sous forme dissoute, et le vent qui les transporte soit sous forme dissoute, soit cristallisée. (Chihoub et Meziani. 2020). Les cristaux de sel s'accumulent principalement dans les zones où les processus d'évaporation prévalent par rapport au climat environnant (Ranbir.1996). Les grandes dépressions endoréiques, telles que les chotts et les sebkhas, ainsi que les zones côtières marines comme les marais côtiers et les vasières, constituent des sites naturels propices à l'accumulation de sels.

I.2. Sols salés et salinisation des sols

I.2.1. Terres et leur salinisation le monde et en Algérie

Selon la FAO et les estimations les plus récentes, la salinité du sol prive chaque année jusqu'à 1,5 million d'hectares de terres de la production agricole (FAO. 2021). La salinisation a déjà touché au moins 400 millions d'hectares de terres et menace sérieusement une superficie équivalente. En quantité, son impact est considérable, d'autant plus que la surface cultivée totale

sur Terre ne dépasse que 1,5 milliard d'hectares (Legros. 2009). La salinisation des sols a deux origines, l'une naturelle, affecte 80% des terres salinisées, dites salinisation primaire, la seconde est d'origine anthropique, principalement due à l'irrigation, appelée salinisation secondaire. (FAO 2006) D'après la FAO (2002), la salinisation secondaire diminue la surface de terres arrosées de 1 à 2 % par année. Afin d'assurer des rendements maximaux, l'irrigation est une pratique étendue et assure un taux de 40 % de la production alimentaire au niveau du monde. Toutefois, elle engendre des risques, en effet, 21 % des terres irriguées souffrent, par la salinité et/ou par l'alcalinisation qui baissent leurs rendements. La salinisation se produit lorsqu'une évaporation élevée se combine avec un approvisionnement insuffisant d'eau d'irrigation riche en sels. Plus la sécheresse est grande, plus l'irrigation est importante pour l'agriculture et plus son utilisation devient risquée (Ruellan, Poss et al. 2008).

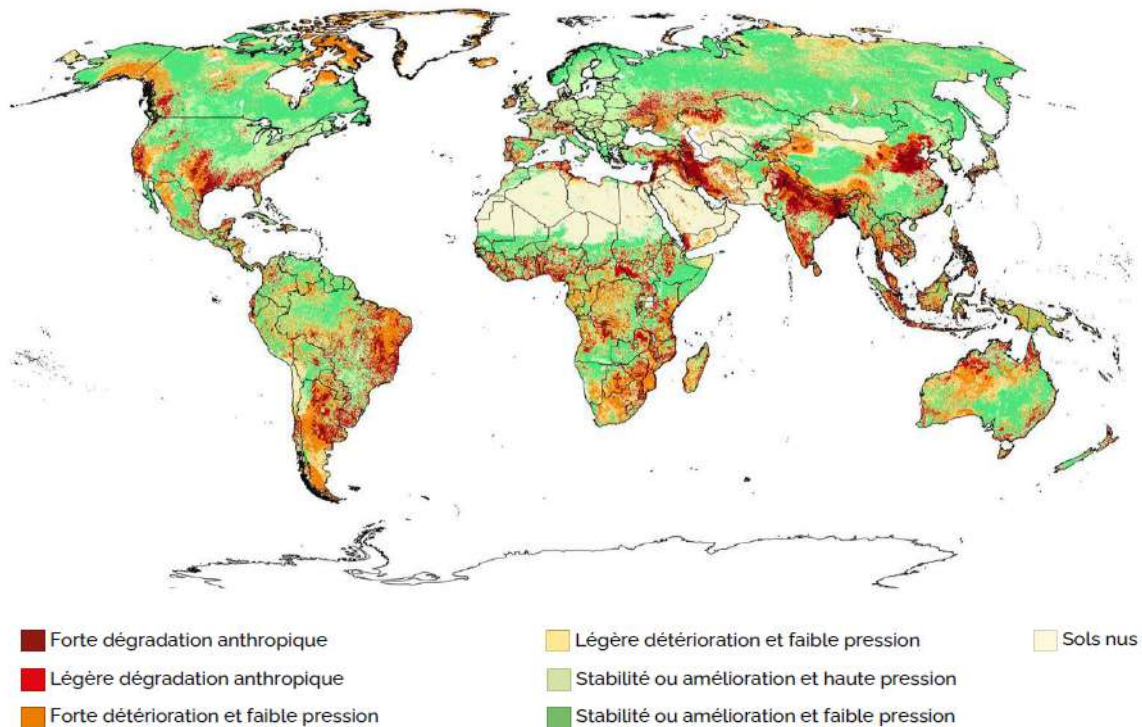


Figure n°1 : classification des terres dégradées étaient établies en fonction de la gravité des pressions anthropiques et des tendances à la détérioration en 2015 (FAO. 2021)

En Algérie, les sols salins couvrent de vastes étendues (Halitim 1985), dont plus de 20 % des sols irrigués sont concernés par la salinisation (Douaoui et Hartani. 2007). On estime que la récupération des terres salines sera difficile, même si le problème d'alcalinisation ne se pose plus (Daoud et Halitim. 1994). Il n'existe aucune carte fiable qui précise la délimitation des zones touchées par la salinité et une étude qui permette de quantifier la teneur des sels dans le sol. Cependant, quelques données existent, offrent une vue générale sur la salinité qui dégrade les terres.

On observe cette salinisation dans les hautes plaines de l'Est de l'Algérie à Constantine, Sétif, Bordj Bou Arreridj, Oum El Bouagui, dans vallées et les plaines de l'Ouest du pays notamment à Mina, Cheliff, HabraSig, Maghnia. Elle se manifeste également dans les environs des Chotts et de Sbkhas comme la Sebkhia d'Oran, les Chott d'Echergui, Gharbi, Hodna, Melghir, de Benziane, Zemmoul, Zazhrez. En outre, elle est présente dans le grand Sud. (INSID 2008).

Les sols salins se trouvent aussi bien dans le nord que dans le sud de l'Algérie, comme le mentionne (Djili.2000). Ils sont largement fréquents dans les Oranaise basses plaines, ils existent près de Relizane à la vallée de Mina, au Constantine et au sud de Sétif dans les hautes plaines, ainsi qu'aux abords de certains chotts. De plus, ces sols salins s'étendent considérablement dans les régions sahariennes, du sud de Biskra jusqu'à Touggourt, Ouargla et au-delà (Durand 1958).

I.2.2. Définition de la salinisation

La salinisation est définie comme un terme générique qui décrit l'accroissement progressif et le dépôt de sels dissous dans la zone des racines et superficiellement dans le sol. Ce phénomène est influencé par l'utilisation d'une eau d'irrigation de mauvaise qualité et mal contrôlée, le climat aride et/ou des conditions hydrologiques particulières telles qu'un lessivage insuffisant ou la présence d'une nappe salée proche à la surface du sol. Ces facteurs entraînent des effets nocifs sur les plantes et le sol, provoquant une diminution des rendements et, à long terme, la stérilisation du sol (Ben Naceur, Ben Salem et al. 2002) (Marlet et Job. 2006).

I.2.3. La salinité

La salinité est définie comme la quantité des sels solubles accumulés dans la solution du sol, ce qui peut être préjudiciable à la croissance et au développement des plantes. (Munns, James et al. 2006) (Barbouchi, Lhissou et al. 2013), En général, la salinité se manifeste chaque fois que les sels présents altèrent la vie végétale ou modifie les propriétés du sol. La liste des sels en cause varie selon le type de salinité, le plus courant en zone aride et semi-aride étant la présence de sulfates ou de chlorures ou de magnésium ou de sodium (Forges. 1972).

I.2.4. Types de salinisation du sol et compréhension des mécanismes

Ce qu'on appelle en général salinisation regroupe plusieurs mécanismes de dégradation : la salinisation, la sodisation et l'alcanisation qui sont trois phénomènes différents.

I.2.4.1. Salinisation

Même si l'altération des primaires minéraux et des roches sont les sources principales de la quantité des sels, les sols salins se forment rarement par l'accumulation de sels sur site. Divers facteurs sont responsables de ce phénomène (Maillard .2001), nous pouvons faire la distinction entre une salinisation naturelle, dénommée primaire et une salinisation anthropique, relative étroitement à l'irrigation, nommée secondaire. (Munns, James et al. 2006)

a) La primaire ou naturelle Salinisation

La salinisation naturelle est la résultante des mécanismes qui engendrent les sels suite à l'altération des roches. Le transfère et le dépôt des sels dissous dans l'eau dépendent des paramètres caractéristiques du milieu. Elle survient notamment dans les régions arides ou semi-arides où le lessivage et le transport en profondeur des sels dissous sont limités, et où une évapotranspiration importante augmente la concentration des sels au sein du sol. Dans les zones côtières, l'intrusion d'eaux salées et la submersion des terres basses par l'eau de mer provoquent la salinisation de l'eau souterraine ainsi que des sols (Lallemand.1980).

La surface totale touché par ce type de salinisation est estimée un mille millions d'ha, soit proche de 5 % de la surface des terres du globe (Szabolcs 1989).

b) La secondaire Salinisation

D'après (FAO.2006) Environ 20% des terres touchées par la salinité ont une salinisation d'origine de l'intervention humaine « secondaires » par l'irrigation.

L'activité humaine constitue la cause principale de la salinisation de type secondaire, souvent liée à des pratiques agricoles inadéquates. Les causes de cette salinisation des sols sont liées directement à la qualité mauvaise de l'eau d'irrigation, qui perturbe l'équilibre hydrique du sol en apportant une quantité d'eau supplémentaire, souvent associé à une insuffisance de lessivage des sels. Même une eau de bonne qualité contient des sels dissous, et bien que la quantité de sels apportée puisse sembler insignifiante, l'apport cumulatif d'eau avec le temps entraîne un dépôt cumulatif de sels dans les sols, ce qui peut être significatif. La deuxième cause est la remontée de la nappe souterraine près de la surface, accompagnée du transport de sels par capillarité ascensionnelle. Ces deux facteurs contribuent à la salinisation secondaire des sols et peuvent avoir des conséquences néfastes sur l'agriculture et l'environnement (Marlet, Vincent et al. 2005) (Marc 2001).

c) Salinité globale

La conductivité électrique de l'eau (exprimée en siemens par mètre, S/m ou en millisiemens par centimètre, mS/cm) peut être rapidement convertie en concentration de sel (salinité globale) (exprimée en milligrammes de sel par litre, mg/L) en utilisant la formule suivante : (Marc 2001)

$$1 \frac{ds}{m} = 1 \frac{ms}{cm} = 640 \frac{mg}{l} \text{ de sels} \quad (1)$$

I.2.4.2. Sodisation

Le phénomène de sodisation, s'agit d'un échange de sodium sur le complexe absorbant des argiles. La capacité du sol d'échanger des cations est appelée capacité d'échange cationique CEC. La sodisation est mesurée en pourcentage de la CEC occupée par le sodium. Ce pourcentage est nommé ESP ou PSE pourcentage de sodium échangeable. Lorsque la garniture cationique des argiles dépasse un seuil de teneur en sodium (Na), généralement situé aux environs de 10% (ESP > 10%) et plus, les argiles ont tendance à défloculer (se disperser). Le sol perd alors sa structure et sa perméabilité, il s'effondre. A un stade plus poussé, la sodisation s'accompagne d'une hausse du PH qui se traduit par une régression sévère des aptitudes agronomiques du sol, due en particulier à des carences (Marc 2001).

a) Sodicité

L'ESP est un indice de caractérisation des sols salés. Ce paramètre est déterminé par la formule suivante : (Kopittke, So et al. 2006)

$$ESP(\%) = \frac{(Na +)}{CEC} \times 100 \quad (2)$$

b) Alcalinisation

Littéralement, il s'agit d'une élévation du pH du sol sous l'effet de l'accumulation de bases. Pour comprendre ce mécanisme en simplifiant le phénomène, il est utile de rappeler ceci :

- En milieu aride, et en cas de drainage limité ou nul, la forte évaporation conduit à concentrer les eaux de surface et du sol.
- Lorsqu'une eau même faiblement minéralisée se concentre, sa composition évolue : la teneur en ions augmente. A la limite, une évaporation poussée conduira à des eaux concentrées et donc salées.
- Toutes les espèces minérales ne se maintiennent pas en solution au cours de l'évaporation : lorsque le seuil de solubilité du minéral est atteint, il précipite et les ions correspondant cessent donc de se concentrer.

- Le premier minéral qui précipite est la calcite CaCO_3 . Cette précipitation intervient pour une valeur constante du produit des concentrations en calcium et en carbonate. Or, l'eau du fleuve est relativement plus riche en carbonate (base faible) qu'en calcium. La précipitation laisse donc des carbonates résiduels en solution. Sa concentration a donc tendance à continuer à augmenter. Ceci entraîne l'accroissement du PH de la solution.
- Alors que la teneur en calcium diminue, la teneur en sodium augmente, puisque aucune espèce minérale contenant du sodium ne précipite. Le SAR de l'eau augmente à son tour.
- Une eau classée initialement sans danger pour l'irrigation devient ainsi alcaline et sodisante. (Marc 2001).

b-1) Alcalinité :

Le SAR (Sodium adsorption ratio), il s'agit également d'un paramètre fondamental pour la détermination du niveau d'alcalinisation (tableau n°2).

Tableau n°1: SAR et degrés d'alcalinisation des sols (Servant 1975)

SAR	Alcalinisation
$\text{SAR} \leq 4$	Pas d'alcalinisation
$4 < \text{SAR} \leq 8$	Faible alcalinisation
$8 < \text{SAR} \leq 12$	Alcalinisation moyenne
$12 < \text{SAR} \leq 18$	Alcalinisation Forte
$\text{SAR} \geq 18$	Alcalinisation Intense

Le SAR est déterminé par la relation suivante :

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}{2}}} \quad (3)$$

Na^+ , Ca^{++} et Mg^{++} exprimés en méq/l.

Remarque : Déverses équations empiriques existent entre le SAR et l'ESP. La relation la plus couramment utilisée a été établie par l'USSL en 1954. Cette relation, basée sur des mesures effectuées sur les extraits saturés de 59 échantillons du sol provenant de zones arides de l'ouest des États-Unis, peut être formulée par l'équation suivante : (Allison 1954, Kopittke, So et al. 2006)

$$\text{ESP}(\%) = \frac{100(-0.0126 + 0.01475 \times \text{SAR})}{1 + (-0.0126 + 0.01475 \times \text{SAR})} \quad (4)$$

I.2.5. Classes des sols salés

Dans le monde, il existe plusieurs systèmes de classification des sols, notamment la classification française, américaine, russe et de la FAO en 1975. Parmi ces systèmes, celui établi

par l'USSR en 1954, ainsi que les classifications élaborées par Duchaufour en 1977 et Cherbuy en 1991, identifient trois grandes catégories de sols : (Duchaufour 1977, Cherbuy 1991).

- Sols salins
- Sols salins à alcalins
- Sols alcalins

I.2.5.1. Sols salins :

Ces sols se distinguent par une conductivité électrique de l'extrait saturé dépassant les 4 dS/m, le pH moins de 8,5 et l'ESP inférieur à 15%. Ils contiennent concentrations élevées en sels solubles, ce qui entrave la croissance de la plupart des plantes qui y sont cultivées (Loyer 1991). De plus, ces sols affichent une perméabilité égale ou supérieure à celle des sols similaires non salins, en raison de l'action flocculant des sels. (Daoud et Halitim 1994). Ces sols sont caractérisés par une faible teneur en sodium, mais une richesse en sels blancs tels que les chlorures, sulfates et carbonates de calcium ou de magnésium. Ils sont généralement flocculés et subissent un lessivage efficace.

I.2.5.2. Sols salins à alcalins :

Ces sols se distinguent par leur CE de l'extrait de saturation supérieure à 4 dS/m et un pH supérieur à 8,5. Par définition, ce sont des sols qui renferment une quantité notable de sels solubles et un taux de sodium échangeable plus de 15%. La perméabilité de ces sols est influencée par le rapport entre la conductivité électrique et le pourcentage de sodium échangeable, ainsi que par la quantité et la nature des argiles dans ces sols (Daoud et Halitim 1994). La structure de ces sols d'ordre générale est bonne, bien qu'elle puisse se dégrader considérablement lors du lessivage. Il est souvent nécessaire d'apporter des cations de substitution pour améliorer leur qualité.

I.2.5.3. Sols alcalins :

Ces sols se caractérisent par une CE de l'extrait de saturation moins de 4 dS/m, un pH varie entre 8,5 et 10, et un ESP plus de 15%. Bien qu'ils contiennent suffisamment de sodium échangeable, ces sols ne renferment pas des quantités excessives de sels solubles. Ils présentent une perméabilité faible (Daoud et Halitim 1994).

Ces sols sont riches en sodium, ce qui les rend fonceés en raison de la forte concentration en sodium et de la dispersion de la matière organique. Ils sont sujets à la dispersion, ce qui rend le lessivage difficile. Il est nécessaire de remplacer le sodium par un autre cation, comme le calcium par exemple, pour améliorer la structure de ces sols.

Tableau n°2 : Propriétés des diverses classe de sols salés (Daoud et Halitim 1994)

Catégorie	CE à 25°C (mS.cm ⁻¹)	ESP (%)
Sols Salins	> 4	< 15
Sols salins à alcalins	> 4	> 15
Sols alcalins (sodiques)	< 4	> 15

I.2.6. Moyens de protection du sol contre la salinisation

Pour lutter contre la détérioration des sols doit viser à prévenir les mécanismes mentionnés précédemment, à savoir :

- La remontée fréquente de la nappe superficielle salée, à la surface du sol ou à une profondeur faible.
- la capillarité entraînant la concentration des sels dans les profils de surface.
- Les écoulements d'eau souterraine d'une parcelle élevée à une autre basse ;
- La teneur en sels provenant de l'eau d'arrosage dans le sol.
- La qualité des eaux destinée à l'irrigation jusqu'à atteindre un SAR dangereux.

I.2.7. Aménagement et restauration des sols salins

Les méthodes employées pour récupérer, améliorer et aménager les sols salins irrigués sont très nombreuses. Voici quelques-unes des méthodes les plus pratiquées dans les régions sahariennes.

La protection des sols contre les effets de la salinisation implique l'adoption de diverses mesures et pratiques visant à prévenir, contrôler ou réduire l'accumulation de sels dans le sol. Voici quelques-uns des moyens couramment utilisés pour lutter contre la salinisation des sols surtout dans les régions sahariennes.

I.2.7.1. Drainage

Le drainage, qu'il soit naturel ou artificiel, est une technique essentielle pour prévenir la salinisation des sols en éliminant l'excès d'eau et en assurant des conditions de croissance optimales pour les cultures. Le drainage agricole a plusieurs objectifs essentiels :

1. Evacuation de l'excès d'eau de pluviale, aidant ainsi à prévenir l'accumulation d'eau stagnante sur les champs.
2. Contrôle du niveau adéquat de la nappe et empêchant l'eau de s'accumuler à des niveaux excessifs dans le sol
3. le lessivage des sels dans la rhizosphère vers les couches inférieures du sol ;
4. Transport de l'eau récupérée dans les drains secondaires jusqu'au collecteur ;
5. Evacuation de l'eau par des collecteurs vers l'exutoire.

I.2.7.2. Lessivage

Pour lessiver, en fournissant une quantité d'eau adéquate au sol, les sels solubles présents dans le sol sont dissous par l'eau et sont ensuite entraînés plus profondément dans le sol à mesure que l'eau pénètre dans le sol. Cette méthode est souvent utilisée pour réduire la concentration de sels dans la couche racinaire, aidant ainsi à prévenir la salinisation des terres cultivables.

I.2.7.3. Amendement en sable

À l'occasion de la plantation d'un rejet, le sol est creusé jusqu'à une profondeur d'un mètre et lors du remblayage, la terre est mélangée au sable des dunes. Le sable est également utilisé pour la création de sols artificiels dans les zones chotteuses ; la hauteur de la couche apportée peut atteindre 60 cm. Après la plantation, des amendements texturaux (sables dunaires) sont couramment pratiqués en hiver de chaque année ; La hauteur de la couche apportée peut atteindre 15cm.

I.3. Principaux sels solubles

La présence de ces sels dans le sol peut influencer sa salinité et sa qualité, surtout si leur concentration devient excessive. C'est pourquoi le lessivage et d'autres techniques de gestion de l'eau sont utilisés pour maintenir un équilibre approprié de ces sels dans les sols agricoles.

Hulin en 1983 à considérer tous les sels les plus solubles que le gypse comme des sels solubles, leur concentration globale est estimée généralement par la conductivité électrique, leur degré de toxicité est d'autant plus élevée pour les plantes que leur solubilité est supérieure à celle du gypse (Aubert 1976).

Nous distinguons trois grands groupes de sels solubles ; les sulfates, les chlorures et les carbonates (Aubert 1976).

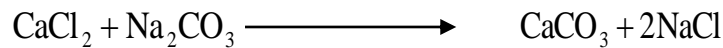
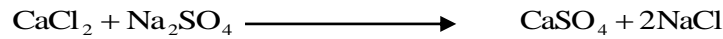
I.3.1. Chlorures

Les sels de chlorure sont composés d'ions chlorure (Cl⁻) et sont souvent associés à des éléments tels que le sodium (NaCl) ou le potassium (KCl). Ces sels sont couramment présents dans les sols et les eaux. Le chlorure est un sel principal responsable de la formation des sols salés. Il a une solubilité très élevée et une forte toxicité pour les végétaux (Aubert 1976).

Parmi ces sels nous avons :

- Chlorure de sodium (Na Cl) : C'est le sel le plus répandu, très soluble et hautement toxique.

- Chlorure de potassium (KCl) : C'est un sel voisin du Na Cl ; Mais répard peu dans la nature.
- Chlorure de calcium (Ca Cl₂) : C'est un sel relativement rare dans les sols, car il réagit avec Na₂SO₄ ou Na₂CO₃ pour former du CaSO₄ ou CaCO₃ (sels peu solubles) selon les réactions.



- Chlorure de magnésium (MgCl₂) : C'est un sel relativement rare, sauf dans les cas de forte salinité, sa solubilité est de l'ordre de 350 g/l qui fait de lui un sel de toxicité Extrêmement élevée.

I.3.2. Sulfates

Les sels de sulfate sont composés d'ions sulfate (SO₄²⁻) et sont souvent associés à des éléments tels que le calcium (CaSO₄) ou le sodium (Na₂SO₄). Le sulfate de calcium, par exemple, est un sel de sulfate courant. Les sels sulfatés se trouvent en quantités variables dans les sols. Parmi ces sels nous avons :

- Les Sulfates de Calcium (Ca SO₄) : le gypse (Ca SO₄ 2H₂O) est la forme la plus répandue, de point de vue toxicité il est peu dangereux du fait de sa faible solubilité, mais il peut freiner le développement du système racinaire dans le cas d'une forte accumulation dans le sol.
- Le Sulfate de Magnésium (Mg SO₄) : c'est un composant typique des sols salés, on le trouve souvent dans les eaux souterraines, sa solubilité est très élevée ce qui le rend un sel toxique.
- Le Sulfate de Sodium (Na₂ SO₄) : composant typique des sols salés, sa solubilité de l'ordre de 300 g/l, fait de lui un sel hautement toxique.
- Le Sulfates de Potassium (K₂ SO₄) : il se trouve en très faible quantité.

I.3.3. Carbonates

Les sels de carbonate sont composés d'ions carbonate (CO₃²⁻) et sont souvent liés à des ions tels que le calcium (CaCO₃) ou le sodium (Na₂CO₃). Le carbonate de calcium, également connu sous le nom de calcaire, est un exemple courant de sel de carbonate. Les sels carbonatés sont très répandus dans les sols. Parmi ces sels nous avons : (Smith.1992)

- Le carbonate de magnésium : (MgCO₃) sa solubilité est plus élevée, il donne du Mg (HCO₃) en présence de H₂CO₃.

- Le carbonate de sodium : (NaCO_3) : C'est un sel très toxique par sa solubilité et son pouvoir alcalinisant.
- Le carbonate de potassium : (K_2CO_3) : Il est extrêmement rare de le trouver en grande quantité, car il est fixé par les argiles. Son effet est pratiquement comparable à celui de Na CO_3 .

I.4. Solubilité des sels

La solubilité d'un sel est un aspect clé de leur comportement chimique, elle peut être influencée par plusieurs paramètres tels que la force ionique, la température, le pH et la présence d'autres sels.

I.4.1. Température :

La solubilité des sels peut varier considérablement avec la température, et cette variation dépend de la nature spécifique du sel en question (Nicod 1975). (Tableau n°03).

Tableau °3 : Solubilité maximum des principaux sels dans l'eau en g/1000 cm³

Sels	Température (°C)						
	0	10	20	40	60	80	100
Ca Cl ₂	58,7	65,2	73,9	127,2	138,1	146,9	157,7
Ca SO ₄	1,76	1,93	1,99	2,1	1,5	40	0,65
KCl	282	312	342	398	455	506	552
K ₂ SO ₄	75	91	111	145	179	212	240
Mg Cl ₂	526	538	543	574	612	666	424
Mg SO ₄	260	309	388	441	544	560	490
Na ₂ CO ₃	69	123	218	488	459	441	441
Na HCO ₃	69	81	94	126	158	182	237
NaCl	356	358	360	366	369	379	388
Na SO ₄ , 7 H ₂ O	184	304	477	-	-	-	-
Na SO ₄ , 10 H ₂ O	45	91	193	-	-	-	-
Ca CO ₃	0,015	0,02	-	-	-	-	-

I.4.2. Force ionique

La force ionique est définie comme la moitié de la somme de toutes les concentrations ioniques multipliée par le carré du nombre de charge. (Perron 2003) La solubilité d'un sel augmente avec la racine carrée de la force ionique de la solution.

$$\log Kps = \log Kpsi + B \times Za \times Zb \sqrt{I} \quad (5)$$

D'où :

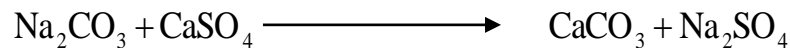
- Log Kps : Produit de solubilité du sel dans une solution de force ionique I.
- Kpsi : Produit de solubilité du sel à l'eau pure.
- B : 0,504.
- Za et Zb : Charges de l'anion et cation.
- I : Force ionique.

I.4.3. Le pH

L'acidité a une influence sur la solubilité des sels. Par exemple ; dans un milieu acide nous pourrions assister à une augmentation de solubilité du gypse pour la formation de l'ion HSO_4^- (Omeiri .2016)

I.4.4. Présence d'autres sels

Dans un milieu la présence de certains sels influe par fois sur la solubilité des autres sels. Par exemple dans les régions arides et semi-arides, l'accumulation de carbonate de sodium est souvent opposée par la présence de gypse suivant la réaction.



I.5. Les sels solubles et leurs mouvements dans le sol

Les sels dissous se déplacent lorsque l'eau véhicule et s'infiltre dans le sol, les mouvements des sels peuvent être en lixiviation (descendants) ou dans les sens contraire en capillarité (ascendants) ou elles suivent un autre processus de migration qui s'appelle la thermodialyse.

I.5.1. La lixiviation

L'eau atteint le sol soit par les précipitations, soit par l'irrigation, soit par les inondations. Elle s'infiltre dans le sol et dissout les sels existants par ordre de leur solubilité et s'accumulent dans les couches profondes.

I.5.2. La capillarité

Le deuxième type de mouvement des sels est la capillarité où un transfert ascendant des sels dissous dans une couche en saturation caractérisée par une épaisseur faible, ce type de migration des sels est très forte lorsque l'évaporation est importante (Duchaufour 1977). Le mouvement capillaire des sels dépend de la profondeur de la nappe phréatique, la granulométrie du sol, la perméabilité et la structure du sol (Durand 1958).

I.5.3. Thermodialyse

Dans ce type de migration, les sels sont déplacés suivant un gradient thermique à partir des zones froides vers les zones chaudes. Ce mouvement dépend de l'humidité du sol, de sa texture et de la nature des sels (Durand 1958).

I.6. Impact des sels dissous sur le sol

I.6.1. Au niveau de sa structure

Les sels affectent les caractéristiques physiques du sol, en particulier le pouvoir dispersant du sodium échangeable qui rend les colloïdes à l'état dispersé, cet impact se manifeste en cas où calcium est remplacé par le sodium au sein du complexe absorbant c'est-à-dire la CEC dépasse 15% (Derdour 1981).

La structure est dite stable lorsque le sodium échangeable diminue pour atteindre un taux qui varie entre 12 et 15% de la CEC. Le rapport ionique Na/ Ca a une influence sur la dispersion des colloïdes, cette état dispersé apparaît lorsque la teneur en calcium échangeable est inférieur à celle du sodium échangeable ; c.-à-d. la valeur du rapport Na/Ca dépasse le 1 (Derdour 1981).

I.6.2. Au niveau de la perméabilité

La perméabilité est influencée par la structure, la texture, pourcentage de la matière organique et le type de cations absorbés, la perméabilité est diminuée dans les sols salés à alcalis dès que les colloïdes sont dispersés par la présence de l'ion Na⁺ (Derdour 1981). Dans le moment où la salinité forme des agrégats par floculation des sels, l'augmentation de la perméabilité à commencer.

I.7. Conclusion

Pour étudier les sels solubles au sein les des sols salins, il faut reconnaître leurs interactions complexe et leurs impacts sur l'agriculture et l'environnement. Lorsque les sels solubles présentent aux sols peuvent engendre des problèmes liées à la salinisation, affectant la qualité des sols cultivés et réduisant le rendement productif des cultures. La solubilité des sels dans les sols dépend plusieurs facteurs tels que la pression, la température, la force ionique, les teneurs chimiques caractérisant le sol.



CHAPITRE II
Impact des eaux d'irrigation
sur le sol

II.1. Introduction

Qu'elle que soit l'origine de l'eau d'irrigation, souterraine ou du surface, n'est jamais pure ; elle comporte les sels minéraux dissous pouvant influencer négativement sur les cultures et les sols selon leur teneurs, il est important d'adopter les interventions agricoles de l'eau dont on dispose, sachant que les comportements des sels seront différent selon leur nature. La composition chimique d'une eau utilisée à des fins agricoles, doit être analysée selon son conséquence sur le sol et les végétaux.

II.2. Définition de l'irrigation :

On recoure à l'irrigation dans les cas où il y aurait un déficit pluviométrique engendre un déficit d'eau qui peut affecter le développement des plantes, un drainage excessif ou un grand rabattement de la nappe, en particulier dans les zones semi-arides et arides. Donc on peut définir l'irrigation comme une opération consiste à approvisionner de l'eau à des végétaux cultivés en cas de déficit pour augmenter la production agricole et permettre leur évolution normal. (El Asslouj, Kholtei et al. 2007).

II.3. L'irrigation dans le monde

D'un pays à l'autre, la consommation d'eau à des fins agricoles est très variable. Elle ne concerne que 273 millions d'hectares dispersés d'une façon très irrégulière sur l'ensemble des continents. Les pays qui consomment plus d'eau d'irrigation ne sont pas les pays soumis à un climat aride, Contrairement à ce que l'on pense. Dans ces pays arides et semi-arides, en effet, il ne peut y avoir d'agriculture sans irrigation. Aussi, la totalité des terres cultivées sont irriguées. Mais, lorsque il impossible d'irriguer sans eau, la superficie de ces terres réduite, limitée par la rareté d'eau, et localisées où l'eau est disponible. C'est le cas de certains pays de l'Amérique latine comme le Mexique, l'Égypte où l'agriculture est développée dans les côtés du Nil (Milos 1971).

Contrairement, la superficie des terres cultivées est très importante dans les pays qu'ont suffisamment d'eau pluviale, surtout si le relief permettra la collecte de ces eaux de pluie. L'irrigation est peu utilisée dans le cas où elle n'est pas nécessaire et devienne plus facile si l'eau est disponible, pour l'amélioration, la diversification des cultures, l'augmentation des rendements, l'obtention et la multiplication des récoltes. Même si elle n'est pas systématique, l'arrosage peut être impactant (Milos 1971).

La situation géographique est un facteur qui doit être pris en considération pour expliquer répartition de l'irrigation sur le globe. Comme exemple, l'arrosage nécessite parfois des infrastructures très coûteuses, la richesse des pays est importante, elle explique notamment qu'en Afrique l'irrigation soit moins développée. Alors que, les pays sud-ouest asiatique sont les plus irrigués, et certains pays du méditerranéen, comme l'Italie ou la Grèce (Milos 1971).

II.4. Inconvénients et Avantages

II.4.1. Les avantages

a) Augmentation de la production

Dans le cas d'insuffisance pluviométrique, l'irrigation est le seul moyen pour l'augmentation du rendement dans de nombreuses zones. En effet, selon les cultures et leurs variétés, les propriétés du sol et les pratiques employés, l'arrosage permet d'augmenter la production de deux à cinq fois plus et parfois atteindre dix dans les zones aride (Plauchu 2004).

b) Protection et préservation des milieux

L'arrosage n'est pas seulement un volume d'eau apporté sur un espace cultivé en vue de récompenser le déficit des précipitations et d'obtenir une évolution rapide des cultures. L'irrigation à grande partie est un ensemble d'interventions pour un développement intégré durable des milieux agricoles et ruraux qui devraient conduire non uniquement à une production accrue et l'amélioration de la vie des agriculteurs, mais devraient aussi à protéger et préserver le milieu, en particulier les terres agricoles, et par une économie de l'eau destinée à l'arrosage qui elle-même se conduit à l'économie de l'énergie (Plauchu 2004).

c) Elargissement des champs et la diversification des produits

L'irrigation n'a pas été uniquement l'origine de l'augmentation de la production, elle a favorisé aussi l'élargissement de la superficie des terres agricoles mais également elle contribue à la diversité de produits de consommation que au passé (Conac 1978).

d) Assurance de la sécurité alimentaire

La pratique agricole de l'irrigation augmente à partir des années soixante. Pour répondre à une demande croissante de nourriture à raison de l'explosion démographique manifesté dans la majorité des pays du tiers monde et dans certains ceux en développement où, tous les 25 ou 30 ans, la population double (Conac 1978).

La bonne maîtrise de l'irrigation est très importante pour endiguer la pénurie d'alimentation et assurer leur sécurité dans les communautés, la preuve est :

- Entre 1950 et 1990, l'irrigation est l'acteur principal de la production agricole au niveau du monde (FAO, 1975). Entre ces deux années, la récolte en céréales a presque triplée. Au début des années cinquante, les superficies cultivées ont été élargies, mais le pic d'augmentation du rendement et de la production, sans précédent historique, a été étroitement lié au doublement des superficies irriguées, et cela s'est poursuivi depuis les années soixante par la mise au point de nouvelles variétés des cultures comme le riz et le blé qui réagissent à l'eau et aux engrais (Tiercelin et Vidal 2006) ;
- La petite superficie à l'échelle du globe terrestre, assure 55% des principaux produits alimentaires, dont le blé et le riz. «C'est l'eau d'arrosage qui joue le rôle principal à l'évolution de la productivité consigné à une importante partie Asiatique, du Nord et du Moyen-Orient et de l'Afrique». (Maton 2006)

Pour conclure, on peut dire que les avantages de l'arrosage sont nombreux. Elle nous permet d'accroître les superficies cultivées, surtout dans les zones semi arides et arides, aussi elle permet de récolter deux fois par année ou plus au lieu d'une seule fois, spécifiquement dans pas mal de zones tropicales humides, d'augmenter et améliorer le rendement, d'une façon globale d'excéder et d'équilibrer la production en s'affranchissant des changements climatiques. Les nouvelles techniques d'arrosage permettent aussi à la fois l'humidification et la fertilisation des sols.

II.4.2. Les inconvénients

Les deux grands inconvénients de l'irrigation pour les milieux aquatiques sont : Elle engendre une excessive consommation d'eau et peut accélérer le phénomène de la désertification dans certaines zones.

a) Problème de dégradation des sols agricoles

À nos jours, l'irrigation des terres agricoles crée de nouveaux problèmes tels que le risque de la sodisation et la salinisation des sols qui peuvent être évalués par l'alcalinisation qui due aux échanges des ions et par la conductivité électrique (CE). Ces échanges sont principalement liés à la teneur en magnésium, en sodium et en calcium, entre la fraction argileuse qui contient dans le sol et l'eau d'arrosage. Elle est évaluée par le rapport d'absorption du sodium (SAR).

La mauvaise maîtrise de l'irrigation, peut néfaste les sols. Dans les sols trop secs, dans ce cas l'infiltration de l'eau à l'intérieur du sol se mal faite et dans le cas contraire où le volume d'eau apporté est trop grand, une importante portion de l'eau stagne ou s'écoule suivant les pentes. La partie stagnante s'évaporant puis les sels qu'elle contient restent sous forme de dépôt,

favorisant une salinisation des sols qui deviennent petit à petit impropres à l'agriculture et doivent être abandonnés; C'est un phénomène de salinisation des terres agricoles qui s'observe dans les régions semi-arides et arides. L'eau qui ruisselle favorise l'érosion au niveau du sol, surtout lorsqu'il est en état sec. A l'inverse, un sol trop humide devient nocif pour la plupart des plantes, car il asphyxie les racines. Le sol doit donc être bien drainé permettant à l'excès d'eau s'écoule dans les drains.

b) La consommation excessive de l'eau

L'irrigation est considérée comme la méga consommatrice de l'eau, puisqu'elle absorbe plus de 85 % de l'eau approvisionnée par l'homme (Horning 1973) (Plauchu 2004). Les pertes d'eau au sien des plantes et des sols dues par évapotranspiration sont compensées par des importantes quantités d'eau d'arrosage. En outre, une grande proportion de l'eau utilisée pour l'irrigation s'évapore directement dans l'atmosphère, ce qui la rend temporairement indisponible pour d'autres fins. Cette affirmation est d'autant plus valide que la quantité d'eau présente dans une plante est directement proportionnelle à son taux d'évaporation. Il y a cependant une limite à ce phénomène car un apport d'eau supplémentaire n'augmentera pas la transpiration des plantes. Afin d'éviter de gaspiller trop d'eau, il faut veiller à estimer les besoins nécessaires aux cultures et l'irrigation doit être contrôlée. Quoi qu'il en soit, il faut fournir beaucoup d'eau pour irriguer les champs agricoles, ce qui nécessite parfois de l'apporter de très loin.

c) La réduction des réserves d'eau

Mondialement, Les captages d'eau pour irriguer les terres agricoles représentent un pourcentage énorme désormais environ 70 % du total (Plauchu 2004). Au niveau local, un usage excessif de l'eau d'arrosage peut entraîner une diminution significative des réserves disponibles. Comme exemple, le lac de Tchad, qui était autrefois la plus importante réserve d'eau douce qui existe dans le continent africain, devient aujourd'hui plus petit environ 20 fois qu'il n'était avant 35 ans.

d) Les pertes dues aux techniques traditionnelles

L'eau n'atteint pas les plantes, surtout lorsque l'irrigation réalisée avec des techniques traditionnelles, car les pertes sont importantes. Malgré ça, ces techniques restent utilisées dans les deux tiers des superficies irriguées dans le monde. Ces pertes se présentent soit sous forme de fuites au niveau des canalisations, soit sous forme d'évaporation des eaux stagnantes dans les espaces irrigués. En Afrique, ces pertes estimées sont comprises entre 40 et 60 % de l'eau d'irrigation (Plauchu 2004).

e) Assèchement des milieux aquatiques

Un pompage excessif de l'eau des rivières pour l'irrigation peut progressivement assécher les terres en aval. À cet égard, la catastrophe écologique exemple est celle de la mer d'Aral, qui était le quatrième plus grand lac au niveau mondiale en termes de superficie, est instructif. C'est un bon exemple des conséquences très graves de prélèvement excessif d'eau (Plauchu 2004).

En 1960, Dans les régions désertiques au Kazakhstan, la plupart des eaux provenant des deux fleuves qui alimentent la mer d'Aral ont été détournées en faveur de l'expansion de l'agriculture du coton. Ces prélèvements importants ont fait baisser le niveau de la mer de 15 mètres et réduire sa superficie de 40 %. Dans le même temps, ses eaux sont devenue trois fois plus salée qu'elle ne l'était. En conséquence, la faune a pratiquement disparu et la pêche est devenue très rare. Un mauvais contrôle de l'arrosage et l'usage excessif de pesticides et d'engrais ont conduit à des conséquences désastreuses telles que la salinisation des sols, la désertification de vastes zones de la région, le niveau des nappes phréatiques s'est également fortement abaissé et la qualité des eaux souterraines détériorée. (Plauchu 2004)

II.5. L'irrigation en Algérie

La superficie agricole utile (SAU) en Algérie est de 8 265 259 hectares, La surface irriguée est d'environ 712 000 hectares, représente près de 8,6% de la SAU, la partie majeure de la surface irriguée se situe au Nord du pays, est de de l'ordre de 512 000 hectares soit 6,2% de la SAU. Par contre au Sud en zones du Sahara cette surface est de 200 000 hectares. Au nord les aires irriguées sont divisés en deux ensembles qui diffèrent en termes du mode de gestion et de taille des aménagements. En termes de gestion du périmètre agricole, les grands périmètres irrigués (GPI) sont gérés par des offices régionaux (OPI) et les petites et les moyennes irrigations hydrauliques (PMH) sont gérées par les agriculteurs. Ces surfaces irriguées sont répartie en deux grandes classes (Messahel 2004) :

Les périmètres qui ont une surface irriguée qui dépasse les 500 ha d'un seul sont classés comme GPI, ces surfaces sont alimentées en eau de forages profonds ou de barrages avec des grands investissements collectifs réalisés complètement à la charge de l'État. La classe GPI couvre une superficie de 173 350 ha équipés, dont seulement 100 000 ha (58%) sont considérés comme irrigables en raison de l'état de vétusté des réseaux d'irrigation (gravitaire et aspersion) et vu le déclassement de certaines superficies. Les champs effectivement irrigués ont une superficie moyenne au cours des 20 ans dernières, est d'environ 40 000 hectares (soit plus de 23% de GPI) en raison de la sécheresse chronique, de la priorité donnée à l'approvisionnement

en eau potable sur l'irrigation et des problèmes de gestion ; d'exploitation et d'entretien. Les besoins d'eau sont très supérieurs par rapport aux quantités d'eau destinées à l'irrigation. Outre le pourcentage annuel de pertes atteignent environ 40 % ; la diminution des ressources en eau affectées à l'irrigation, Ainsi, en 2002, les quatre offices régionaux gérant de GPI ont enregistré une augmentation des pertes plus de 40 millions m³ (Messahel 2004).

II.6. L'irrigation et leurs impacts dans la région de Ouargla

En 1998, dans les régions sahariennes d'Algérie, la superficie irriguée dépassait les 150.000 hectares, répartis en 60.000 hectares de palmiers dattiers, 60 000 hectares de céréales et les 30 000 hectares restants consacrés au maraîchage. Concernant les zones qui irriguent les périmètres agricoles en utilisant les eaux du CT et du CI, sa superficie actuellement est de l'ordre de 100.000 ha. (Halilat 2004)

Comme c'est le cas dans un grand nombre d'oasis au Sud algérien, à Ouargla, le type d'irrigation se fait par gravité ou est appelé aussi l'irrigation de surface. Cette méthode d'irrigation consiste à distribuer l'eau sur la parcelle cultivée. Il s'agit d'une méthode d'irrigation rudimentaire et peu coûteuse en termes d'investissement. L'eau du puits est acheminée par des seguias fabriquées en terre vers les bassins répartiteurs pour la distribution. L'eau arrive jusqu'à la parcelle, ensuite est distribuée à travers des canaux en terre alimentant les raies. La difficulté de contrôler les débits et les pertes d'eau dues à l'infiltration entraînent un gaspillage important d'eau et une irrigation irrégulière. (Salhi 2017)

Le système qui basé sur la culture des céréales sous un pivot. Ouargla est un précurseur de ce type d'agriculture capitaliste. Depuis 1988, après l'implantation des premières fermes céréalières à Gassi Touil, ces méthodes d'irrigation ont été intégrées aux activités agricoles au Sahara. (Salhi 2017)

La wilaya de Ouargla est l'une des sahariennes wilayas où l'agriculture intensive a été largement adoptée comme modèle de développement. La superficie agricole utile (SAU) de la wilaya s'élève à 54 250 hectares, dont 31 550 hectares sont irrigués, principalement dédiés à la culture des palmiers-dattiers et des céréales sous arrosage par pivot. Au cours des dernières années, d'autres types de cultures ont également gagné en importance, notamment la production de fourrages, de cultures maraîchères, et le développement de l'arboriculture fruitière (Daoudi, Benterki et al. 2021).

L'irrigation a conduit en générale à l'apparition du phénomène de la remontée de la nappe phréatique dans les sols jusqu'à ce que la zone racinaire des cultures soit engorgée. La nature saline qui caractérise ce type des nappes libres, surtout dans les régions arides du monde, engendre le dépôt des sels dans la partie des racines (Yeo 1998). Les sels solubles remontent capillairement dépend de la texture du sol et le niveau de la nappe phréatique (Dubost 1991). L'augmentation du niveau des eaux phréatique joue un rôle majeur à la dégradation des sols par salinisation, Ce qui provoque le phénomène d'hydro-halomorphie et la formation de croûtes de gypse. L'absence des opérations d'aménagements hydro-agricoles cohérents adaptés peut aggraver cette situation (Daddi Bouhoun 2010), Les échantillons de sol prélevés dans les zones irriguées par les eaux du Mio-pliocène ont montré une augmentation significative du pH et de CE par rapport à ceux irrigués par les albiennes eaux.

L'augmentation du niveau des eaux phréatiques et du teneur en calcaire, confèrent au sol respectivement une salinité excessive et un pH plus alcalin. Deux dynamiques de sels peuvent influencer sur les sels dissous, la première dynamique ascendante caractérisée par un mouvement capillaire due à l'évapotranspiration, la seconde descendante à cause de lixiviation avec l'eau d'irrigation. Le degré d'accumulation de sel dans le sol est déterminé en fonction de deux facteurs qui sont, l'importance des quantités de sel provenant des eaux phréatiques et celles d'irrigation et le rapport d'intensité entre les deux dynamiques des sels. Ces derniers sont importants au fond de la cuvette de Ouargla, avec la remontée des eaux phréatiques plus salines. (Daddi Bouhoun 2010)

II.6.1. Dégradation du sol de Oued Righ et de Ouargla

Au milieu saharien, les sols font face à des grands obstacles et d'énormes défis en termes d'exploitation. Leur potentiel de fertilité est extrêmement limité, ce qui se traduit par la création de paysages saharien. Les sols dans ces zones contiennent souvent des croûtes de calcaire ou de gypse et sont vulnérables à la salinisation secondaire et à l'érosion éolienne. De plus, ils sont recouverts par des couches de sable (Aubert 1978).

Dans les régions arides, la secondaire salinisation existe depuis longtemps (Szabolcs 1989). Ce problème est courant dans le Sahara, Cela est dû à la mauvaise maîtrise du système d'irrigation-drainage dans les palmeraies (Durand 1958). Dans le sud-est de l'Algérie, le drainage agricole est encore confrontées à de grandes difficultés, car ces régions sont également confrontées à la remontée de la nappe phréatique, et souffrent des problèmes d'évacuation des eaux de drainage (Côte 1998).

Les effets néfastes sur le sol agricoles dans la région de Ouargla dues à la dégradation des conditions édaphiques, par la salinisation et par la nappe phréatique remontée (Djerbi 1994). La salinisation crée de nombreux problèmes pour les cultures et le sol. Ils varient en termes d'intensité et de nature selon plusieurs facteurs tels que le climat ; le type du sol ; la plante (Ayers et Westcot 1985).

Dans région de l'Oued Righ, l'irrigation est un choix inévitable et nécessaire pour l'agriculture et pour garantir la satisfaction des divers besoins alimentaire. Les sols mis en valeur pour l'agriculture dans cette zone ne sont généralement, que des substrats sableux minéraux, gravement dépourvus de matière organique et de leurs propriétés associées. Le problème majeur de la mise en valeur des sols halomorphes, c'est l'accumulation fréquente continue d'une fraction importante de salinité, pouvant former des horizons indurés et conduisant à la réduction de leur perméabilité. Les sols irrigués à la région de l'Oued Righ, présentent un grand risque de salinisation et d'hydromorphie. Où la principale raison de ce problème est l'utilisation d'eau d'irrigation très salée (son taux de salinité dépasse 3 g/litre), sans oublier la contribution des caractéristiques climatiques et hydro-pédologiques de la région. (Koull, Kherraze et al. 2013)

II.7. Conclusion :

L'utilisation d'eaux d'irrigation peut avoir des effets significatifs sur la qualité du sol et la santé des plantes. Dans le cas de régions comme Ouargla, où les eaux souterraines peuvent être naturellement riches en sels dissous, l'irrigation peut entraîner une accumulation de ces sels dans le sol, ce qui peut compromettre sa fertilité et sa capacité à soutenir une croissance végétale saine. De plus, les sels dissous peuvent également affecter directement les plantes en perturbant leur équilibre hydrique et en provoquant des dommages physiologiques.

Pour atténuer ces effets néfastes, il est essentiel de mettre en œuvre des pratiques d'irrigation appropriées, telles que le drainage adéquat du sol pour éviter l'accumulation de sels, l'application de techniques de désalinisation pour les eaux d'irrigation si nécessaire, et l'adoption de cultures résistantes au sel lorsque cela est possible. De plus, une gestion efficace des ressources en eau, y compris la réutilisation des eaux usées traitées, peut contribuer à réduire la pression sur les ressources en eau douce et à minimiser l'impact environnemental de l'irrigation.

PARTIE II CADRE PHYSIQUE

- **CH.I Géographie, géologie et hydrogéologie de la région d'étude**
- **CH. II Contexte climatologique de la région d'étude**

CHAPITRE I
Géographie, géologie et
hydrogéologie de la région d'étude

I.1. Introduction

Cette partie offre un aperçu essentiel de du cadre physique de la région étudiée, englobant des caractéristiques géographiques, climatiques, géologiques et hydrogéologiques. Cette perspective permet de comprendre les défis environnementaux et les opportunités de développement présents dans la région en question. En analysant les données relatives aux ressources naturelles et au climat de la région.

I.2. Situation géographique :

Ouargla se trouve dans le sud-est de l'Algérie. Selon La réorganisation du territoire algérien, loi n° 84-09 du 4 février 1984. La wilaya de Ouargla s'étend sur une superficie de 154 300 km². Elle est bordée au nord par la wilaya de Biskra, au nord-ouest par la wilaya de Djelfa, au sud par la wilaya de Tamanrasset, au sud-est par la wilaya d'Illizi, à l'ouest par la wilaya de Ghardaïa et la wilaya d'El-Meniaa à l'est par la wilaya d'El Oued et la Tunisie. (Figure n°2)

Le décret numéro 15-140 en date du 27 mai 2015 a institué la wilaya déléguée de Touggourt, laquelle est rattachée à la wilaya principale d'Ouargla. Le nouveau redécoupage relative à l'organisation territoriale du pays, modifie et complète la loi n° 84-09, a créé la wilaya de Touggourt et l'officialisée en 2021. La wilaya de Touggourt s'étale sur une superficie de 17.428 km².

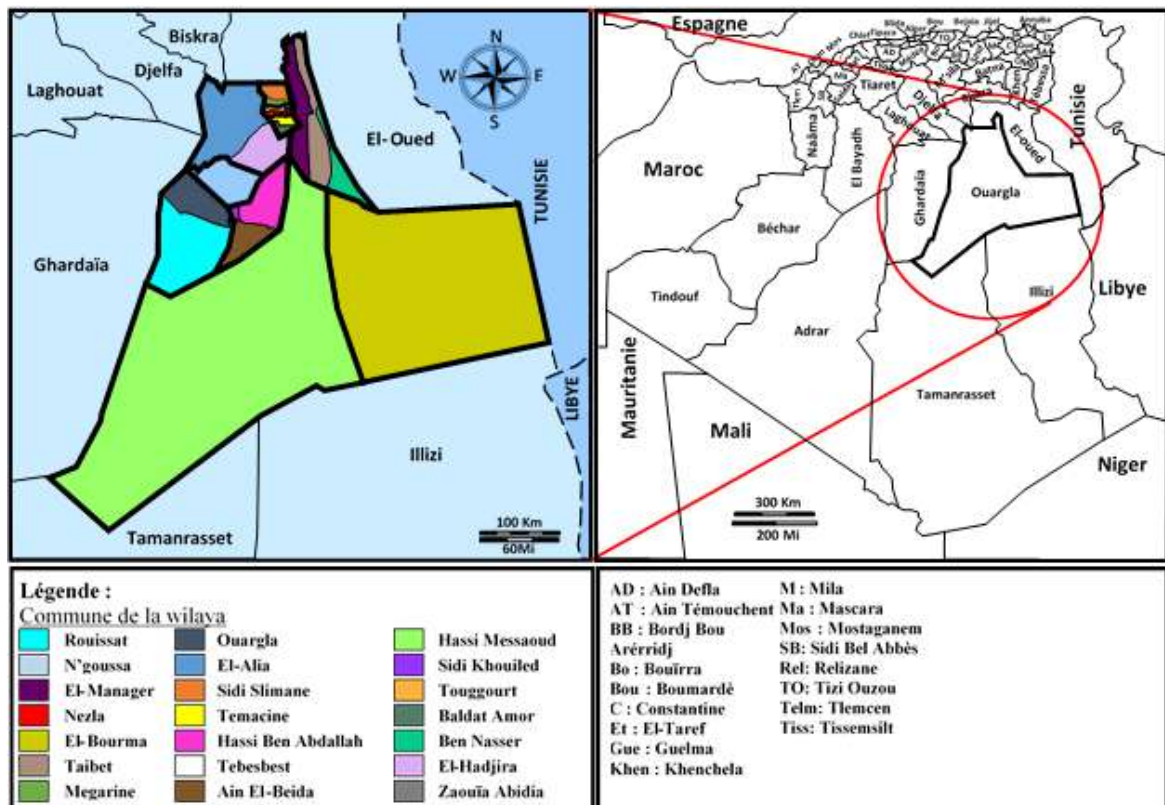


Figure n°2 : Situation géographique et découpage administratif de la wilaya de Ouargla selon la loi no 84-09 du 4 février 1984 de réorganisation du territoire algérien

I.3. Contexte géologique

Géologiquement la région en étude est une partie de la plateforme saharienne, composée d'un précambrien socle qui est le substratum de cette plate-forme (Figure n°3). Il émerge de sédiments que l'on trouve seulement dans le massif du Hoggar au Sahara central et dans le massif des Eglab au Sahara Occidental. (UNESCO 1972). L'Atlas saharien et l'Atlas tellien, conjointement avec la plateforme saharienne, représentent les principales unités géo-structurales de l'Algérie.

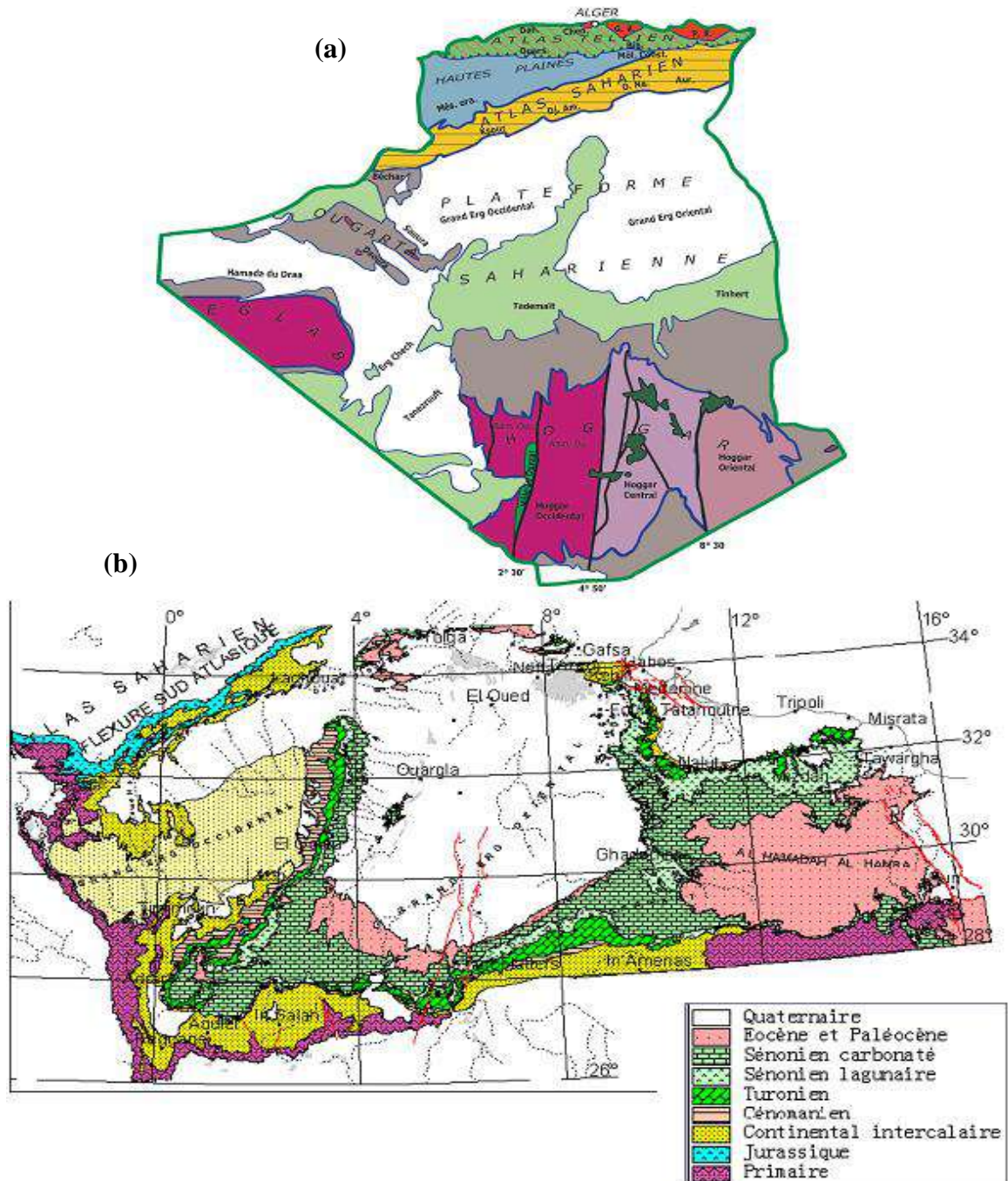


Figure n°3 : la géologie régionale de la région d'étude (a) : les domaines géologique aux territoires algériennes (WEC 2007) ; (b) : les affleurements géologique du Sahara. (OSS 2003)

Ouargla se trouve dans une dépression fait partie, selon le découpage administratif, du « Bas Sahara » (Figure n°4). La géologie de la plateforme désertique a été établie grâce à des études sur le terrain, en examinant les affleurements rocheux, mais en particulier grâce à l'exploration pétrolière et gazière. Le bouclier précambrien est constitué de roches éruptives et métamorphiques qui se manifestent en affleurements dans les régions du Sahara Occidental et Central. Ces roches, suite à l'érosion, sont devenues plates et surmontées de couches sédimentaires s'étendant sur plusieurs milliers de mètres d'épaisseur couvrant la période Cambrien jusqu'au Quaternaire. Ces strates de sédiments datant du Paléozoïque, généralement ont subi des plissements variables, formant ainsi un vaste bassin dissymétrique sédimentaire (UNESCO, 1972).

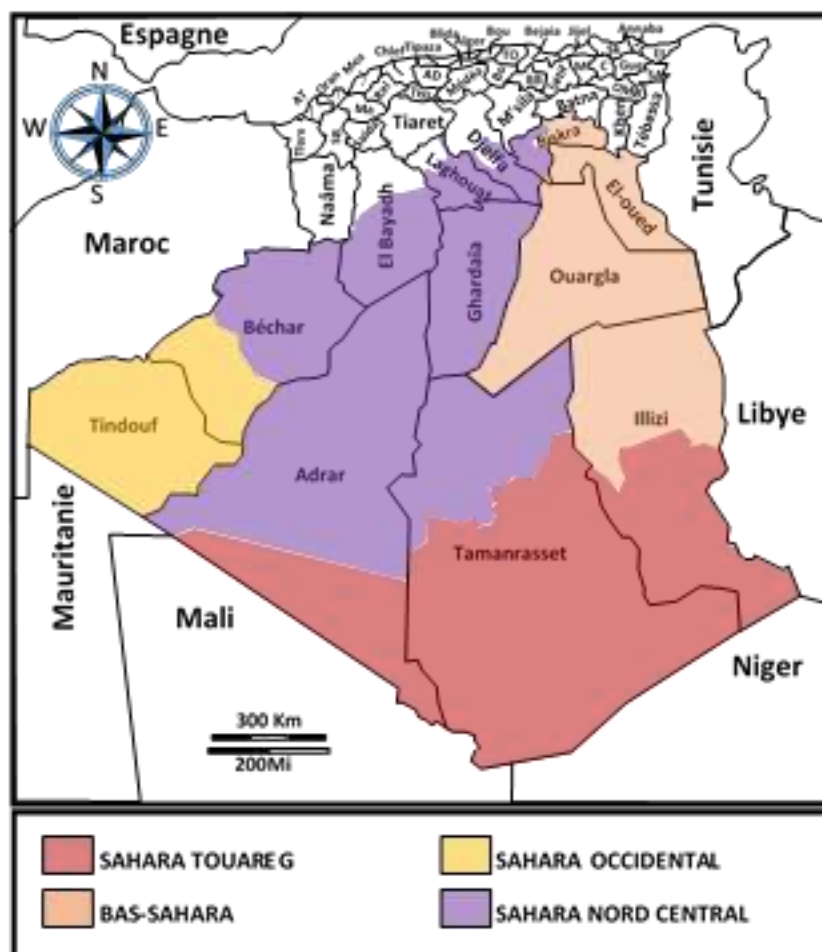


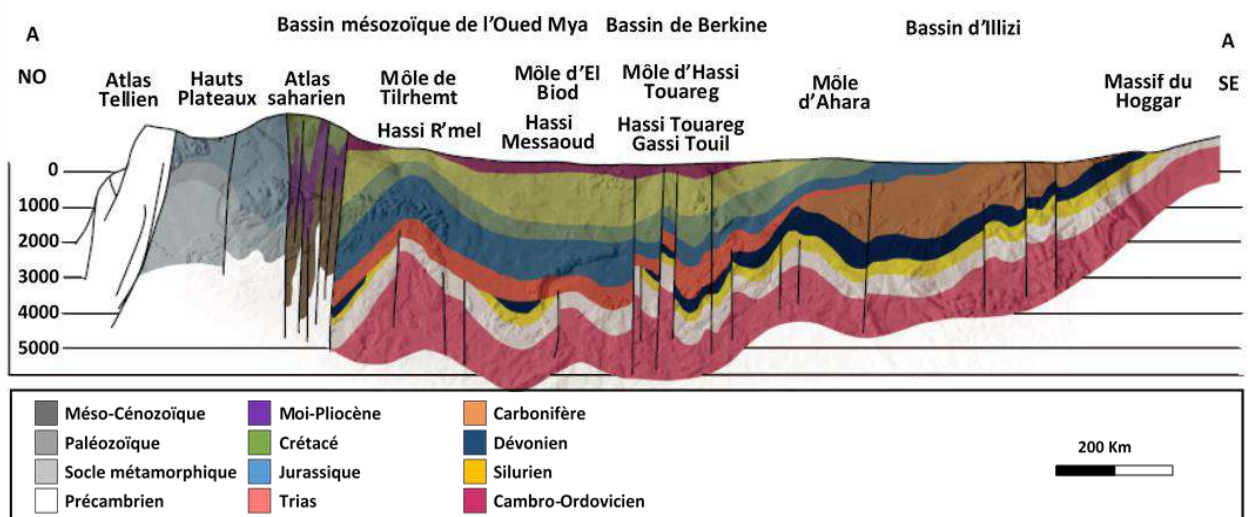
Figure n°4 : Espaces de référence identitaire saharienne de l'Algérie
(Bendjelid, Brûlé et al. 2004)

La couverture sédimentaire, comme illustré dans la Figure n° 3, comprend des formations d'âge paléozoïque, mésozoïque et cénozoïque. Les formations mésozoïques et cénozoïques y sont généralement subhorizontales. L'épaisseur totale de cette couverture atteignant 400 mètres

dans le Sud et l'Ouest de la dépression, tandis qu'elle atteint 6000 mètres dans le Nord (Aliev 1972).

Les données sismologiques indiquent que les failles hercyniennes du Hoggar ont une influence sur la dépression de la région depuis le Cambrien jusqu'au Sénonien Inférieur (Aliev 1972) (Fabre 1976) (Figure n°5). Les failles hercyniennes du Hoggar alignées dans une direction du Sud-Est Nord-Ouest et passent à travers Ouargla à l'Est. Elles semblent être responsables des connexions entre les différentes nappes aquifères dans cette zone (Guendouz, Reghis et al. 1992) (Edmunds, Guendouz et al. 2003) (Guendouz, Moulla et al. 2003).

La plateforme est principalement composée des formations de l'oriental bassin, qui abritent des aquifères substantiels ainsi que d'importantes réserves de pétrole, ce qui constitue la principale source de richesse de la région du Sahara (Cornet 1964) (UNESCO 1972) (FONTAINE 1996).



I.4. Contexte hydrogéologique :

Dans le Sahara septentrional, on trouve des formations géologiques contiennent des aquifères qui qui permettent des eaux souterraines à circuler (Figure n°3a). Cela concerne le système aquifère du Sahara septentrional (SASS), qui comprend deux aquifères, à savoir le Complexe Terminal (CT) et le Continental Intercalaire (CI). La superficie du SASS est d'environ 1 000 000 kilomètres carrés, partagée entre trois pays voisins : l'Algérie, la Tunisie et la Libye (OSS 2003). Le CI et le CT ayant de réserves d'eau estimées à 3.379.000 m³, l'accumulation de ces réserves d'eau ne peut pas être expliquée compte tenu les conditions climatiques actuelles ; Avec un taux de recharge actuel ne s'élevant qu'à 10⁹ mètres cubes par

an, il convient de noter que la nappe du CI affiche la durée de renouvellement la plus longue (Ouled Baba 2005). Ces réserves semblent provenir d'un épisode pluvial remontant au Pléistocène inférieur ainsi qu'à l'Holocène.

Les études réalisées sur les eaux des différentes nappes du SASS, afin de déterminer leur âge, montre que les eaux étudiées sont jeunes dans zones de recharge, et attestent d'un rechargement actuel à proximité des zones potentielles d'alimentation, sur une couvrant période de 500 ans. Cependant, dans les parties confinées des aquifères et des zones d'exhaures éloignées des zones de recharge jusqu'à 500 kilomètres, ce processus peut s'étendre sur des périodes atteignant jusqu'à 40000 ans (Conrad et Fontes 1972) (Gonfiantini, Conrad et al. 1974) (Aranyossy et Mamou 1985).

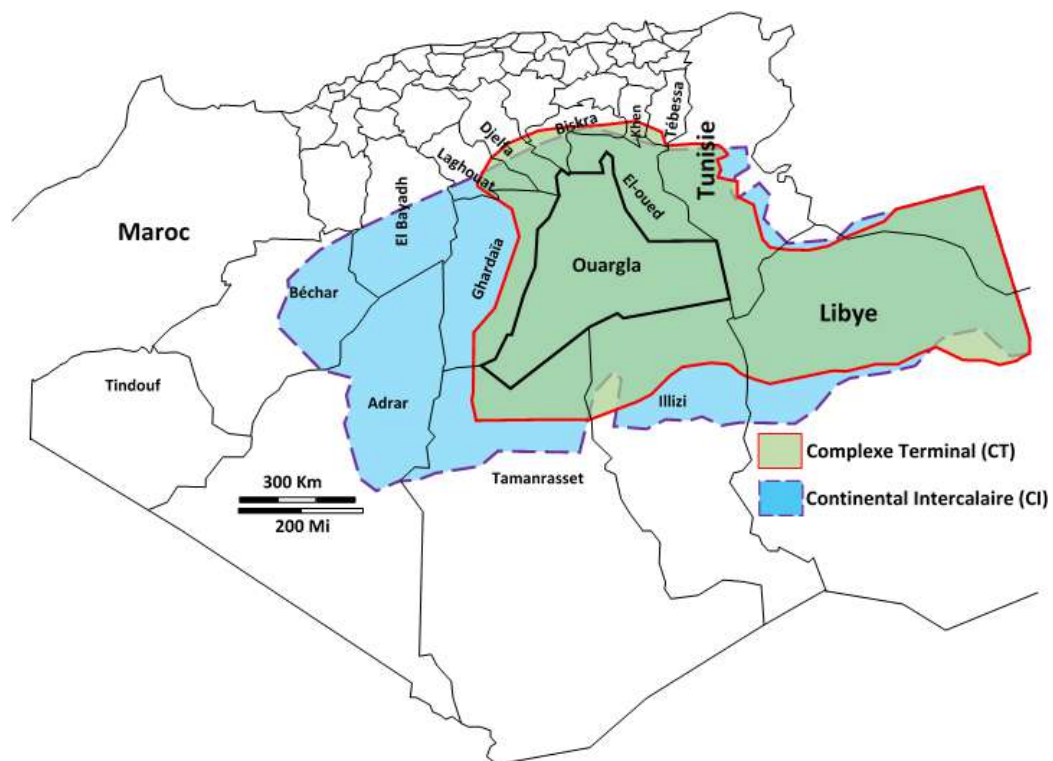


Figure n°6 : Carte hydrogéologique du système aquifère CI et CT (UNESCO 1972)

Le Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS) dans le territoire d'Algérie s'étend sur une superficie d'environ 700 milles Km² (Figure n°6), possède une épaisseur variant entre 4000 et 5000 mètres environ (Cornet 1964). L'anticlinal qui existe au niveau de la région M'Zab, forme une passerelle véritable structurellement entre le plateau de Tademaït et l'Atlas saharien, il divise cet aquifère multicouche en deux sous bassins hydrogéologiques, le premier sous bassin est occidental occupe une superficie de 280 milles Km², partiellement recouvert par le Grand Erg Occidental, et le deuxième est oriental, le plus étendu avec une superficie de 500 milles Km², principalement occupé par une large partie du Grand Erg Oriental.

I.4.1. Continental intercalaire (CI)

Le CI désigne un continental épisée située entre deux cycles marins sédimentaires au niveau de la base (Kilian 1931), on trouve le cycle du Paléozoïque qui achève l'orogénèse hercynienne, tandis qu'à la partie supérieure, on observe le cycle du Crétacé supérieur, résultant de la transgression cénomaniennne (Busson 1970) (Fabre 1976).

En s'étendant du nord au sud, l'aquifère du CI couvre une vaste étendue, allant de l'Atlas Saharien jusqu'au Tassili du Hoggar. D'ouest en est, il s'étend depuis la vallée du Guir à Béchar jusqu'aux régions sahariennes de la Libye (Figure n°6). Les formations argilo-gréseuses et sableuses du Néocomien, Barrémien, Aptien, et de l'Albien sont occupés par l'aquifère du CI (Cornet et Gousskov 1952) (Cornet 1964).

Les zones qui alimentent le CI sont, le Jebel Nafusa au Nord-Est, le Dahar à l'Est, le piémont de l'Atlas saharien au Nord-Ouest, avec un débit estimé de 7.7 m³/s, Le Tinrhert et le Jebel Hassawna au sud agissent comme des zones de drainage pour la nappe du Cambro-Ordovicien, dirigeant ainsi les flux d'eau vers le nord, où ils alimentent la nappe du CI (Figure n°7) (Ouled Baba 2005). Le débit cité précédemment situé dans l'intervalle de (4 à 8,5 m³/s) déterminé dans les études antérieures réalisées pour l'estimation des débits (Cornet 1961) (Margat 1990).

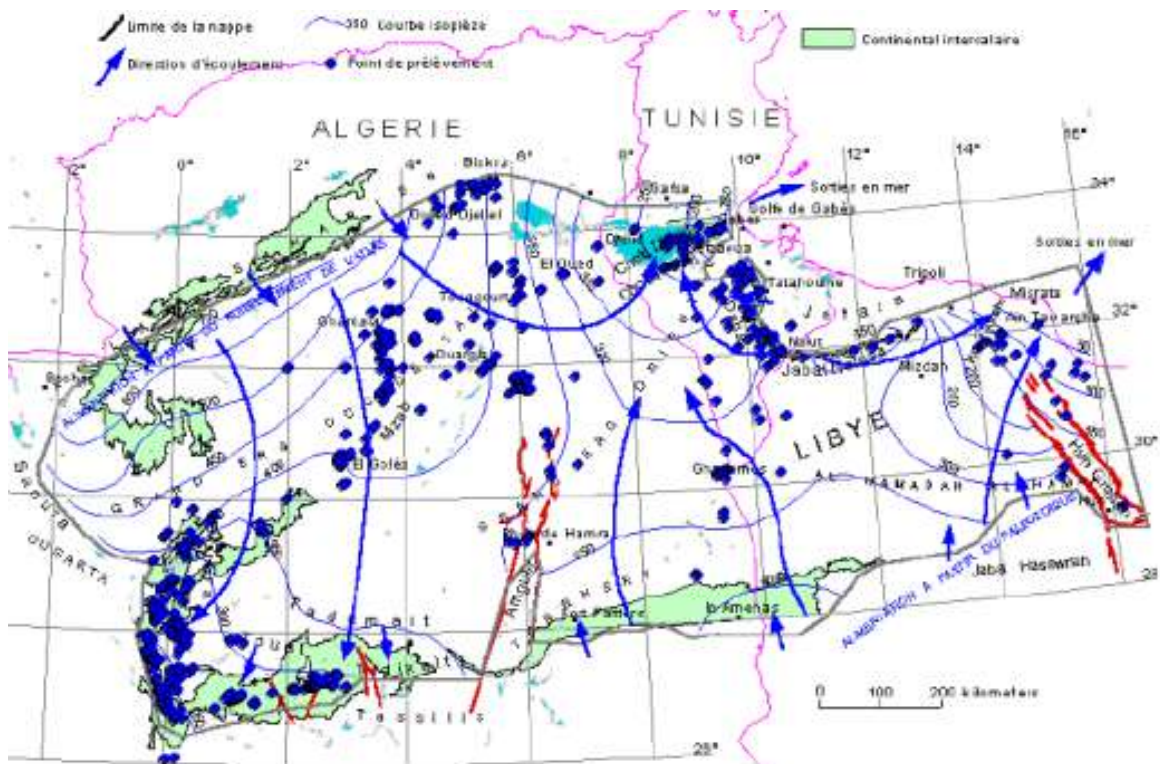


Figure n°7 : Représentation cartographique établie à l'état stationnaire de la piézométrie référence du Continental intercalaire (OSS 2003)

I.4.2. Complexe Terminal (CT)

Le terme "Complexe terminal" faisait classiquement référence aux formations sableuses continentales et argileuses datant du Mio-pliocène, selon la définition de Killian (Killian 1931). Alors que ce terme désignait la nappe située dans les sables du Mio-pliocène, Ces divers niveaux sont plus ou moins connectés à toute la série géologique allant du Cénomaniens. Par conséquent, à l'échelle de l'ensemble du Sahara, on peut les considérer comme formant une seule nappe, appelée la nappe du CT, par opposition de la nappe du CI, selon les travaux de (Bel et Demargne 1966).

Le CT, en revanche, forme un ensemble relativement hétérogène comme l'ont noté (Busson 1970) (Fabre 1976). Les aquifères du Sénonien, de l'Éocène et du Mio-pliocène sont regroupés au sein d'une même unité hydrogéologique à couches multiples (Bel et Cuche 1969) (UNESCO.1972) (OSS.2003). Les communications qui existent entre les aquifères sont évidentes dans tout le bassin (Figure n°8).

Au Sud de la flexure saharienne entre le M'zab et la Saoura, dans le bassin occidental, la nappe du Complexe Terminal est étroitement liée à la nappe du Continental Intercalaire car il n'y a pas de formations intermédiaires qui séparent les sables du CI et celles du CT. Au sud-ouest, en dessous du plateau du Tademaït, la nappe du CT est peu significative, voire parfois inexistante (Nezli 2009).

La nappe de CT couvre sur une superficie de 350.000 Km² environ dans le bassin oriental, et délimitée au nord par l'Atlas Saharien, à l'ouest par la dorsale du M'zab, à l'est par le Dahar, et au sud par une ligne située au nord de l'axe reliant In Salah-Zarzaïtine, au-dessous du Grand Erg Oriental. Elle présente une grande importance en tant que une indépendante formation aquifère ; car la liaison inter-aquifère entre le bassin oriental et le bassin occidental apparaît insignifiante (UNESCO 1972).

Les débits d'eau qui alimentent la nappe du CT proviennent de différentes sources, notamment Tinrhert au Sud, l'Atlas saharien au Nord-Ouest, le Jebel Nafusa au Nord-Est, le Dahar à l'Est, (figure 9). Les zones d'exutoires se trouvent principalement autour des Chotts algéro-tunisiens et du Golfe de Syrte (OSS 2003).

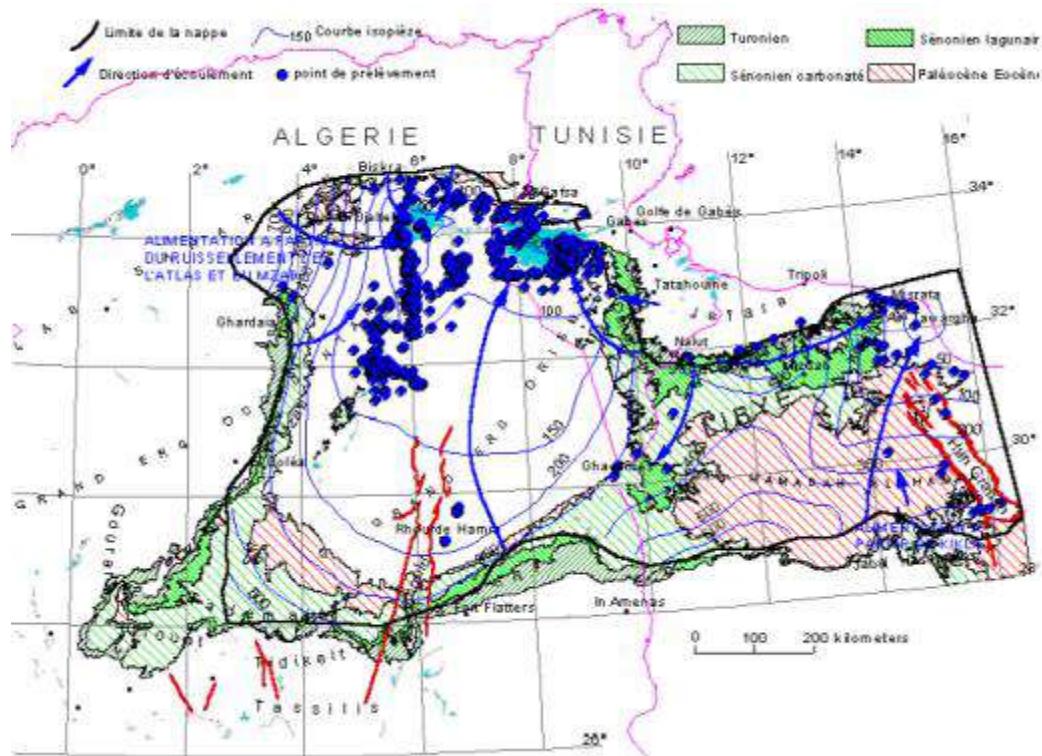


Figure n°8 : Représentation cartographique établie à l'état stationnaire de la piézométrie référence du Complexe terminal (OSS 2003).

Au sein d'occidental bassin, les eaux du CI se mélangent avec celle du CT, les eaux du complexe terminal s'écoulent vers les chotts du Sahara Oriental, (UNESCO 1972).

Le Mio-Plio-Quaternaire, caractérisé par des formations sablogypseux et argilogypseux, contient des nappes phréatiques formées pendant les périodes pluvieuses du pléistocène inférieur. Il est créé par le processus de la sédimentation dans des environnements lacustres, survenant lors de la phase de dessiccation des bassins naturels des chotts (Busson 1970).

Au niveau du bassin oriental, l'aquifère de Turonien calcaire-dolomitique est vaste. Elle est plus isolée au-dessous de la couche imperméable formée par le Sénonien lagunaire, cette formation est relativement isolée, bien que ses niveaux correspondent à ceux du Sénonien ou du Mio-pliocène aux limites du bassin. À l'extrémité nord du Sahara oriental, cette couche est imperméable en raison de la présence de marnes (Nezli 2009).

I.5. Conclusion :

Du point de vue géologique, la région de Ouargla est caractérisée par des formations rocheuses anciennes, notamment des dépôts sédimentaires datant de différentes périodes géologiques. Ces formations comprennent des couches de grès, de calcaire et de shale, qui jouent un rôle important dans la recharge et la distribution des eaux souterraines. Les processus géologiques tels que l'érosion et la tectonique influent également sur la structure et la

composition du sous-sol, ce qui peut avoir des implications directes sur l'hydrogéologie de la région.

En ce qui concerne l'hydrogéologie, Ouargla repose en grande partie sur les eaux souterraines pour répondre à ses besoins en eau. Les aquifères locaux, souvent situés dans des formations géologiques poreuses et perméables, constituent une source vitale d'eau potable, d'irrigation agricole et d'approvisionnement en eau pour les activités industrielles.



CHAPITRE II
Contexte climatologique de la
région d'étude

II.1. Introduction :

La région d'Ouargla présente un climat de type saharien, extrêmement chaud, se distinguant par une période de sécheresse prolongée en raison de précipitations irrégulières et très rares, des températures élevées avec des importantes variations quotidiennes et saisonnières, ainsi qu'une faible humidité relative de l'air. Dans ce chapitre on essaye de comprendre les caractéristiques du climat et d'évaluer les potentialités hydriques de cette région.

II.2. Données climatologiques

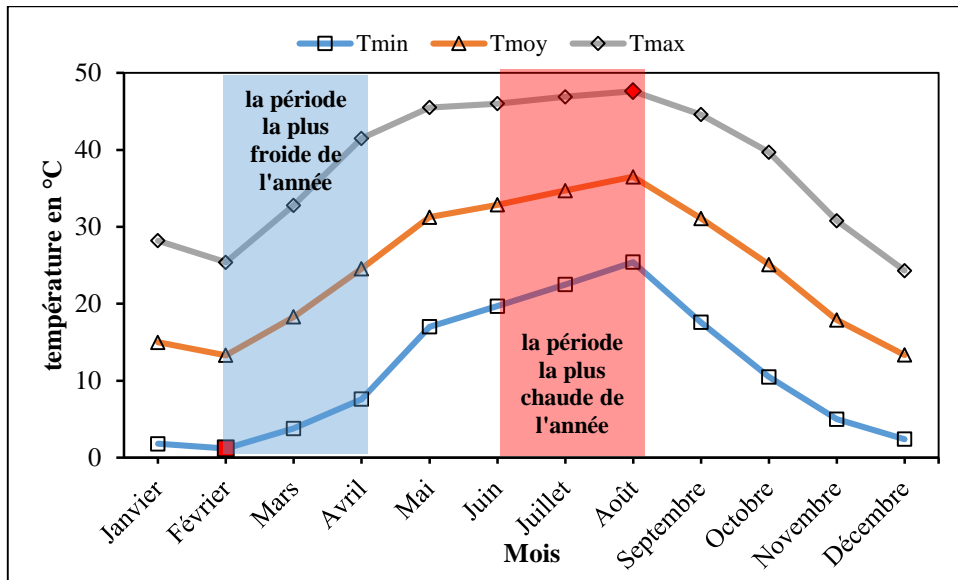
Sur une durée d'observation de 20 ans (à partir 1996 jusqu'à 2016), les données climatologiques sont mentionnées dans le Tableau n°4, ces données sont fournies par l'ONM de Ouargla. Ces données météorologiques montrent que la zone d'Ouargla a un climat désertique de type subtropical tempéré. La sécheresse permanente due la rareté des précipitations dans la plupart du temps, inférieures au double des températures. L'évapotranspiration potentielle est presque près de 60 fois supérieure à la pluviométrie, ce qui indique un déficit hydrique le long de l'année dans la région.

Tableau n°4 : Données climatiques de Ouargla sur la période d'observation (1996-2016)
(ONM 2016)

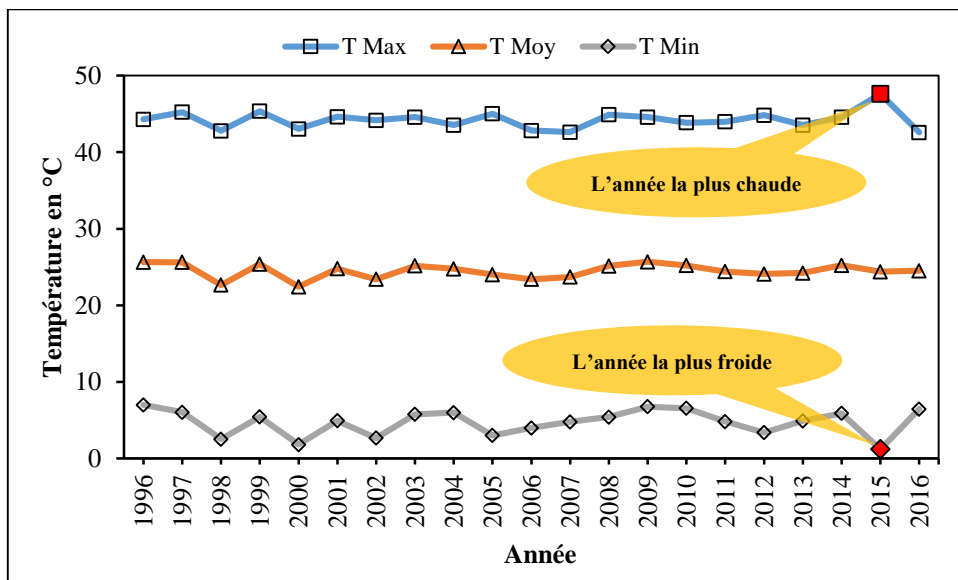
Paramètre	Température en (°C)		Humidité en (%)		Vitesse du vent en (km/h)		Précipitations cumulés en (mm)		Evaporation cumulées en (mm)	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Janvier	1,8	28,2	9	96	0,36	19,8	0	54,11	53,2	145,8
Février	1,2	25,4	12	100	4,32	18,72	0	24,5	65,5	187
Mars	3,8	32,8	9	86	3,96	24,84	0	21,72	83,6	299,9
Avril	7,6	41,5	8	71	5,76	25,92	0	6,32	124,4	390,6
Mai	17	45,5	7	68	6,48	28,08	0	50,9	152,7	514,3
Juin	19,7	46,0	3	52	3,96	27	0	3	184,5	583
Juillet	22,5	46,9	0	51	5,04	24,48	0	2,2	214,6	568,8
Août	25,41	47,6	0	67	3,96	23,4	0	13,1	161,9	622,2
Septembre	17,6	44,6	7	82	0,72	20,88	0	14,2	97,7	463,9
Octobre	10,5	39,7	11	80	1,08	21,96	0	36,4	93,6	323,3
Novembre	5	30,8	18	94	2,16	18,72	0	43,3	59	190,4
Décembre	2,4	24,3	25	100	3,24	17,64	0	24,5	55,9	130,4

II.2.1. Températures

L'analyse des valeurs de la température dans la région étudiée montre que l'hiver est froid s'étendant de décembre à mars (de mois de décembre jusqu'au mois de Mars) où la valeur de la température est varié entre (1,2 à 24,3 °C), La température minimale a été enregistrée en février 2015 (Graphique n°1 et n°2). Mais pendant l'été le climat change complètement et devient plus chaud. Ce climat en été est caractérisé par une chaleur très élevé, sa valeur maximale est de 47,6°C enregistrée au mois d'Aout à l'année 2015 (ONM 2016).



Graphique n°1: Variation de la moyenne mensuelle des températures dans la région d'Ouargla a été observée sur la période allant de 1996 à 2016.

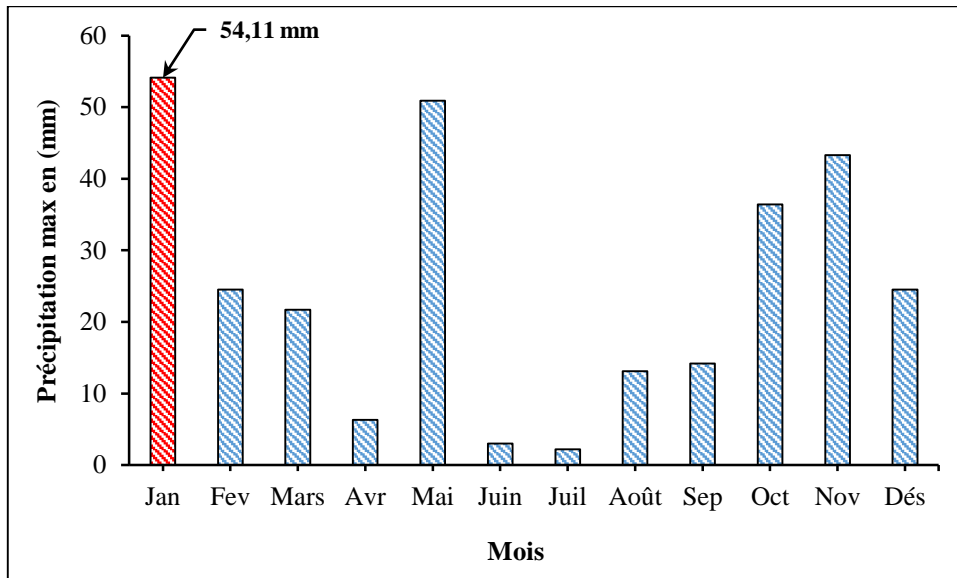


Graphique n°2 : Variation de la moyenne annuelle des températures dans la région d'Ouargla a été observée sur la période allant de 1996 à 2016.

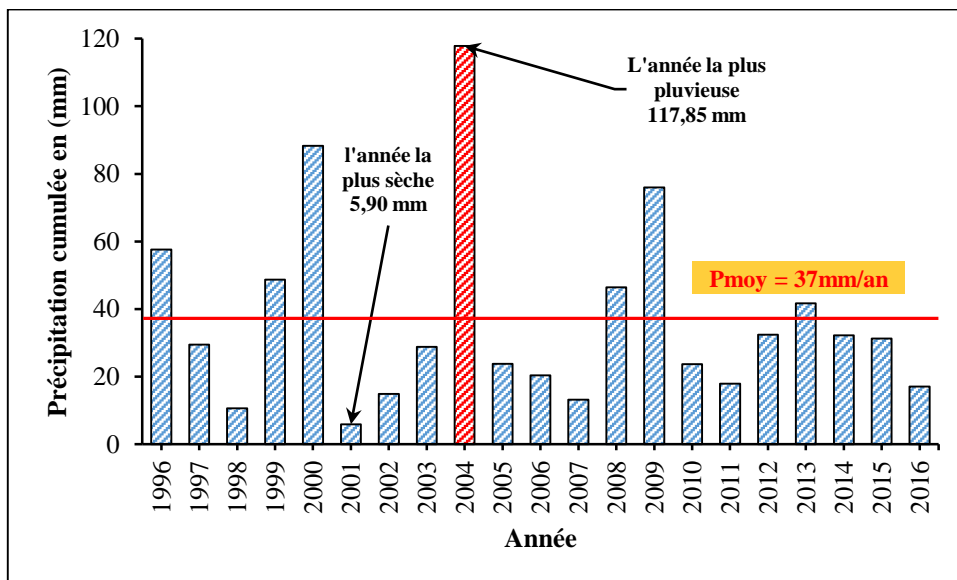
II.2.2. Pluviométrie

Dans l'ensemble de la région d'étude, la pluie est très rare, janvier est le mois le plus arrosé car la précipitation maximale cumulée atteignant près de 54 mm (Graphique n°3). Le nombre de jour pluvieux ne dépasse pas les 25 jours. Ces pluies orageuses se caractérisent par une forte intensité, entraînant des pluies abondantes qui ne durent parfois que quelques minutes.

Les précipitations mensuelles sont négligeables tout au long de l'année, étant nulles en juin, juillet et août, et se manifestent uniquement en hiver et en automne après une période sèche s'étendant d'avril à octobre (Graphique n°4). La moyenne annuelle calculée sur les 20 années s'élève à 37 mm/an (ONM 2016).



Graphique n°3 : Variation de la précipitation mensuelle maximale de la région de Ouargla pendant la période d'observation de 1996 à 2016



Graphique n°4 : Variation de la précipitation annuelle cumulée de la région de Ouargla pendant la période d'observation de 1996 à 2016

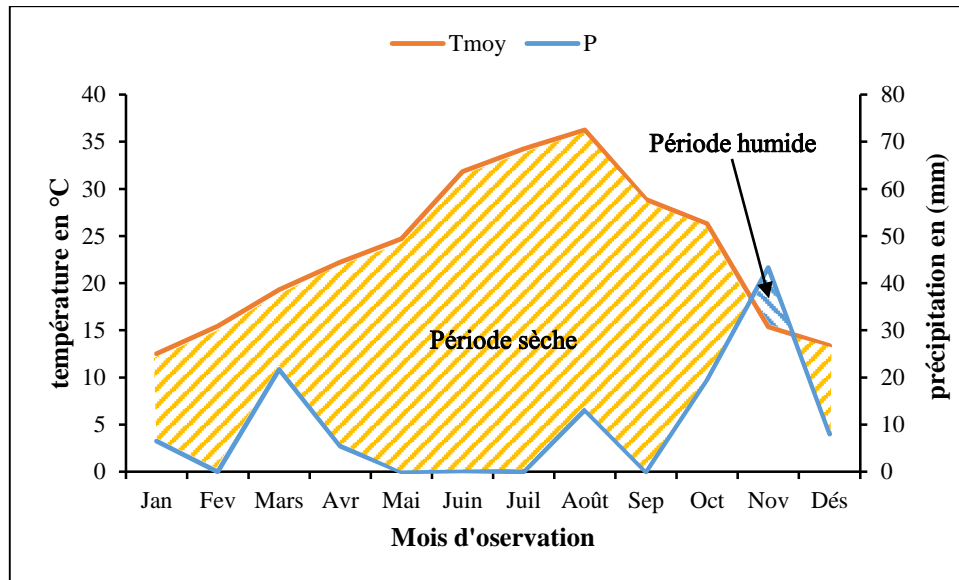
II.2.2.1. Diagramme pluviothermique

La représentation de ce diagramme est basée sur la projection des valeurs de la température moyenne et celles des précipitations, dans le même graphe. Ces valeurs sont portées sur les deux axes des ordonnées parall es en fonction du temps d'observation, dont l'échelle où la pluviométrie est inférieure ou égale à deux fois la température ($P \leq 2T$).

En 1953, Gausen et Bagnouls ont défini le mois sec comme celui où le total mensuel des précipitations (en millimètres) est inférieur ou égal à deux fois la valeur de la température moyenne mensuelle exprimée en  C. Le diagramme obtenu (Graphique n°5) permet mettre en

évidence La période humide est celle pendant laquelle la courbe des précipitations dépasse celle des températures. (Bagnouls and Gaussen 1957).

D'après le diagramme ombrothermique de l'année la plus pluvieuse (Graphique n°5) pour Ouargla, La période sèche s'étend sur une durée de 11 mois, mais La période humide a eu lieu en novembre.



Graphique n°5 : La représentation graphique de diagramme Ombrothermique de Gaussen et Bagnouls pour Ouargla en 2004, l'année la plus pluvieuse.

II.2.2.2. Quotient pluviométrique de Louis Emberger :

Ce quotient c'est une expression empirique de l'efficacité des pluies, adapté particulièrement aux zones méditerranéennes dans lesquelles il permet de classer les divers types de climats, allant du plus aride au plus humide (saharien, aride, semi-aride, subhumide et humide). Au sein de ces zones, Emberger a constaté que la différence de température ($M - m$) joue un rôle significatif pour la distribution spatiale des cultures. En effet, l'indice d'Emberger tient compte de la température minimale moyenne du mois le plus froid (m en °C), de la température maximale moyenne du mois le plus chaud (M en °C) et des précipitations annuelles (P), (Emberger 1955). L'indice d'Emberger Q_2 est calculé par la relation suivante :

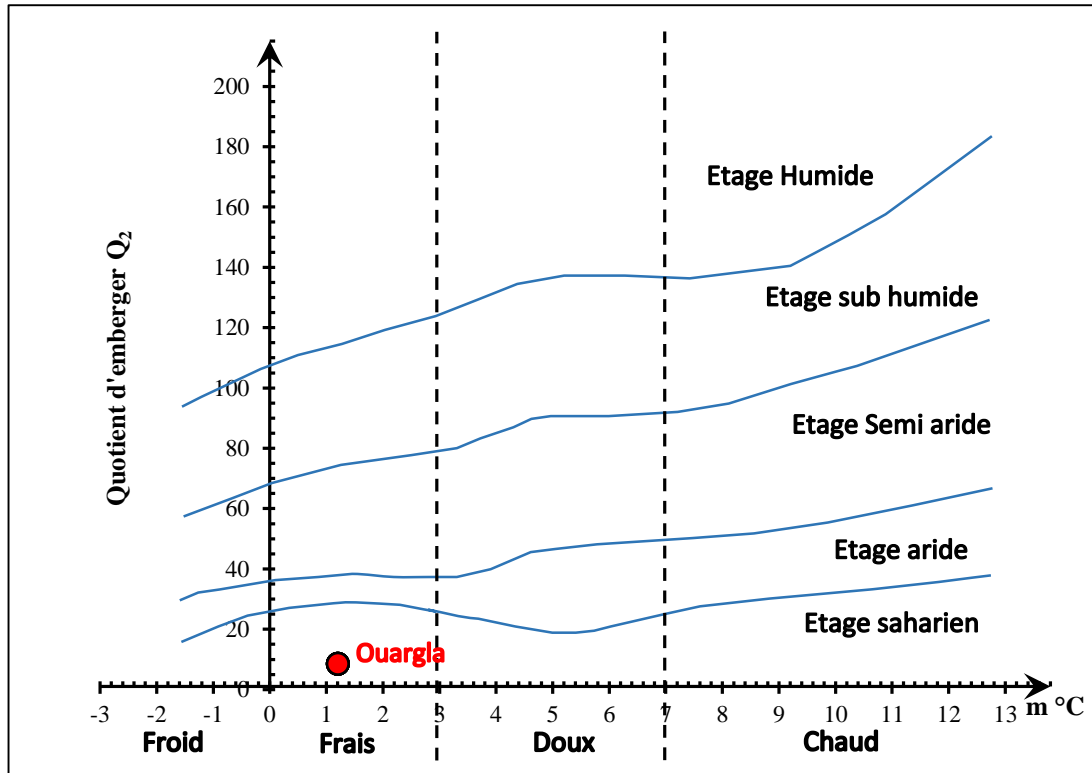
$$Q_2 = \frac{2000 P}{M^2 - m^2} \quad (6)$$

Où,

- Q_2 : quotient pluviométrique d'Emberger ;
- m : la moyenne des températures du mois le plus froid en kelvin ;
- P : pluviométrie annuelle en mm.
- M : la moyenne des températures du mois le plus chaud en kelvin ($^{\circ}\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273,15$) ;

Tableau n°5 : Définition de type de climat de Ouargla selon l'indice Emberger sur la période d'observation (1996-2016)

Station	P (mm)	M °C	m °C	Q ₂	Bioclimat	Variante de l'hiver
Ain El-Beida (Ouargla)	117,85	47,6	1,2	8,53	Saharien	Frais

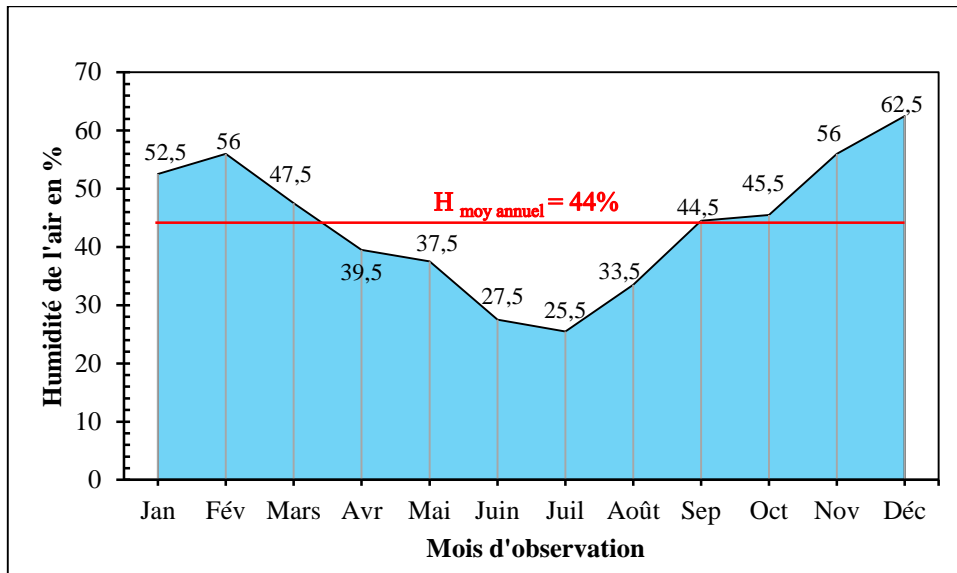


Graphique n°6 : Climagramme d'Emberger définissant l'étage bioclimatique de la région étudiée selon les données mesurées de la station météorologique d'Ain El-Beida (1996-2016).

La valeur du "Q₂" est inférieure à 10 (Q₂ < 10) (Tableau n°5) (Graphique n°6). Au niveau de la station météorologique de Ouargla, le cumul de précipitations annuel de l'année la plus pluvieuse, est supérieur à 100 mm (P > 100 mm), soit 117,85 mm. En raison de ces deux valeurs, Ouargla est située à l'étage bioclimatique Saharien avec un faciès Frais.

II.2.3. Humidité relative de l'air

L'humidité est enregistrée avec des valeurs faibles dans les régions Sahariennes, souvent inférieure à 20%, c'est seulement exceptionnelle durant certaines très courtes périodes dans les pluvieux jours, que nous observons des valeurs maximales, tandis que dans le Nord Sahara, elle a des valeurs d'humidité moyenne situent en générale entre 20 et 30% en été et représente 50% et 60% parfois plus en janvier (Laaboudi, Chabane et al. 2015).

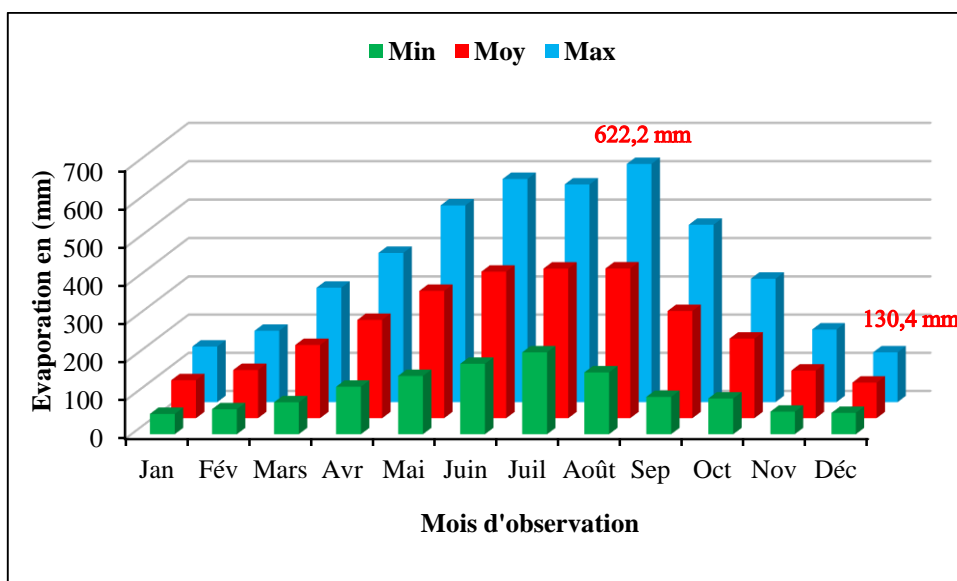


Graphique n°7 : Variation de l'humidité moyenne relative de l'air dans la région de Ouargla pendant la période d'observation de 1996 à 2016

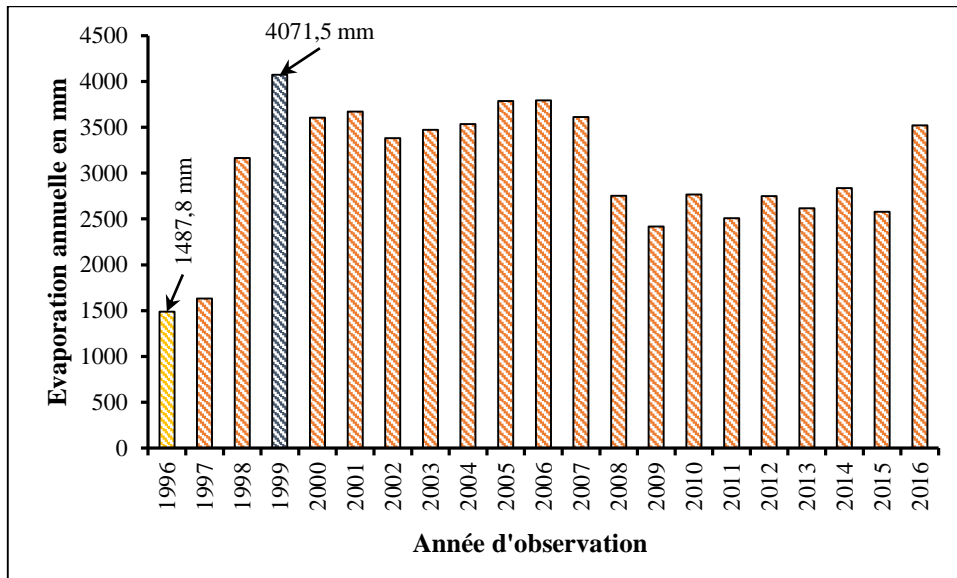
A Ouargla, l'humidité relative de l'air est très faible (Graphique n°7). Leurs valeurs moyennes sont variées entre 25,5% et 62,5%, sur la période d'observation qui est prise en considération. La moyenne la plus élevée de l'humidité est enregistrée au mois de décembre, atteignant 62,5%, tandis que le taux minimale est enregistré au mois de juillet, avec 25,5%, et une moyenne annuelle s'établit à 44% (ONM 2016).

II.2.4. Evaporation

L'évaporation consiste à transférer l'eau de la phase liquide vers la phase gazeuse. Lorsqu'elles sont constamment en mouvement, les molécules d'eau ont suffisamment d'énergie pour s'échapper dans l'atmosphère sous forme de vapeur.



Graphique n°8 : Variation de l'évaporation dans la région de Ouargla pendant la période d'observation de 1996 à 2016



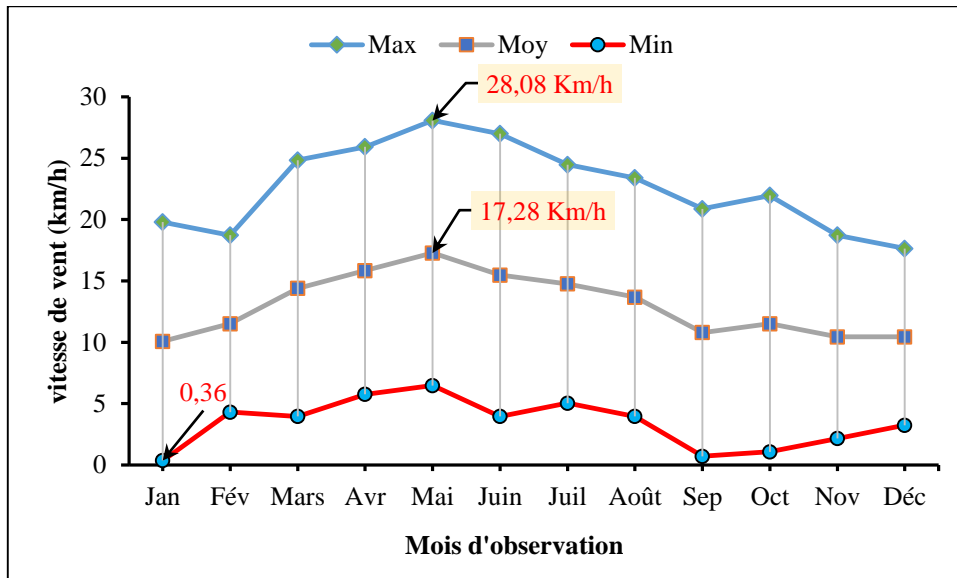
Graphique n°9 : Variation de l'évaporation annuelle dans la région de Ouargla pendant la période d'observation de 1996 à 2016

La mesure mensuelle de l'évaporation dans la région de Ouargla enregistre des valeurs très élevées, elles ont une moyenne de 240 mm/mois, la valeur maximale (622,22 mm) (Graphique n°8) est observée au mois d'août, au mois de décembre cette valeur se diminue pour atteindre une valeur minimale de 130,4 mm. Les enregistrements annuels montrent que l'évaporation est très variable (Graphique n°9), l'année la plus évaporative est 1999 avec une valeur cumulée de 4071,5 mm (ONM 2016).

II.2.5. Vitesse de vent

Les vents dans la région d'Ouargla viennent de la direction du Nord-est et du Sud. Les vents hivernaux les plus courants sont ceux occidentaux, alors qu'au printemps les vents prédominants sont ceux du Nord-Est et de l'Ouest. En été ils soufflent depuis le Nord-Est et à l'automne, les vents suivent une direction nord-est et sud-ouest. (ONM 2016)

D'après les données de la période d'observation choisie (1996-2016) (Graphique n°10), les vitesses de vents assez importants dans la période estivale (Avril – Juillet) avec une valeur maximale au mois de Mai (28 Km/h), la vitesse de vent moyenne maximale est observée entre le mois d'Avril et le mois de Mai (15,84 et 17,28 Km/h) (ONM 2016).



Graphique n°10 : Variation de la vitesse du vent dans la région de Ouargla pendant la période d'observation de 1996 à 2016

II.3. Conclusion

La climatologie de Ouargla présente les caractéristiques distinctives d'un climat désertique chaud. Les températures extrêmement élevées, l'abondance de l'ensoleillement, les précipitations rares et les vents occasionnels définissent le climat de cette région située dans le Sahara algérien.

Les températures peuvent facilement dépasser les 40°C, voire les 45°C, pendant les mois les plus chauds, tandis que les nuits restent relativement chaudes. L'ensoleillement est abondant tout au long de l'année, contribuant à des journées chaudes et ensoleillées même pendant les mois les plus frais. Les précipitations sont extrêmement limitées, souvent inférieures à 100 mm par an, concentrées principalement pendant les mois d'hiver, bien que les quantités restent modestes.

Les vents forts peuvent souffler à travers la région, soulevant du sable et provoquant des tempêtes de sable occasionnelles. Ces conditions climatiques influent sur divers aspects de la vie dans la région, de l'agriculture aux activités quotidiennes des habitants.

PARTIE III

Méthodologie et Résultats

- **CH.I Matériels et Méthodes**
- **CH. II Résultats et Discussion**
- **CH. III Aptitudes des eaux à l'irrigation**



Chapitre I

Matériels et Méthodes

I.1. Introduction :

Avant de présenter résultats obtenus de la caractérisation physico-chimiques des eaux à des fins d'irrigation et du sol au niveau des deux périmètres sélectionnés, nous jugeons utile de présenter le matériel et les méthodes utilisées pour l'analyse et le prélèvement des échantillons.

I.2. Présentation des Sites expérimentaux

On trouve les périmètres étudiés au sein de la commune de Hassi Ben Abdallah, cette commune est située à une distance environ 25 km du centre de Ouargla. " Le Périmètre des Jeunes" est le nom de premier périmètre qui est situé au nord-est à environ 4 km de la localité de Hassi Ben Abdallah. Le deuxième périmètre étudié, nommé "Périmètre El-Wifak" est localisé au sud-est de Hassi Ben Abdallah, à proximité de la route nationale N° 49 menant vers la ville de Hassi Messaoud (Figure n°9).



Figure n°9 : situation géographique des périmètres étudiés Image extraite de Google Earth le 30/10/2018

Ces périmètres ont été établis en 1991 et en 1985 respectivement, ils s'étendent sur une superficie totale de 432 hectares, répartie en 144 parcelles de 3 hectares chacune. Le sol de ces périmètres est caractérisé par son appauvrissement en matière organique et sa texture principalement composée de sables fins, correspondant aux caractéristiques du sol de la région d'Ouargla. Ils satisfont aux critères requis, notamment une superficie suffisante et une source d'eau d'irrigation provenant d'une nappe souterraine de qualité médiocre. L'irrigation est pratiquée à la fois par submersion et par goutte à goutte. Diverses cultures y sont pratiquées, telles que le palmier dattier, le medicago, les cultures maraîchères et l'arboriculture. En ce qui

concerne l'assainissement des excédents d'irrigation, il est important de noter l'absence d'un réseau de drainage, tant en surface qu'en profondeur (Figure n°10).



Figure n°10 : photos au sein des périmètres étudiés dans la région de Ouargla (a : périmètre El-Wifak ; b : périmètre des jeunes)

I.3. Echantillonnage du sol et de l'eau d'irrigation

Les échantillons de sol ont été prélevés au sein des parcelles localisés dans les périmètres étudiés. Deux profils de sol ont été prélevés de manière systématique pour chaque parcelle, l'un provenant de la zone irriguée et l'autre de la zone non irriguée (Figure n°11).



Figure n°11 : photos présente la réalisation des sondages du sol au niveau des périmètres étudiés dans la région de Ouargla.

En utilisant une tarière de 90 mm de diamètre, les échantillons ont été prélevés de manière à obtenir un échantillon tous les 30 cm (soit 5 couches) jusqu'à une profondeur de 150 cm. Au total, 45 échantillons ont été collectés. Par la suite, ces échantillons ont été séchés à l'air libre, broyés, puis tamisés à 2 mm en vue de réaliser des analyses physiques et chimiques.



Figure n° 12 : photos présente la réalisation des sondages du sol au niveau des périmètres étudiés dans la région de Ouargla (a : Eau Mio-pliocène ; b : Eau albienne).

I.4. Données hydrochimiques

Dans cette étude, les données exploitées, comprennent les résultats d'analyses physicochimiques des eaux souterraines d'irrigation du Mio-Pliocène et de la profonde nappe albienne dans la région de Ouargla. Un total de 38 forages agricoles (Figure n°13) a été sélectionné, garantissant ainsi l'acquisition des données représentatives reflétant la spatiale variabilité de la qualité de ces eaux pour les deux aquifères étudiés.

Les analyses du sol et de l'eau d'irrigation ont été effectuées dans les laboratoires d'analyses qui sont :

- Laboratoire de centre de recherche scientifique à université de KASDI MERBAH Ouargla.
- Laboratoire de l'Algérienne Des Eaux ADE à Ouargla.

Pour ces travaux réalisés on a utilisé le matériel suivant

- Pour la réalisation des sondages on a utilisé une tarière de diamètre de 90 mm, ce dernier permet de sonder jusqu'à une profondeur de 1,50 m ;
- Appareil de GPS pour la localisation.
- Un multi-paramètre de terrain nous a permis d'effectuer les analyses physiques pour les échantillons prélevés in-situ. Ce dernier mesure le PH ; CE ; la température...etc.

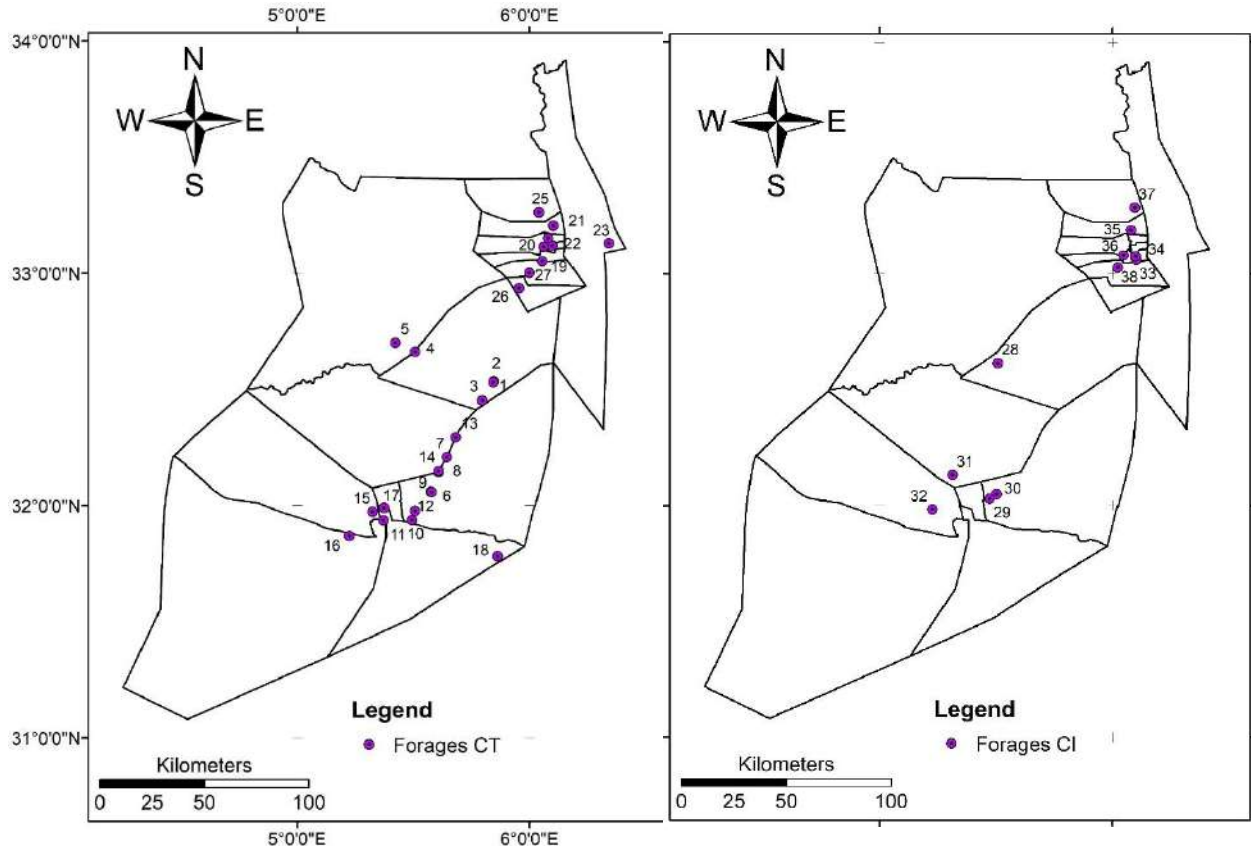


Figure n°13 : répartition des forages étudiés du CI et CT au niveau de la région étudiée

Tableau n°6 : Localisation des sondages au niveau des périmètres

Sondage	Coordonnées	
	X	Y
SJ1	32° 03' 28,4"	5° 29' 53,4"
SJ2	32° 03' 34,4"	5° 29' 27"
SJ3	32° 03' 17,9"	5° 30' 7,7"
SJ4	32° 02' 48,2"	5° 29' 40,1"
SW1	31° 55' 41,1"	5° 29' 12"
SW2	30° 55' 42,3"	5° 29' 10,9"
SW3	31° 55' 49,8"	5° 29' 19,9"
SW4	31° 56' 19,6"	5° 29' 36,3"
SW5	31° 55' 48,4"	5° 29' 8,4"

I.4.1. Analyses physico-chimiques :

Dans les laboratoires on a utilisé le matériel suivant :

- Verriers (Entonnoirs ; Bêchers de différents volumes,.....etc.) ;
- Capsules en porcelaine ;
- Etuve de séchage réglable ;
- Dessiccateur ;
- Four à moufle ;
- Balance Analytique ;

- Agitateur électrique ;
- PH-mètre de laboratoire ;
- Conductimètre de laboratoire ;
- Spectrophotomètre à flamme ;
- Spectrophotomètre à absorption atomique.

I.5. Outils informatiques

L'évaluation et la visualisation des résultats ont été effectuées à l'aide du logiciel Diagramme et l'Excel 2013 et des logiciels destinés au système d'information géographique SIG (ArcGIS ; QGIS). Pour l'interpolation spatiale nous avons utilisé la méthode l'aide de la technique d'interpolation inverse (IDW).

I.6. Méthodes de prélèvement et d'analyse :

Cette étude vise à caractériser et évaluer le degré de la salinisation du sol au niveau des périmètres choisies et d'étudier la qualité des eaux d'arrosage dans la région de Ouargla.

La prédiction de la géochimie de la salinité des eaux est une approche novatrice qui pourrait se révéler utile pour mieux connaître les répercussions de la concentration saline sur les sols et l'environnement au sein ces périmètres. La quelle démarche s'appuie sur les éléments suivants :

- Echantillonnage et analyses de l'eau d'irrigation du sol ;
- Utilisation des rapports ioniques caractéristiques, pour parvenir à une approche globale des mécanismes d'accumulation de la salinité ;
- Détermination de l'état de saturation des eaux par les principales espèces chimiques ;
- Choix d'un indicateur de l'état de concentration des eaux (facteur de concentration) pour décrire le comportement des espèces chimiques selon ce facteur, et préciser davantage les processus d'acquisition de la salinité de l'eau

La méthodologie adoptée est réalisée à travers les étapes suivantes.

I.6.1. Sorties de prospection :

Nous avons fait des sorties le long de la des périmètres ; dont les objectifs sont :

- Réalisation de neuf (09) sondages et localiser les par GPS (Tableau n° 6).
- Collecter certaines informations telles que : La nature des sols ; le mode d'irrigation ; les types des plantes cultivéesetc.

I.6.2. Caractérisation des eaux et sols

La salinité de l'eau d'arrosage est directement évaluée in situ à l'aide d'un appareil de terrain multi-paramètre mesurant la température, la conductivité électrique, le pH, l'oxygène dissous et TDS. Les teneurs en sel sont mesurées par la suite en laboratoire.

Pour les sols, les échantillons sont prélevés à l'aide d'une tarière manuelle, couvrant les horizons du sol. Ces échantillons sont ensuite acheminés au laboratoire où leur conductivité électrique (CE) et leur concentration en sels sont mesurées sur un extrait dilué 1/5.

I.6.2.1. Humidité résiduelle des échantillons du sol

Le séchage des échantillons a été réalisé dans une étuve à une température de $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ jusqu'à ce que leur masse demeure constante. En général, une nuit, soit environ 15 heures, est suffisante pour le séchage complet. La teneur en eau initial de l'échantillon, est exprimée par la différence entre le poids initial et le poids après l'étuvage.

I.6.2.2. Analyses granulométrique

Cette analyse, également appelée analyse mécanique, consiste de faire la séparation des composants minéraux du sol en différentes catégories, classées en fonction de la taille des particules, généralement celles inférieures à 2 mm, et la détermination des proportions relatives de ces catégories en pourcentage du poids totale du sol minéral. Les résultats de cette analyse sont présentés sous forme d'une courbe granulométrique. De plus, la pente moyenne de cette courbe permet de décrire l'uniformité de la taille des éléments minéraux présents dans le sol.

a) Coefficient d'uniformité

Ce coefficient correspond au rapport entre le diamètre à travers lequel 60% des particules peuvent passer et celui permettant le passage de seulement 10% des particules. Il est calculé conformément à la norme française (NFP 18-540) par la relation suivante :

$$C_u = d_{60} / d_{10} \quad (7)$$

Ce coefficient sert d'indicateur pour évaluer l'uniformité ou l'irrégularité de la distribution des tailles de particules dans la courbe granulométrique. L'uniformité de la courbe est évaluée en fonction de la référence suivante : lorsque $C_u < 2$, la granulométrie est considérée comme uniforme ; dans le cas contraire, elle est considérée comme variée.

b) Coefficient de courbure

Ce coefficient permet de caractériser la forme de la courbe granulométrique offrant ainsi une vue précise sur la répartition des tailles des particules dans un matériau granulaire. Ce coefficient est calculé en utilisons les diamètres d_{10} , d_{30} et d_{60} .

$$C_c = d_{30}^2 / (d_{10} \times d_{60}) \quad (8)$$

En présence d'un sol bien gradué, on observe une diversité significative de diamètres. Si le C_c est compris entre 1 et 3, la courbe granulométrique descend de manière régulière, signalant ainsi une grande diversité de diamètres. Un C_c trop élevé ou trop faible indique l'absence de quelques diamètres entre les deux diamètres effectifs d_{10} et d_{60} , indiquant une mauvaise graduation granulométrique (Thior, Sané et al. 2019).

I.6.2.3. Extraction de la solution du sol

Dans cette étude, nous avons examiné l'état de la salinité du sol et mesuré la concentration saline des sels solubles dans l'extrait aqueux 1/5. Cette méthode soulève une problématique en ce qui concerne la validité des résultats, pour les raisons suivantes :

- Les sels qui existent dans le sol ont des degrés de solubilité variables entre eux.
- La dilution est au moins 15 fois plus grande dans l'extrait de saturation.
- Dans l'extrait de saturation, un pourcentage relativement plus élevé des sels peu solubles est présent. En revanche, dans l'extrait 1/5, un pourcentage relativement plus élevé des sels les plus solubles est retrouvé.

I.6.2.3.1. Préparation de l'extrait dilué 1/5

- Prendre un poids de 50 g du sol à analyser et tamiser le dans un tamis de 2 mm puis placer le sol tamisé dans une fiole d'agitation de capacité de 350 ml ;
- Verser 250 ml d'eau distillée dans la fiole (à condition, l'humidité résiduelle du sol doit être négligée c.-à-d. moins de 5%) ;
- Lancer l'agitation pendant une durée d'une heure. Dans le cas d'existence du gypse dans l'échantillon, introduire le cristal de thymol et laisser le mélange reposer une nuit pour favoriser la dissolution complète du gypse ;
- Procéder la filtration de la suspension. En cas de trouble dans le filtrat, répéter la filtration ou recourir à la centrifugation si nécessaire. (Figure n° 14)
- Prendre les mesures du pH et de la conductivité électrique et noter les résultats



Figure n° 14 : Agitation et filtration de l'extrait dilué 1/5

I.6.2.4. Dosage du calcaire

Le carbonate de calcium (CaCO_3) est la forme la plus connue du calcaire, cet élément parmi les minéraux les plus abondants de la couche superficielle de la Terre. Il forme des roches granuleuses avec des grains de différentes tailles, allant de fin au gros ; sa densité est d'environ $2,7 \text{ g/cm}^3$. Il présente une faible solubilité dans l'eau et réagit fortement en présence d'acides.. Le dosage du calcaire est réalisé par titrimétrie (Figure n°15).



Figure n°15 : processus de mesure du calcaire

I.6.2.5. Le gypse

Le gypse est un minéral de faible dureté, avec une densité de $2,3 \text{ g/cm}^3$. Il peut avoir une structure fibreuse, lamellaire ou granulaire. Sa couleur naturelle est blanche, mais en raison de diverses impuretés, il peut parfois afficher des teintes grises, rougeâtres, jaunâtres ou noires. Le gypse se dissout facilement dans l'eau. Sur le plan chimique, il est composé de sulfate de

calcium hydraté, avec la formule chimique $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Le gypse est généralement analysé par la méthode de la calcination en four.

I.6.2.6. Conductivité électrique et le pH

La conductivité électrique a été mesurée à l'aide d'un conductimètre équipé d'une électrode, tandis que le pH a été mesuré à l'aide d'un pH-mètre doté d'une électrode.

I.6.2.7. Dosage des anions

a) Les Chlorures

Afin de produire le chlorure d'argent insoluble, Les ions chlorure réagissent avec ceux d'argent. Le chlorure d'argent formé précipite de manière quantitative. En ajoutant un léger excès d'ions argent, forme du chromate d'argent brun-rouge en présence d'ions chromate ajoutés comme indicateur. Cette réaction est employée pour indiquer le point d'équivalence du titrage. Pendant le titrage, le pH est maintenu dans la plage de 5 à 9,5 pour favoriser la précipitation.

b) Les Sulfates

La quantification des sulfates a été réalisée à l'aide d'un spectrophotomètre DR 2800 (Figure n°16), un appareil qui fonctionne selon la loi de Beer-Lambert. Deux programmes ont été utilisés : le programme utilisateur ainsi que le programme HACH. Dans le premier, on prépare une gamme d'étalonnages en mesurant l'absorption moléculaire d'étalons contenant des concentrations connues, afin de mesurer leur absorbance.



Figure n°16 : mesure de la teneur en chlorures par le spectrophotomètre DR 2800

c) Carbonates et bicarbonates

Pour neutraliser un volume d'eau à examiner, il faut déterminer les volumes consécutifs d'acide fort dans la solution diluée requis afin de neutraliser l'eau à examiner, aux niveaux de pH 8.3 et 4.3. La première mesure est utilisée pour déterminer le titre alcalimétrique (TA) (Figure n°17), tandis que la seconde permet de calculer le titre alcalimétrique complet (TAC).



Figure n° 17 : mesure de la teneur en Carbonates et bicarbonates par la Méthode volumétrique de TAC et TA

I.6.2.7. Dosage des cations

a) Sodium et potassium

L'appareil de photomètre à flamme Dr LANGE (JENWAY) (Figure n°18) est l'outil le plus utilisé pour mesurer le potassium et le sodium, car la photométrie de flamme considérée comme l'un des procédés les plus rapides et sensibles actuellement disponibles pour la détermination des éléments alcalins et alcalino-terreux.



Figure n°18 : mesure de la teneur en Sodium et potassium par la photométrie à flamme Dr LANGE (JENWAY)

b) Calcium et Magnésium

On utilise une solution de sel disodique de l'acide éthylènediaminetétraacétique (EDTA) à pH=10 pour le titrage molaire des ions de magnésium et de calcium. L'indicateur coloré employé est le noir érichrome T, qui change de couleur en rouge foncé ou violette en présence des ions de magnésium et de calcium (Figure n°19).



Figure n°19 : mesure de la teneur en calcium et en magnésium par la Méthode volumétrique

I.6.2.8. Résidu sec

Le résidu sec exprime la teneur totale en matières dissoutes et en suspension dans l'eau. En revanche, la mesure du résidu sur l'eau filtrée permet d'évaluer uniquement les matières dissoutes. Le procédé consiste à évaporer un échantillon d'eau, puis à mesurer le poids des résidus solides restants.

I.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présentés le matériel et les différentes méthodes d'analyses utilisées pour la détermination des paramètres physico-chimiques et granulométrique du sol et aussi les divers facteurs physico-chimiques qui caractérisent l'eau d'irrigation. Ces facteurs sont considérés comme des indicateurs de type de sol et de eaux. Dans le suivant chapitre on va essayer de présenter les différents résultats obtenus et leurs discussions.



Chapitre II

Résultats et Discussions

II.1. Résultats des mesures et des analyses

II.1.1. Introduction

Dans cette partie, nous rapportons les résultats des mesures de différentes analyses que nous avons effectuées sur les eaux d'irrigation pour les deux nappes exploitées en irrigation et les sols irrigués et non irrigués échantillonnées au niveau des périmètres étudiés. Sous forme des tableaux, les valeurs des différents paramètres sont présentées statistiquement pour chaque nappe ou périmètre.

II.1.2. Données hydrochimiques

L'analyse physico-chimique d'eau d'irrigation constituent le pH, le résidu sec, la conductivité électrique (CE) et les paramètres chimiques sont Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- .

II.1.2.1. Paramètres physiques

Dans le tableau n°7 nous avons présenté les différents paramètres physiques des eaux d'irrigation pour les forages choisis au niveau de la wilaya d'Ouargla pour les deux nappes étudiées.

Tableau n°7 : Résultats d'analyses des paramètres physiques des forages choisis au niveau de la wilaya d'Ouargla pour les deux nappes étudiées

Elément	Unité	Nappe Miopliocène (CT)				Nappe Albienne (CI)			
		Max	Min	Moy	Ec-ty	Max	Min	Moy	Ec-ty
CE	mS/cm	6,52	4,14	4,99	0,67	3,84	2,33	2,93	0,59
RS	g/l	6,11	2,11	3,96	0,97	3,04	1,50	2,27	0,51
PH		8,10	6,62	7,67	0,35	8,37	7,22	8,00	0,34

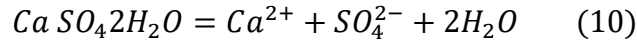
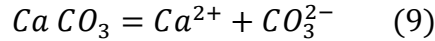
La conductivité (Tableau n°7) pour les eaux de différentes nappes varie entre 2,33 à 6,52 ms/cm qui indiquent une minéralisation très élevée, la valeur maximale est enregistrée au forage F1 (nappe Miopliocène CT) à la commune d'El-hadjira. La valeur minimale de la conductivité est observée au forage F38 (nappe albienne CI) à la commune de Temacine. Les valeurs de résidu sec indiquent une salinité excessive aux forages qui captent la nappe Miopliocène, ces valeurs varient entre 6,11 à 1,50 g/l. Les valeurs de pH dans les eaux d'irrigation sont légèrement alcalines. Ces eaux possèdent des pH variant entre 8,10 à 6,62.

II.1.2.2. Electrolytes minéraux

Les résultats d'analyse chimique pour les eaux destinés à l'irrigation des périmètres agricoles, présentés sous forme des tableaux qui regroupent deux paramètres chimiques.

a) Calcium (Ca²⁺) et magnésium (Mg²⁺)

La dissolution des formations carbonatées (CaCO₃) est la cause principale de la présence des ions Ca²⁺ dans les eaux souterraines conformément à la formule (9), De plus, leur présence est également associée à la dissolution des formations gypseuses (CaSO₄) selon la formule (10).



Le magnésium est dérivé de la dissolution des formations carbonatées riches en magnésium, notamment la dolomite, comme l'indique la relation (11) :

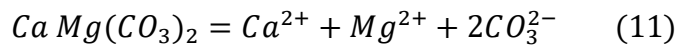


Tableau n°8 : Résultats d'analyses de Calcium (Ca²⁺) et magnésium (Mg²⁺) des forages choisis au niveau de la wilaya de Ouargla pour les deux nappes étudiées

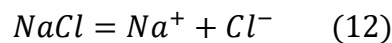
Elément	Unité	Nappe Miopliocène (CT)				Nappe Albienne (CI)			
		Max	Min	Moy	Ec-ty	Max	Min	Moy	Ec-ty
Ca ²⁺	mg/l	529,06	217,50	352,48	93,39	188,80	110,80	151,00	29,72
Mg ²⁺		355,80	94,77	193,94	73,86	181,80	75,20	107,92	36,08

Les eaux d'irrigation présentent des teneurs élevées en calcium. Ces eaux riches en calcium qui dépasse la concentration de **500 mg.l⁻¹** à la nappe Miopliocène (Tableau n° 8). Cette valeur diminue on allant vers la nappe albienne, pour atteindre une valeur de **275 mg.l⁻¹**.

Les teneurs en magnésium détectées sont considérablement élevées dans les eaux d'irrigation. Ces eaux affichent des teneurs en magnésium avec une moyenne de **193,94 mg.l⁻¹** dans les eaux Miopliocènes et une valeur de **112,34 mg.l⁻¹** dans les eaux albiennes.

b) Sodium (Na⁺) et Potassium (K⁺)

Le sodium provient principalement de la dissolution de l'halite (NaCl) selon la relation suivante :



Deux sources essentielles du potassium, les évaporites, en particulier de la Sylvite (KCl) (13), ou résulte de l'altération des argiles potassiques.

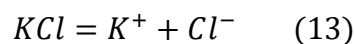


Tableau n°9 : Résultats d'analyses de Sodium (Na⁺) et Potassium (K⁺) des forages choisis au niveau de la wilaya d'Ouargla pour les deux nappes étudiées

Elément	Unité	Nappe Miopliocène (CT)				Nappe Albienne (CI)			
		Max	Min	Moy	Ec-ty	Max	Min	Moy	Ec-ty
Na ⁺	mg/l	932	401	671,48	182,47	437,50	184,50	276,64	103,19
K ⁺		44	9,50	22,73	9,41	44,00	14,00	20,30	9,67

Les eaux d'irrigation présentent des concentrations élevées en sodium, avec une valeur maximale de plus de **932 mg.l⁻¹** dans le forage F22 (Tableau n° 9). Ces eaux Miopliocènes ont des concentrations élevées en cet élément. La concentration moyenne est de l'ordre **671,48 mg.l⁻¹**.

Les analyses des eaux étudiées révèlent des concentrations de potassium qui sont relativement basses, et dépassent légèrement la norme (**12 mg.l⁻¹**). Les concentrations de potassium dans les eaux d'irrigation présentent une moyenne avoisine **16 mg.l⁻¹**.

c) Chlorure (Cl⁻) et Sulfates (SO₄²⁻)

La dissolution de l'Halite est la source principale de l'existence de chlorure (la relation n° 12). Effectivement, les chlorures, tout comme le sodium, affichent les teneurs les plus élevées dans les eaux d'irrigation Miopliocènes, avec une valeur maximale de plus de **2 g.l⁻¹** (Tableau n° 10) enregistrée dans le forage F22 à la commune de Zaouïa Abidia. La concentration la plus élevée dans les eaux albiennes avec une moyenne est plus de **1,2 g.l⁻¹**.

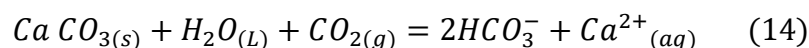
Tableau n°10 : Résultats d'analyses de Chlorure (Cl⁻) et Sulfates (SO₄²⁻) des forages choisis au niveau de la wilaya d'Ouargla pour les deux nappes étudiées

Elément	Unité	Nappe Miopliocène (CT)				Nappe Albienne (CI)			
		Max	Min	Moy	Ec-ty	Max	Min	Moy	Ec-ty
Cl ⁻	mg/l	2047,50	550,25	1239,12	399,62	650,00	366,00	546,36	100,72
SO ₄ ²⁻		2900	650	1489,26	503,06	980,00	487,00	757,55	169,32

Lorsque les formations du gypse dissolvent, les ions de sulfate présentent dans les eaux comme l'indique la relation n°12. Les concentrations des sulfates dans les eaux Miopliocène dépassent **2800 mg.l⁻¹**. La moyenne de ces concentrations dépasse légèrement **1400 mg.l⁻¹**. Pour les eaux albiennes, cet élément moins présent que celles Miopliocène, sa concentration maximale atteinte une valeur de **980 mg.l⁻¹**.

d) Bicarbonates (HCO₃⁻)

Les bicarbonates qui existent dans l'eau sont le résultat de la dissolution des formations carbonatées (relation n°14) telles que le calcaire et la dolomite, provoquée par des eaux riches en gaz carbonique. La somme des équations de dissolution est la suivante :



Les eaux présentant un pH alcalin inférieur à 8.3 restent stables en termes de bicarbonates dans les nappes utilisées à des fins d'irrigation.

Tableau n°11 : Résultats d'analyses de bicarbonates (HCO₃⁻) des forages choisis à Ouargla pour les deux nappes étudiées

Elément	Unité	Nappe Miopliocène (CT)				Nappe Albienne (CI)			
		Max	Min	Moy	Ec-ty	Max	Min	Moy	Ec-ty
HCO ₃ ⁻	mg/l	210	15	111,54	48,21	225,42	43,20	110,79	77,52

Dans les eaux albienne, la concentration moyenne en bicarbonates observées est de **110,79 mg.l⁻¹**. Les eaux les plus bicarbonatées sont, évidemment, celles du forage F35 à la commune Meggarine avec une valeur de **225,42 mg.l⁻¹**. A un degré moindre dans le forage F23 avec **210 mg.l⁻¹**, la concentration la plus faible est celle de forage F21 à la commune Meggarine avec une valeur de **15 mg.l⁻¹** (Tableau n° 11).

e) **Indices de saturation :**

Pour étudier l'équilibre eaux-minéraux, l'utilisation de l'indice de saturation (IS) est très importante. Si la valeur est positive indique une sur-saturation ce qui signifie que la précipitation du minéral est possible. Si la valeur est négative, indique qu'il y a une sous-saturation à cause de la dissolution du minéral. Si la valeur de ce paramètre (IS) est nul, indique que l'eau en équilibre (saturée) par rapport à la phase minérale, L'IS est déterminé par la relation suivante :

$$IS = \log \left(\frac{PAI}{Pks} \right) \quad (15)$$

Avec :

- PAI : le produit d'activité ionique des espèces chimiques en solution ;
- Pks : produit de solubilité d'équilibre en phase solide à la température spécifiée.

Tableau n°12 : Résultats des IS pour les deux nappes étudiées

Elément	Nappe Miopliocène (CT)				Nappe Albienne (CI)			
	Max	Min	Moy	Ec-ty	Max	Min	Moy	Ec-ty
Anhydrite	-0,43	-0,86	-0,61	12,77	-0,90	-1,24	-1,03	11,27
Aragonite	0,92	-0,95	0,17	44,42	0,90	-0,46	0,21	46,21
Calcite	1,06	-0,81	0,32	44,46	1,04	-0,32	0,35	46,15
Dolomite	2,00	-1,74	0,70	98,50	2,28	-0,46	0,89	94,74
Gypsum	-0,21	-0,64	-0,39	12,62	-0,68	-1,02	-0,81	11,27
Halite	-4,43	-5,30	-4,82	24,31	-5,22	-5,75	-5,51	19,76

Les valeurs de l'indice de saturation (IS) des minéraux (tableau n° 12) indiquent que l'eau souterraine caractérisée par une sous-saturation totale en gypse ; en anhydrite et en halite, le gypse varie de, -0,64 à -0,21 pour les eaux Miopliocènes et de -1,02 à -0,68 pour la nappe albienne. L'anhydrite son indice de saturation globalement pour les deux nappes étudiées, est compris entre de -1,24 et -0,43. L'halite est sous saturé, sa valeur moyenne varie entre -5,51 et

-4,82. Pour la dolomite a des valeurs positives et négatives, ce qui traduit qu'il y a des échantillons sursaturés en dolomite et d'autres sous-saturés en ce minéral. La calcite et l'aragonite, enregistrent comme la dolomite, des valeurs supérieures au zéro et d'autres inférieures.

II.1.2.3. Conclusion

Les résultats d'analyses obtenues pour les nappes étudiées, révèlent des pH allant d'alcalins à neutres, des conductivités électriques très élevées reflètent une minéralisation totale excessive, des grands taux salinité et du résidu sec, ces valeurs ont une spatiale variabilité hétérogène d'un forage d'eau à l'autre.

Dans les aquifères étudiées, les teneurs en éléments majeurs sont élevées, Indiquent une lithologie abondante en évaporites (halite, gypse, etc.) de la formation rocheuse du réservoir. Les résultats de teneurs en cations et en anions démontrent, une grande dissolution des formations carbonatées dans eaux d'irrigation, cette dissolution engendre une richesse en calcium et en magnésium. De plus, le sodium qui vient principalement de l'halite dissolvant, est présent dans les eaux étudiées à des valeurs très élevées, par contre les teneurs en potassium sont faibles. Le chlorure de même que le sodium, affiche des teneurs très élevés. Concernant les ions sulfatés, leur présence indique qu'il y a une source de dissolution du gypse, le sulfate domine les eaux d'arrosage avec les concentrations les plus élevés vis-à-vis des autres éléments majeurs. Les formations carbonatées riches en calcaire et en dolomite, s'élève les concentrations des bicarbonates dans les eaux souterraines, le bicarbonate est présent dans les eaux d'irrigation de la zone d'étude, avec des teneurs plus ou moins élevés.

II.1.3. Résultats d'analyses du sol

II.1.3.1. Analyse granulométrique

Pour la détermination de la répartition des constituants d'origine minérale dans le sol, on a recours à l'analyse granulométrique, cette analyse permette de distinguer les éléments ont un diamètre supérieur à 2 mm dit les éléments grossiers, les particules qui possèdent un diamètre moins de 2 microns sont qualifiés d'éléments fins, se subdivisant en argile, limons et sables. Les sols sont ainsi classifiés en différentes catégories (sableuses, limoneuses, argileuses, etc.) en fonction de l'importance relative de ces composants.

Quarante-deux échantillons ont été prélevés dans les périmètres étudiés à chaque profondeur, ce prélèvement est réalisé par la tarière. Les échantillons ont été analysés au

laboratoire. L'analyse granulométrique concerne les fractions sableuses, qui, après traitement (lavage et séparation de la fraction sableuse, puis séchage à l'étuve), sont passées à travers une colonne de neuf tamis vibrants avec des mailles comprises entre 0,08 et 10 mm.

Tableau n°13 : Catégories granulométrique des sables aux différents sondages

Elément	Unité	Périmètre El-Wifak				Périmètre les jeunes			
		Min	Max	Moy	Ec-ty	Min	Max	Moy	Ec-ty
Gp		1,62	4,13	2,69	1,06	1,89	3,02	2,21	0,54
Sg		14,25	31,23	25,08	6,71	11,99	39,56	26,18	11,27
Sm	%	2,42	9,01	6,04	2,35	4,92	10,27	8,07	2,33
Sf		56,53	75,24	63,72	7,56	47,62	80,55	62,57	13,59
Lim		1,02	6,49	2,48	2,27	0,52	1,56	1,00	0,53

Classes granulométriques (%) : Gp (gravier petit) ; Sg (sables grossiers), Sm (sables moyens), Sf (sables fins) ; Lim (limon).

A partir de la courbe granulométrique, nous avons extrait et calculé les coefficients suivant pour déterminer le type de la granulométrie :

- **d₁₀** : La taille effective des particules qui passent avec 10%.
- **d₆₀** : La taille effective des particules qui passent avec 60%.
- **d₃₀** : La taille effective des particules qui passent avec 30%.

Tableau n°14 : Type de la granulométrie du sable pour les deux périmètres

Elément	Périmètre El-Wifak				Périmètre les jeunes			
	Min	Max	Moy	granulométrie	Min	Max	Moy	granulométrie
C _U	2,76	7,50	5,17	variée	2,14	11,08	5,27	variée
C _c	0,60	1,70	0,78	mal graduée	0,46	1,69	0,81	mal graduée

D'après les résultats représentés dans le tableau n° 14 on observe que la majorité de classe de granulométrie est variée (C_U>2) et les courbes sont mal graduées car le coefficient de courbure majoritairement inférieur à 1 (C_c<1).

II.1.3.2. Analyse physicochimique

Ce type d'analyse est effectué sur l'extrait dilué 1/5 du sol prélevés au niveau des deux périmètres agricoles, nous avons présenté les résultats sous forme des tableaux qui regroupent tous les paramètres physiques et chimiques mesurés dans chaque sondage. L'analyse physico-chimique des sols constituent les paramètres physiques tels que : le pH ; le résidu sec ; la conductivité électrique (CE) l'humidité ; le taux de calcaire et les paramètres chimiques tels que : Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻.

II.1.3.2.1. Paramètres physiques

Le tableau n°15 ci-dessous présente les différents résultats pour les paramètres physiques mesurés des échantillons des sols prélevés au niveau des deux périmètres agricoles irrigués dans la région de Ouargla.

Les conductivités des sols de différents sondages varient entre **0,24** et **2,85 mS/cm**. Ces valeurs indiquent une minéralisation moyenne (Tableau n° 15). Des variations horizontales et verticales notables des conductivités dans les sols à cause de l'hétérogénéité lithologique.

Tableau n°15 : Résultats analytiques des paramètres physiques du sol des différents sondages

Elément	Unité	Périmètre El-Wifak				Périmètre les jeunes			
		Min	Max	Moy	Ec-ty	Min	Max	Moy	Ec-ty
CE à 25 °C	mS/cm	0,53	2,85	1,19	0,64	0,24	1,12	0,73	0,23
Salinité	g.l ⁻¹	0,34	1,76	0,71	0,34	0,16	0,72	0,47	0,14
Résidu sec	mg.l ⁻¹	0	4,60	1,79	1,61	0,20	5,40	2,09	1,82
PH		6,50	8,50	7,58	0,52	7,00	8,20	7,65	0,37
Humidité		3,75	20,54	11,85	6,39	0,91	13,03	2,76	3,70
Taux du Calcaire	%	0	6,90	3,03	2,54	0	6,30	2,26	2,14
Taux du Gypse		1,20	9,30	3,44	2,05	0,65	4,44	2,58	0,98

Les valeurs de pH, mesurées dans les solutions des sols, paraissent proches de la neutralité, avec des faibles écarts types de 0,37 à 0,52. Les sols de premier périmètre (El-Wifak) possèdent des pH variant entre 6,50 et 8,50 et variant entre 7 et 8,2 pour le deuxième périmètre.

La mesure du résidu sec, démontre que la solution du sol irrigué contient un résidu varie entre 0 et 5,4 mg/l, où la valeur maximale est enregistrée au périmètre les jeunes, cette valeur diminue dans le premier périmètre. Concernant l'humidité, sa mesure détermine que le contenu en eau dans le sol est varié de 0,91 jusqu'à 20,54 %. (Tableau n° 15)

L'analyse physique a révélé que le sol contient un taux de calcaire qui comprend entre 0 et 6,90 % pour la totalité des échantillons. La valeur maximale est observée au périmètre El-Wifak, avec une diminution légère, le deuxième périmètre enregistre un taux maximal de calcaire de 6,30%.

II.1.3.2.2. Electrolytes minéraux

Les résultats d'analyse chimique sur l'extrait aqueux 1/5 pour les sols des périmètres agricoles, présentés sous forme des tableaux qui regroupent deux paramètres chimiques.

a) Calcium (Ca²⁺) et magnésium (Mg²⁺)

Les sols irrigués présentent des teneurs élevées en calcium. Ces sols riches en calcium où la valeur maximale dépasse légèrement **170 mg.l⁻¹** au périmètre El-Wifak. Cette valeur augmente au sein des sols de périmètre les jeunes, pour atteindre une valeur maximale de **272,54 mg.l⁻¹**.

Tableau n°16 : Résultats d'analyses de Calcium (Ca²⁺) et magnésium (Mg²⁺) des sols au niveau des périmètres étudiés

Elément	Unité	Périmètre El-Wifak				Périmètre les jeunes			
		Min	Max	Moy	Ec-ty	Min	Max	Moy	Ec-ty
Ca ²⁺	mg/l	9,62	172,54	49,74	51,18	11,22	272,54	88,50	68,63
Mg ²⁺		3,89	145,83	28,92	37,55	4,86	97,22	31,52	23,09

Les valeurs du magnésium observées sont moyennes dans les sols analysés. Ces sols affichent des teneurs en magnésium avec une moyenne de **28,92 mg.l⁻¹** dans le périmètre El-Wifak et de **31,52 mg.l⁻¹** dans les sols de périmètre les jeunes (Tableau n° 16).

b) Sodium (Na⁺) et Potassium (K⁺)

Le sodium présent dans les sols analysés avec des teneurs élevées dans les sols irrigués, avec une valeur maximale de plus de **180 mg.l⁻¹** dans le périmètre El-Wifak. La concentration maximale de cet élément est moindre dans le deuxième périmètre par rapport au premier, sa valeur est de l'ordre **131,42 mg.l⁻¹**.

Tableau n°17 : Résultats d'analyses de Sodium (Na⁺) et Potassium (K⁺) des sols au niveau des périmètres étudiés

Elément	Unité	Périmètre El-Wifak				Périmètre les jeunes			
		Min	Max	Moy	Ec-ty	Min	Max	Moy	Ec-ty
Na ⁺	mg/l	85,93	182,98	116,71	18,14	74,95	131,42	110,73	14,42
K ⁺		1,41	19,92	4,30	3,94	2,53	23,88	8,78	6,92

Le potassium présent avec des concentrations dans les sols étudiées dévoilent des valeurs maximale élevées, et dépassent légèrement **23 mg.l⁻¹**. Les concentrations de potassium dans les tous les échantillons du sol irrigué, présentent une moyenne avoisine **6 mg.l⁻¹** (Tableau n° 17).

c) Chlorure (Cl⁻) et Sulfates (SO₄²⁻)

Le chlorure de même que pour le sodium, affichent des valeurs plus élevées dans les sols agricoles analysés, la valeur maximale est supérieur de **2,5 g.l⁻¹** enregistrée le périmètre El-Wifak. Cette valeur est diminuée pour atteindre un teneur de **681,60 mg/l** au deuxième périmètre. (Tableau n° 18)

Tableau n°18 : Résultats d'analyses de Chlorure (Cl^-) et Sulfates (SO_4^{2-}) des sols au niveau des périmètres étudiés

Elément	Unité	Périmètre El-Wifak				Périmètre les jeunes			
		Min	Max	Moy	Ec-ty	Min	Max	Moy	Ec-ty
Cl ⁻	mg/l	75,73	2514,35	369,37	524,24	113,60	681,60	246,51	129,03
SO ₄ ²⁻		37,00	159,00	61,82	27,63	51,00	265,00	105,65	53,45

La concentration moyenne des sulfates dans les sols des deux périmètres, dépassent **80 mg/l**. La concentration la plus élevée est observée au périmètre les jeunes, cette valeur au voisinage de **260 mg/l**.

d) Bicarbonates (HCO_3^-)

La concentration moyenne en bicarbonates observées est de 9,54 mg/l dans le périmètre El-Wifak (Tableau n° 19) et de 17,31 mg/l dans le périmètre des jeunes, le sol le plus bicarbonaté (26,62 mg/l) est, évidemment, celles du sondage SJ2 à la dernière profondeur (150 cm).

Tableau 19 Résultats de teneurs en bicarbonates (HCO_3^-) des sols au sein des périmètres étudiés

Elément	Unité	Périmètre El-Wifak				Périmètre les jeunes			
		Min	Max	Moy	Ec-ty	Min	Max	Moy	Ec-ty
HCO ₃ ⁻	mg/l	0,07	15,97	9,54	4,49	9,75	26,62	17,32	5,46

e) SAR et ESP

Le calcul du SAR, à partir des mouvements des ions détachés permet de prendre en considération de la présence des assemblages ioniques en solution ou, en d'autres termes, de la conséquence des anions sur l'alcalinisation des eaux. Les résultats de calcul montrent que les valeurs déterminées sont dans une fourchette de (0,28 à 3,12) méq/l. L'ESP un paramètre exprime le pourcentage de Na échangeable dans le sol, ce paramètre dans le sol étudié varie entre -0,86 à 3,23 % (Tableau n° 20).

Tableau n°20 : Résultats de calcul de SAR et ESP des sols au sein des périmètres étudiés

Elément	Unité	Périmètre El-Wifak				Périmètre les jeunes			
		Min	Max	Moy	Ec-ty	Min	Max	Moy	Ec-ty
SAR	méq/l	0,52	3,12	1,40	0,68	0,28	2,94	0,91	0,74
ESP	%	-0,49	3,23	0,79	0,98	-0,86	2,98	0,06	1,07

II.1.3.1. Conclusion

Les sols des périmètres étudiés, présentent des teneurs de calcium légèrement supérieur, le calcium dépasse largement la concentration de 200 mg/l dans des quelque échantillons et voir une moyenne aux alentours de 70 mg/l. La pluparts des concentrations moyennes de magnésium observées, sont proches à la valeur de 18 mg/l, sauf au dernier sondage dans le premier périmètre que nous observons une valeur très basse en cet élément. Cependant, toutes les valeurs dépassent 4 mg/l. Les chlorures dans les sols analysés dévoilent des concentrations élevés. La concentration moyenne est plus de 300 mg/l, avec 73% des échantillons dépassant 180 mg/l.

Le sodium, affiche des concentrations plus ou moins élevé et dépassent 100 mg.l-1 dans la pluparts des échantillons, sauf dans des quelques sol où cette valeur affiche des minimales valeurs. Les teneurs en potassium observées dans ces sols, avec des valeurs qui ne dépassent pas 30 mg/l. La mesure présente des valeurs du sulfate ne dépassent pas 70 mg/l. Dans les 60 % des échantillons. La concentration moyenne de cet élément est de 82,69 mg/l.

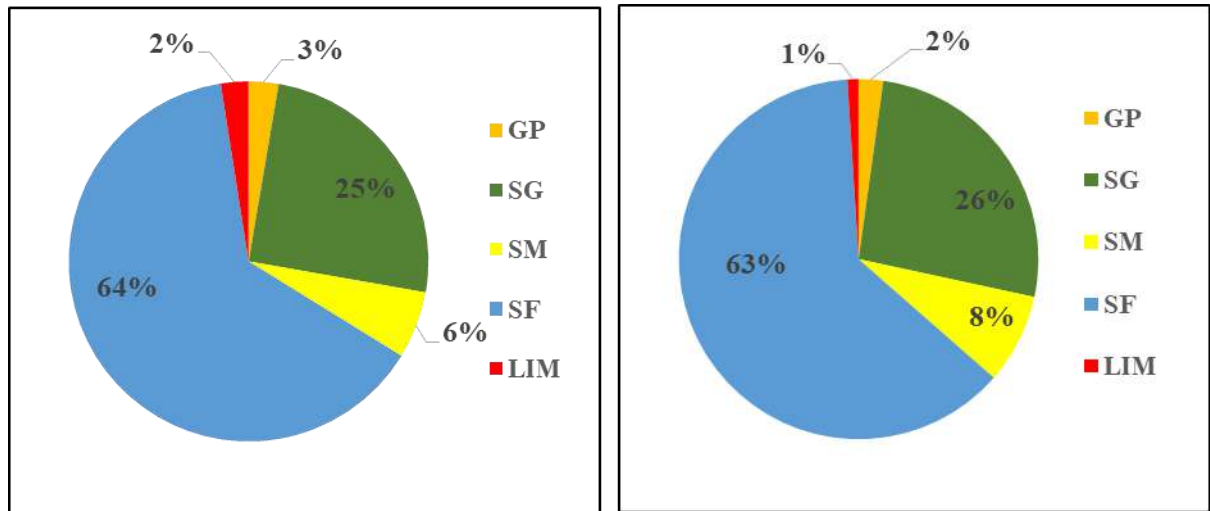
II.2. Interprétations et discussions des résultats

La salinité de l'eau d'arrosage et du sol de Ouargla, comme c'est le cas dans la plupart des régions du Bas-Sahara, ont fait partie des sujets de recherche importants sur lesquels existent un bon nombre de travaux antérieurs pour expliquer l'origine, les causes, l'impact sur l'agriculture et sur l'environnement et l'évolution de ce phénomène au cours de l'historique récente et tenter d'y remédier. Néanmoins, anticiper les caractéristiques géochimiques de la salinité des eaux constitue une approche novatrice susceptible d'apporter une contribution précieuse à la compréhension des répercussions de cette salinité sur les terres agricoles et l'écosystème de la région.

II.2.2. Caractéristiques granulométriques du sol

II.2.2.1. Classes Granulométriques

La granulométrie des sables des périmètres étudiés, a permis d'établir cinq catégories granulométriques distinctes, comprenant les limons ; des sables fins, des sables moyens, des sables grossiers et des petits graviers (Tableau n° 13 et Graphique n°11). Le limon est abondant. Il a la plus moindre proportion (1 à 2 %) par rapport aux autres classes.



Graphique n°11 : Répartition des différentes catégories granulométriques de sable dans les zones étudiées

Le petit gravier est peu abondant par rapport au limon. Il a une proportion comprise entre 2 et 3 % (Graphique n°11) ; à la première classe, le sable fin est le plus dominant car il présente avec un pourcentage le plus élevé, celui-ci varie entre 47,62 et 80,55%, sa valeur moyenne est de (63 à 64%). Le sable fin est situé à différentes profondeurs. En deuxième position, le sable grossier prédomine en tant que deuxième catégorie la plus abondante, tandis que la proportion de sable fin varie entre 11,99 % et 39,56 %. Le sable de taille moyenne est identifié comme la troisième catégorie prédominante par rapport aux autres. Sa proportion varie entre 2,42 % et 10,27 %.

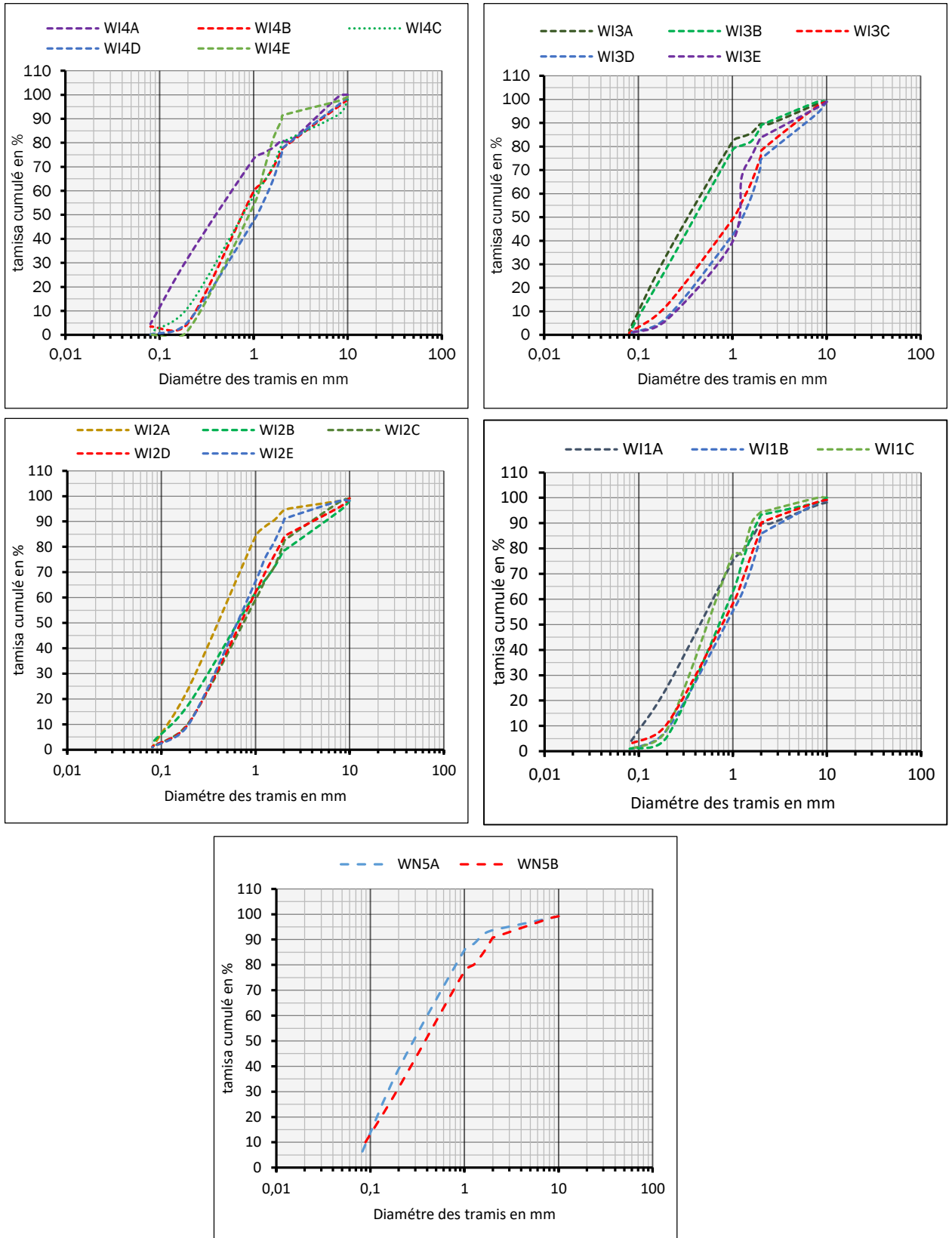
II.2.2.2. Faciès et analyse des courbes granulométriques

L'examen des courbes cumulatives semi-logarithmiques des sables analysés révèle un seul modèle de répartition, à savoir un faciès de forme parabolique (Graphique n°12 et Graphique n°13). Ce modèle parabolique suggère une dynamique sédimentaire et caractérise les divers types de sable présents dans les périmètres agricoles sous étude.

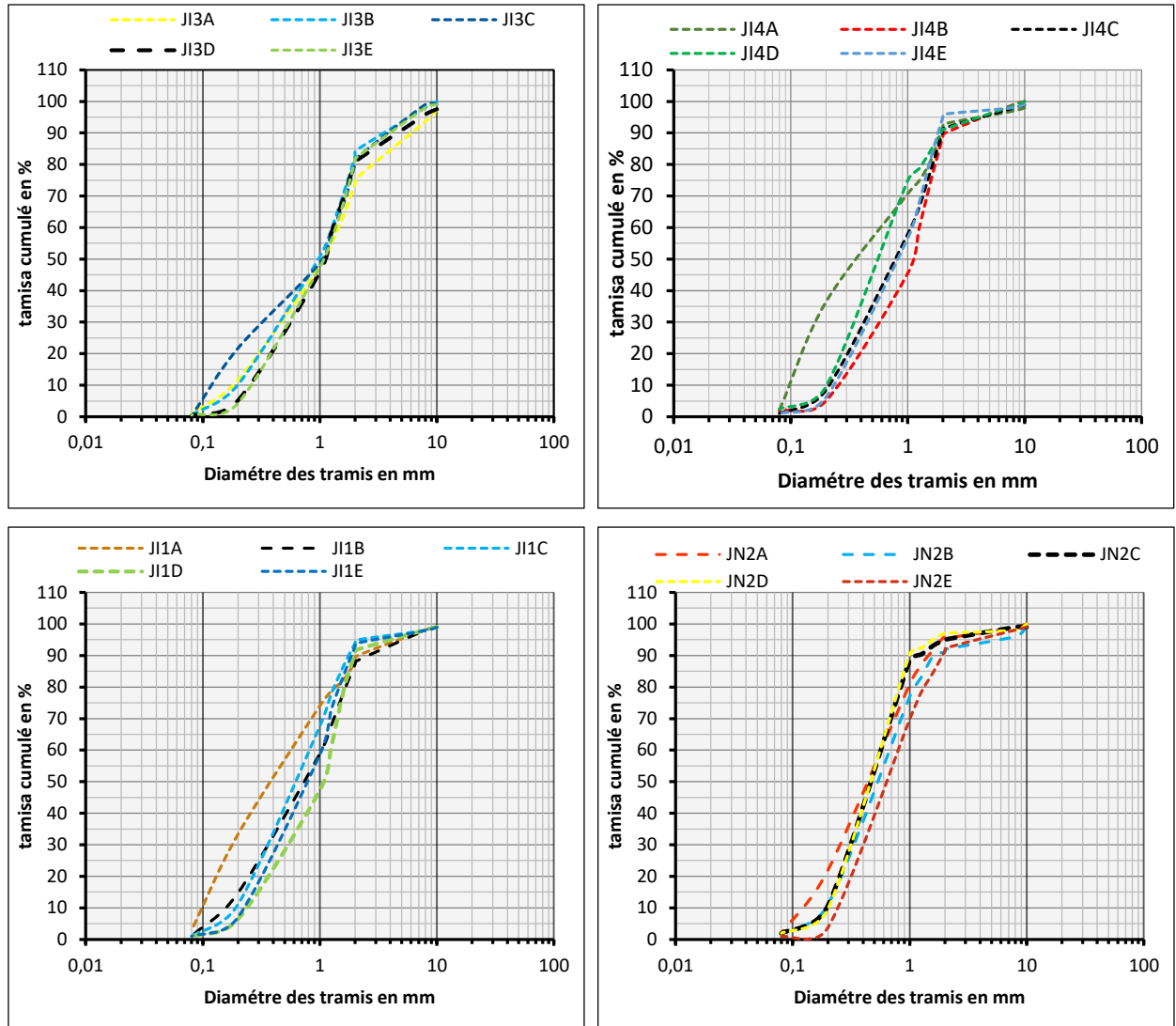
Les courbes granulométriques présentent Globalement, que la fraction la plus prédominante est celle-ci qui comprise entre 0,08 et 2 mm (la fraction sableuse). Ainsi, sur les deux périmètres, on observe la présence de petits graviers, de sables et de limons.

Sur les deux périmètres étudiés, plus de 60 % en moyenne, de l'échantillon est compris entre 0,08mm et 0,2 mm (sable fin) (Graphique n°12 et Graphique n°13). De plus, le coefficient de Hazen (Cu) est supérieur à 3 pour la majorité des échantillons, Dans ce cas, la granulométrie est considérée comme variée, aussi bien dans les courbes du sol en surface que dans celles de la profondeur. Suivant ces courbes granulométriques, le sable constitue majoritairement des grains fins.

Le coefficient de classement (Cc) étant très faible, cela indique qu'il manque certaines tailles de particules entre les diamètres effectifs d10 et d60. Malgré cette faible valeur de Cc, on observe une granulométrie mal graduée dans ce cas (Tableau n°14).



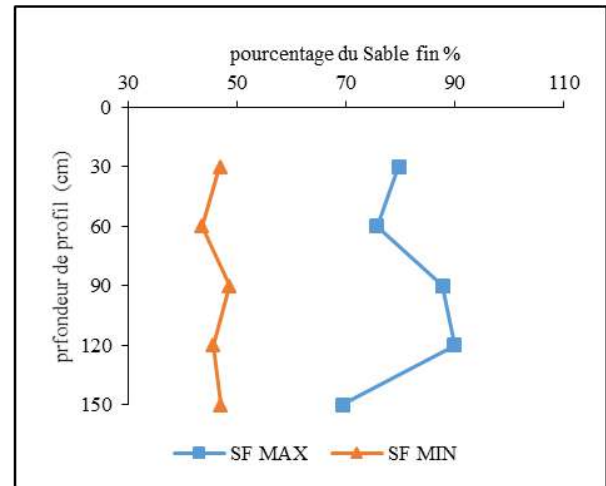
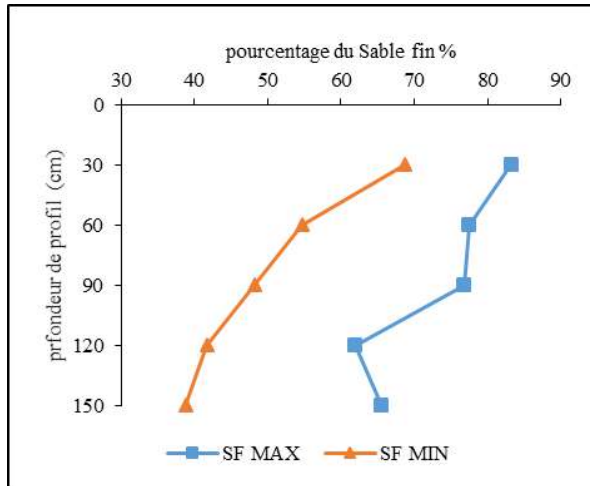
Graphique n°12 : Courbes granulométriques du périmètre El-Wifak



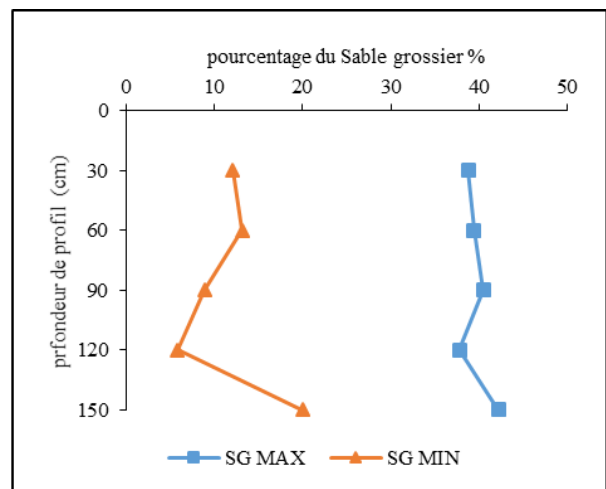
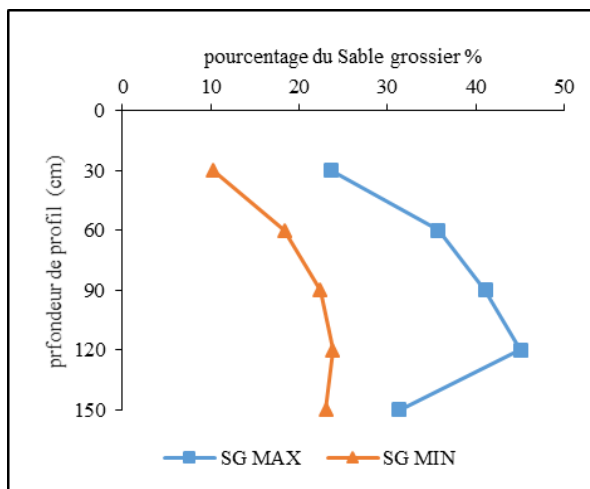
Graphique n°13 : Courbes granulométriques du périmètre les jeunes

II.2.2.3. Comportement sédimentaire du sable

À l'horizon (0-30 cm) du sol étudiés de premier périmètre, la partie qui constitue le sol agricole, c'est le sable fin qui domine avec un pourcentage varie entre 68,7% et 83,18 % des refus dans tous profils, la valeur maximale est enregistrée au profil n°2, où le sol est irrigué, par ailleurs le sol non irrigué enregistre un pourcentage de 80,47%. Pour la même quantité de sédiments en profondeur à l'horizon (120-150 cm), le sable fin représente un pourcentage moindre par rapport aux hauts horizons, celui-ci est compris entre 38,81 et 65,49 % (Graphique n°14). Au deuxième périmètre (à l'horizon 0-30) la fraction fine (sable fin) représente avec un pourcentage moyen plus de 66 %, sa valeur maximale (79,8%) est observée au profil n°2 dans le sol bore (non cultivé et non irrigué), ce pourcentage diminue quand on allant vers les horizons profonds.



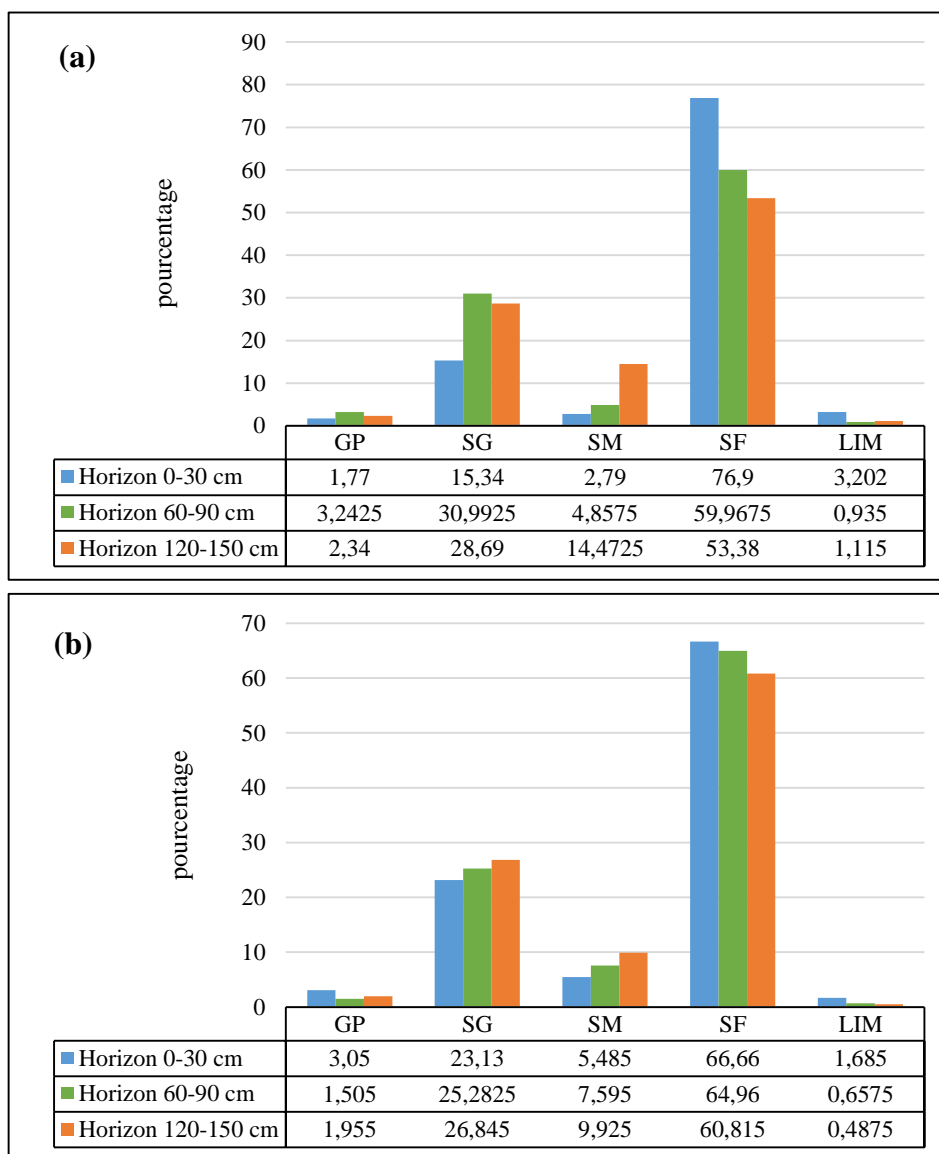
Graphique n°14 : Comportement sédimentaire du sable fin dans les périmètres étudiés



Graphique n°15 : Comportement sédimentaire du sable grossier dans les périmètres étudiés

Effectivement, à mesure que la taille des grains augmente, leur capacité à être transportés par l'énergie diminue. Cependant, en ce qui concerne la couche superficielle du sol, c'est l'énergie éolienne qui joue un rôle dans le déplacement des sédiments.

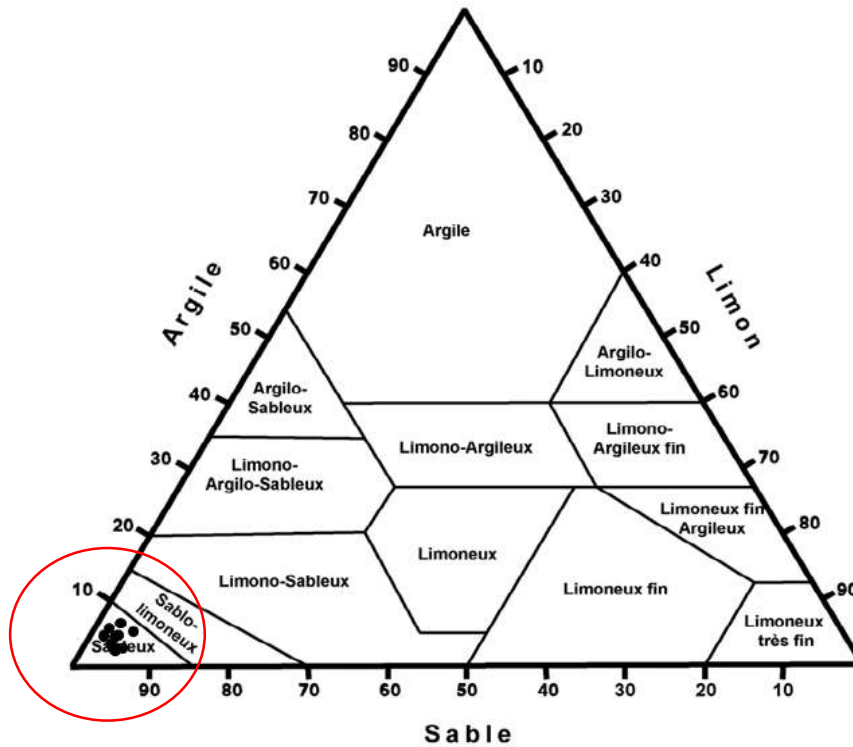
Dans les horizons profonds, la composition granulométrique du sable grossier, augmente presque le double par rapport aux horizons de la surface (Graphique n°15). Les sédiments prennent une taille plus importante à mesure que l'on s'enfonce en profondeur, avec un moyen pourcentage proche de 25 % de sable grossier. De plus, il est à noter que la présence de sable de taille moyenne et de limons est relativement faible tant en profondeur qu'en surface. (Graphique n°16).



Graphique 16 Catégorie sédimentaire du sable au niveau des périmètres étudiés pour trois niveaux de sondage (niveau de surface et médian et de profondeur) ; (a : périmètre El-Wifak ; b : périmètre des jeunes)

II.2.2.4. Texture du sol

La détermination de texture du sol des périmètres étudiés par la projection de pourcentage pour les différentes fractions compositrices au diagramme de texture, à conclure que le sol dans tous les profils, est caractérisé par une composition dominante sableuse (Graphique n°17). Ce type de texture favorise la remontée capillaire des sels solubles pendant la saison chaude (Servant 1975). Dans le cas où la texture est sableuse, la fraction d'argile est très faible donc le risque de sodicité n'existe pas (Van Hoorn et Van Alphen.1998).

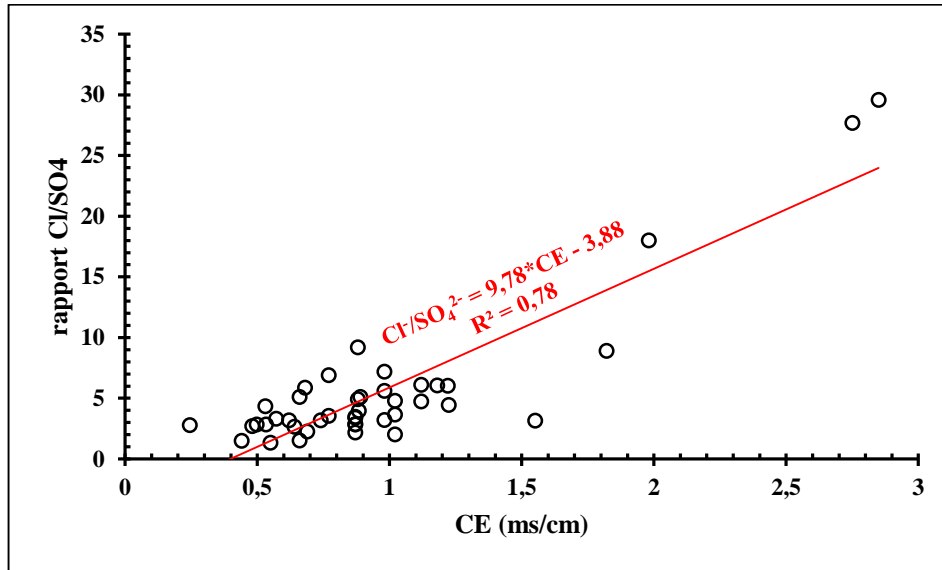


Graphique n°17 : Diagramme de texture des sols étudiés

II.2.2. Caractérisation de la salure des sols

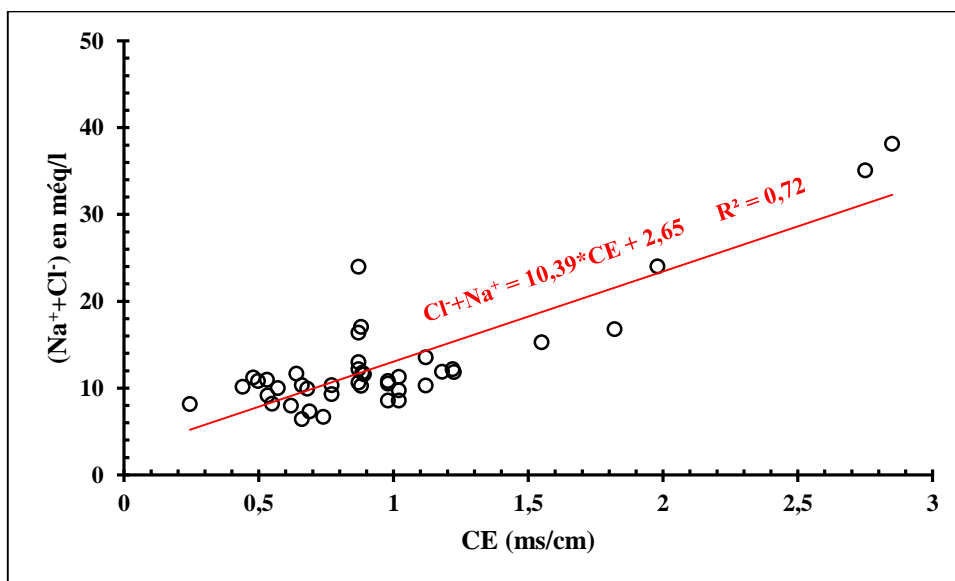
II.2.2.1. La conductivité électrique

La conductivité électrique mesurée sur l'extrait dilué 1/5 des sols au sein des périmètres étudiés, est modéré. D'ordre général, la conductivité mesurée est d'autant plus faible en profondeur qu'en surface sauf aux profils non irrigués où elle est variée au sens contraire. Ces variations de la CE en fonction de la profondeur peuvent s'expliquer par plusieurs intervenants, la CE est en corrélation avec l'augmentation du Sodium Adsorption Ratio (SAR) et de l'Exchangeable Sodium Percentage (ESP) (Omeiri 2016). Elle est également associée à une diminution des concentrations en Ca^{2+} et Mg^{2+} au profit de Na^+ ainsi qu'à une augmentation du rapport $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$. De plus, la conductivité électrique augmente avec la concentration ionique de la solution saline, laquelle est elle-même influencée par la teneur en eau dans le sol.



Graphique n°18 : Evolution de la CE des sols en fonction de rapport ionique Cl^-/SO_4^{2-}

L'examen des valeurs de CE en fonction du rapport ioniques Cl^-/SO_4^{2-} , à montrer une bonne corrélation ($R^2 = 0,78$) entre la CE et les ions du sulfate et du chlorures (Graphique n°18). A partir du graphique sous-dessus on peut remarquer aussi que le rapport Cl^-/SO_4^{2-} , apparait en croissance proportionnellement avec l'augmentation de la CE. On constate en effet que les chlorures sont dominants dans les horizons qui présentent les plus fortes valeurs de CE. Donc on peut dire que les sels de chlorures offrent la plus grande valeur de CE. On peut également conclure que l'augmentation du rapport Cl^-/SO_4^{2-} est plus marquée en surface, ce phénomène est probablement dû à la cristallisation du gypse, une substance peu soluble. Cette cristallisation conduit en effet à une élévation de ce rapport dans les solutions en bloquant l'ion sulfate à différents niveaux du sol.

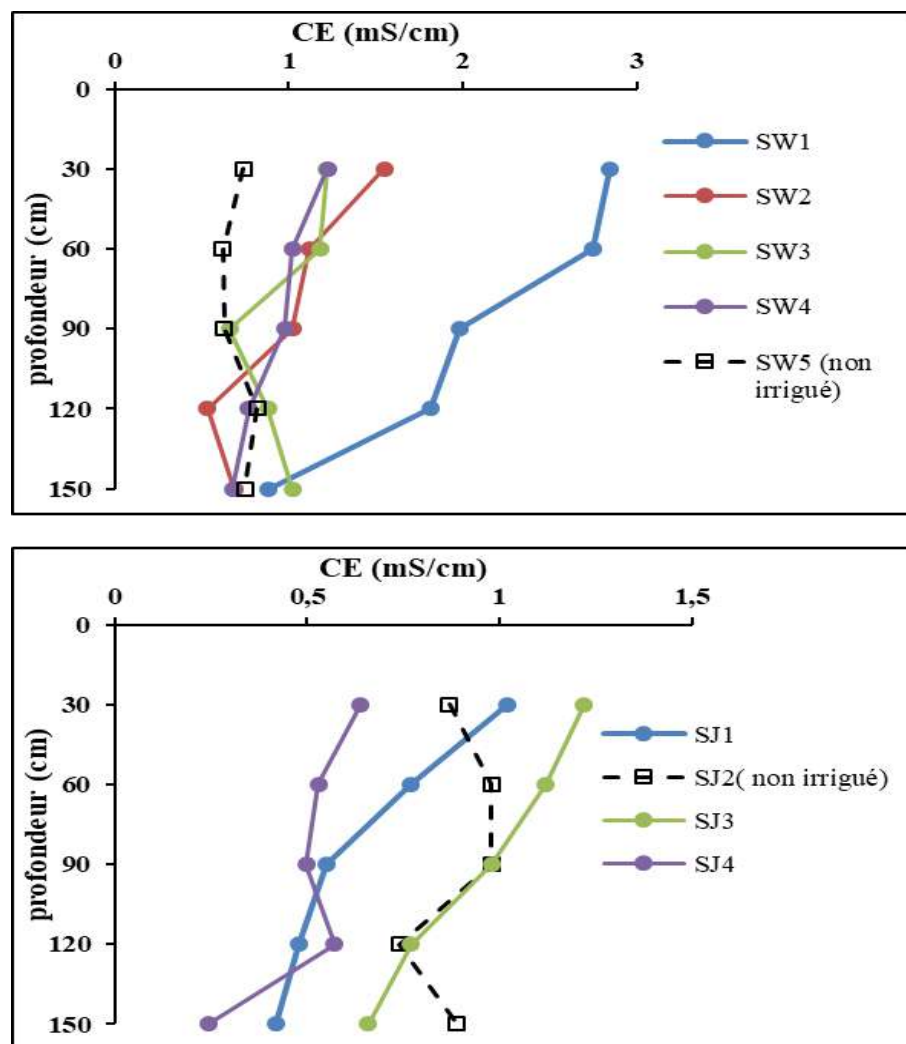


Graphique n°19 : Evolution de la CE de la somme (Cl^-+Na^+)

On remarque que le sodium prédomine par rapport aux autres cations, cependant, les cations alcalino-terreux, en particulier le calcium, sont également présents en quantité significative dans les sols.

La projection des valeurs de CE en fonction de la somme (Cl + Na) à montrer une bonne corrélation entre la CE et la somme de sodium et de chlorures (Graphique n°19) avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 0,72$). Donc on peut dire que les sels de sodium offrent la plus grande valeur de CE.

Les sels dans le sol sodique ont toujours une influence positive, au sens qu'il tend à réduire l'intensité des phénomènes de dilatation.



Graphique n°20 : Variation de la conductivité électrique (CE) des sols en fonction de la profondeur du sondage

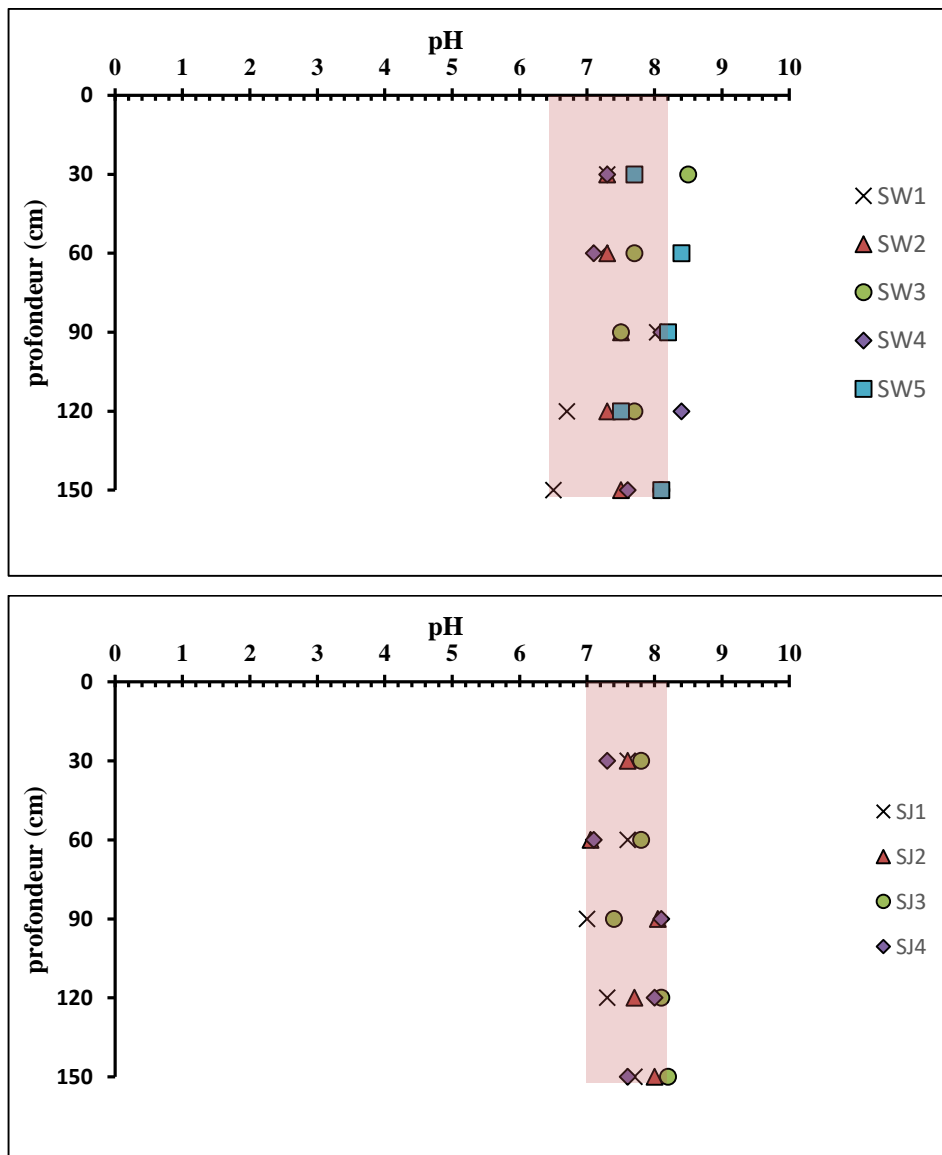
Dans les profils, on remarque qu'il y a d'un part un processus de transfert des sels entre l'eau d'arrosage et le sol et de ce fait source majeure de sels solubles dans le sol, et d'autre part

Il y a une accumulation de ces sels au niveau de la couche superficielle est favorisé sous par l'évaporation (Graphique n°20).

II.2.2.2. Le pH

Concernant le pH, dans la majorité des mesures, sont compris entre 6,5 et 8,2, 98% des échantillons sont inférieur à 8,2, donc ils sont légèrement alcalins (Graphique n° 21). Cela peut être dû à la faible quantité en fractions fines et aussi à cause de l'apparition de sels alcalins (DEKKICHE 1974).

Quand on observe les variations des valeurs du pH on a remarqué que des valeurs élevées de conductivité électrique (CE) sont associées à des valeurs faibles de pH (Graphique n°21). En réalité, des teneurs élevées en chlorures ont tendance à abaisser le pH (DEKKICHE 1974).



Graphique n°21 : Evolution du pH des sols en relation avec la profondeur

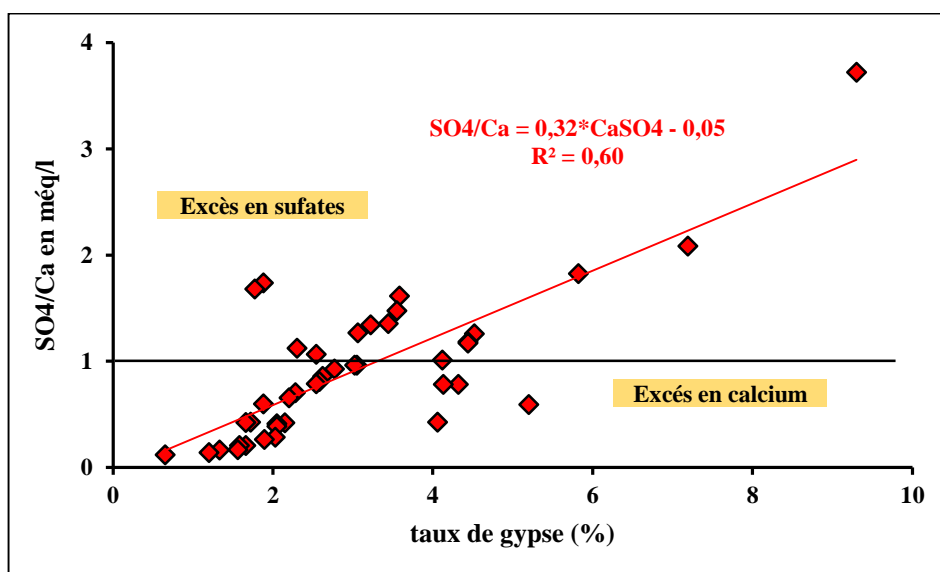
Effectivement, le pH a une grande importance et joue un rôle crucial en agronomie, particulièrement en ce qui concerne la fertilisation azotée. Par conséquent, une élévation du pH de 7 à 8 entraîne des pertes allant de 10 à 70 % de la quantité d'engrais azotés apportée (HALILAT 1993).

Les valeurs du pH doivent être autour de la neutralité, cette dernière est un paramètre très important par ce que, la majorité des plantes atteignent leur développement optimal lorsque le pH du sol se situe proches de la neutralité (Pousset 2002).

II.2.2.3. Gypse et calcaire

La dynamique du gypse dans les sites d'étude, se manifeste par le phénomène de la précipitation des eaux d'irrigation riches en sulfate et en calcium. Le processus de cristallisation du gypse à partir d'une eau saturée en ces deux éléments, est facilité par un réseau cristallin préexistant. Quand le gypse est présent avec une quantité significative a un impact non seulement chimique, mais aussi physique, notamment en ce qui concerne la stabilité de la structure (Halitim 1988). Globalement, Le gypse enregistre des teneurs faibles, la valeur maximale du gypse est observée dans les hauts horizons où un dépôt remarquable en cristaux fins. La teneur en gypse atteint son pic (9,30 %) (Graphique n°22) et a été observée dans le sondage SW4 à la première couche superficielle. Cette proportion décroît à mesure que l'on descend en profondeur, suggérant ainsi une remontée des sels de gypse vers la surface du sol.

La présence de calcaire est limitée dans tous les sols examinés, ce qui est attribuable à la faible teneur en carbonates de ces sols ainsi qu'à l'effet du CO₂. En effet, le gaz carbonique, bien que légèrement acide, dissout une partie du CaCO₃ (BARTHELEMY 1984).



Graphique n°22 : Evolution du taux de gypse des sols en fonction du rapport (SO_4^{2-}/Ca^{2+})

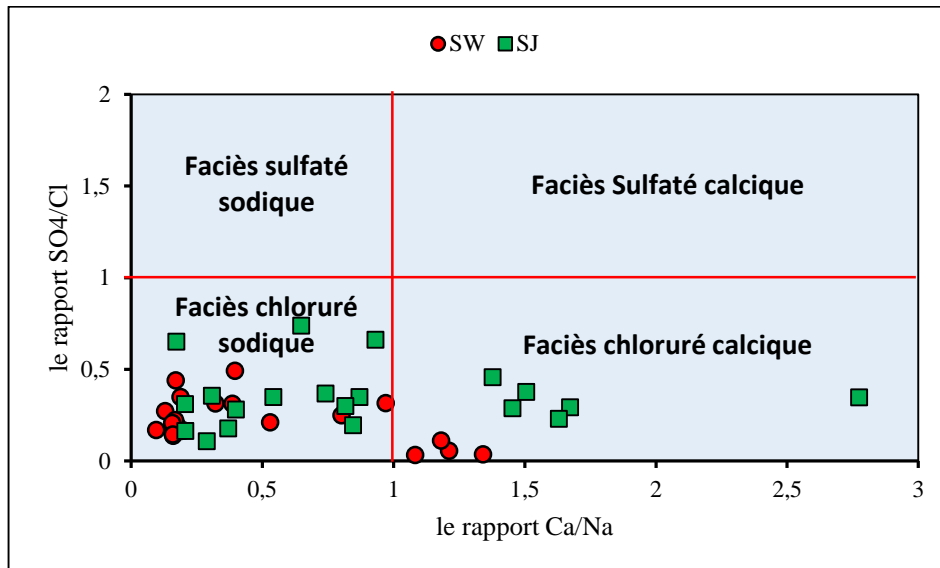
II.2.2.4. Faciès géochimique du sol

a) Les anions

Les analyses chimiques révèlent que le sol examiné est particulièrement riche en sels, surtout dans les couches superficielles. Les teneurs en sulfates et en chlorures sont considérablement élevés à la surface du sol, alors que les faibles teneurs observés sont ceux de bicarbonates. Le rapport ionique Cl/SO₄ a tendance à augmenter en passant des horizons profonds aux horizons de surface. Cette augmentation est définie comme un mécanisme naturel et réel de la salinité (Servant 1975), en particulier dans les milieux où le calcium est présent. L'hypothèse qui explique cette augmentation en chlorures, dite que ceux ont une mobilité plus grande qu'aux sulfates (Krupkin 1963) (Massoumi 1968) (Jaber 1970). On peut aussi expliquer cette augmentation du rapport Cl/SO₄ aux horizons de surface par le phénomène de la cristallisation du gypse qui est peu soluble, ce phénomène conduit effectivement à une augmentation de ce rapport dans les solutions, par blocage de l'ion sulfate à diverses profondeurs du sol (Omeiri 2016).

a) Les cations

Concernant la distribution des cations dans la solution du sol, le sodium est élevé et enregistre la plus grande quantité par rapport aux autres cations au niveau des horizons. L'augmentation verticale du sodium est faite régulièrement vers la surface où elle atteint sa valeur maximale, dans le deuxième horizon on remarque une diminution légère de cet élément qui décroît jusqu'à atteint sa valeur minimale en profondeur. L'ion de calcium est distribué dans tous les horizons du profil, mais sa quantité la plus grande, est observée à la surface. On a constaté que le calcium conserve sa mobilité et remonte capillairement à la surface, par conséquent les ions bicarbonates ne peuvent pas le bloqué, cela s'explique par le fait que ces derniers sont présents en très faibles quantités. Le magnésium est toujours en quantité faible par rapport aux autres cations (sodium et calcium), il suit cependant, le même phénomène de remontée. En générale le rapport ionique Ca/Mg diminue à la surface, traduit la contribution d'une partie du calcium avec les sulfates afin de former le gypse, alors que le magnésium s'accumule dans le sol sous forme de sels de chlorures. L'ion potassium est peu existé dans tous les profils. Ces données analytiques indiquent donc que Le profil chimique de la solution du sol tend généralement à être de nature chlorurée sodique.



Graphique n°23 : Caractéristiques géochimiques du sol analysé basées sur les rapports Ca^{2+}/Na^{+} et SO_4^{2-}/Cl^{-}

Les résultats analytiques physico-chimiques sur l'extrait 1/5 du sol, montre que le chlorure est l'élément le plus dominant, le deuxième dominant est le sulfate puis les bicarbonates qui ont les plus faibles teneurs dans les anions. En ce qui concerne les cations, les résultats indiquent que le sodium a la plus forte quantité, suit par le calcium puis le magnésium et enfin le potassium.

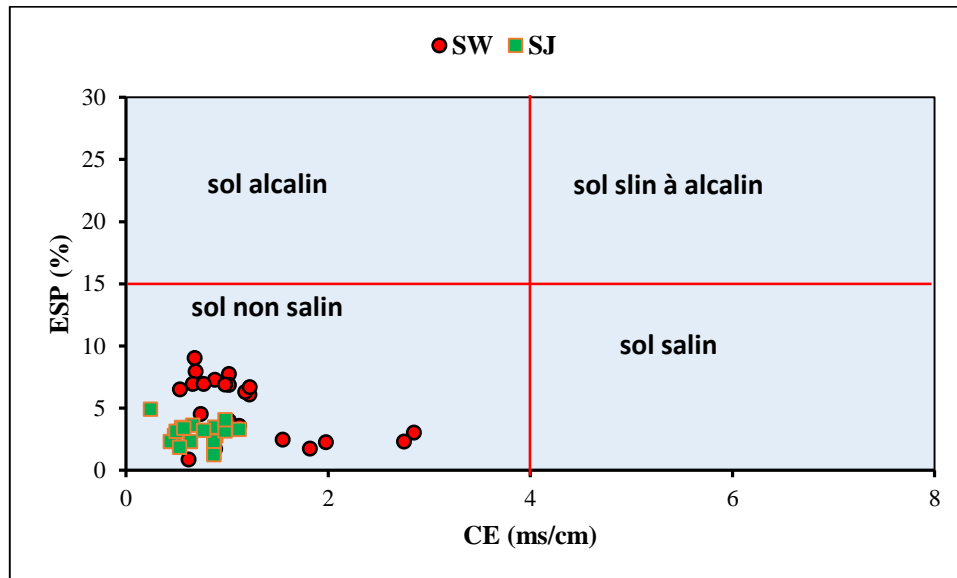
L'ordre de dominance est classé respectivement comme suit : $Cl^{-} > SO_4^{2-} > HCO_3^{-}$ et $Na^{+} > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^{+}$.

Les faciès dominants sont répartis comme suit :

- Au périmètre El-Wifak : La prédominance du faciès géochimique dans le sol est de type chloruré sodique (81,81% des échantillons) et le deuxième faciès dominant chloruré calcique (18,19% des échantillons). (Graphique n°23.)
- Au périmètre des Jeunes : La caractéristique chimique prédominante du sol est le faciès chloruré sodique (70% des échantillons) et le deuxième faciès dominant chloruré calcique (30% des échantillons). (Graphique n°23.)

II.2.2.5. Classification des sols salés

Afin d'illustrer efficacement la classification des sols étudiés et d'identifier les catégories les plus dominantes dans les périmètres de recherche, nous avons utilisé la conductivité électrique de la solution 1/5 du sol sur l'axe des ordonnées et le pourcentage du sodium échangeable (ESP) sur l'axe des abscisses.

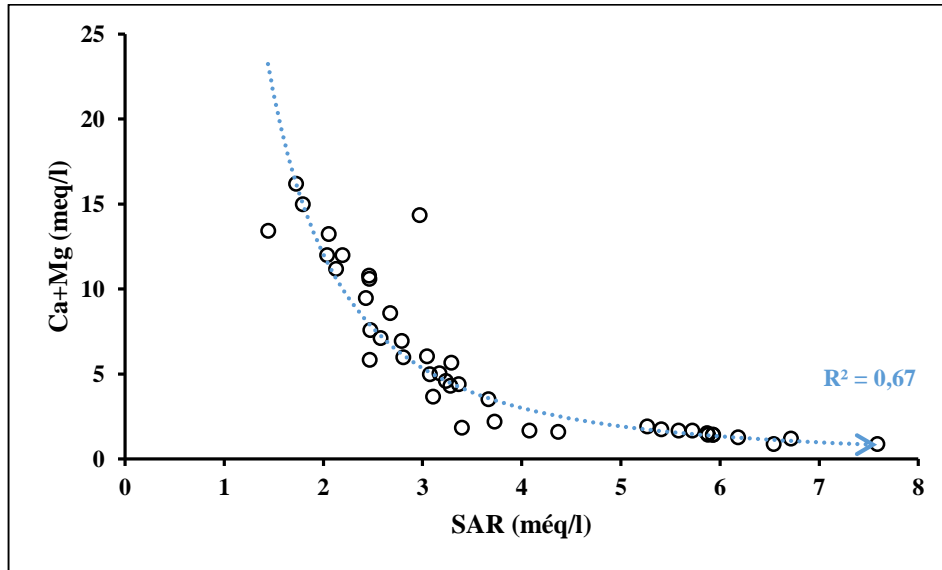


Graphique n°24 : Classification des sols salés au niveau des périmètres selon la CE et ESP

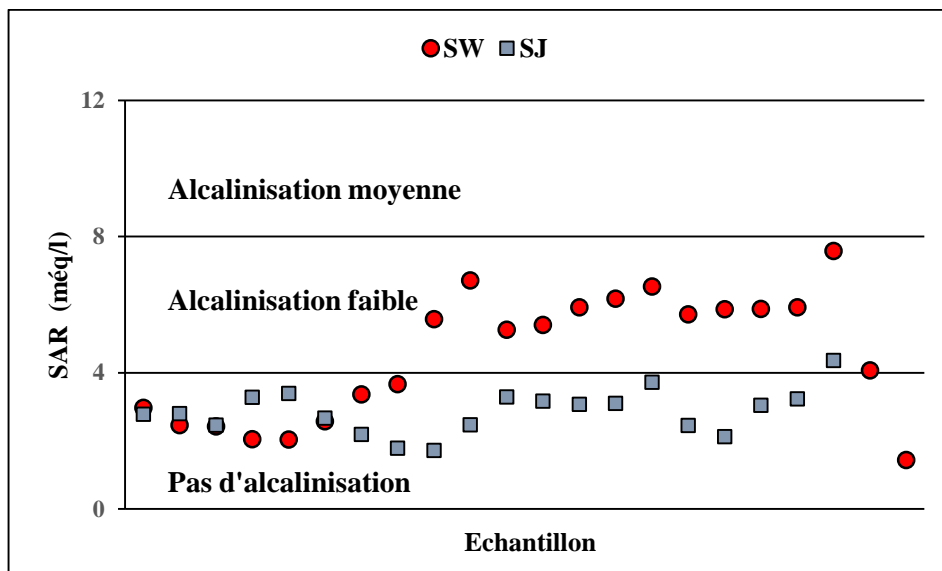
La projection de l'ESP en fonction de la conductivité (Graphique n°24.), indique que la totalité des échantillons se trouvent dans la catégorie des sols non salins ($CE < 4$ mS/cm et $ESP < 15\%$).

En générale, on peut dire que le sol n'est pas affecté par la salinité, car peut être le auto-lessivage par les eaux d'irrigation est efficace, et aussi la salinité n'apparaisse pas dans les sols bien drainés, car le niveau de la nappe phréatique est plus loin (plus de 30 m) à la surface du sol, Mais nous signalons, qu'il y a des endroits dans les périmètres où la valeur de CE est élevée, le sol devient salin à long terme, donc il doit être pris en considération les préoccupations et les interventions nécessaire pour lutter contre cette salinité. L'effet de sodicité sur le structure du sol est faible, car la capacité d'échange n'est pas suffisamment grande.

La projection des valeurs du SAR par rapport à la somme de Ca et Mg, indique que le teneur en sodium est inférieur au celle de la somme des teneurs en calcium et en magnésium. Donc le rôle de calcium et de magnésium à l'abaissement du SAR, est plus fort que le sodium à l'agrandir (Graphique n°25).



Graphique n°25 : Abaissement du SAR en fonction de la somme de Ca^{2+} et Mg^{2+} .



Graphique n°26 : Degré d'alcalinisation de du sol pour les deux périmètres étudiés

Pour voir le degré d'alcalinisation du sol étudié, nous avons faire la projection des valeurs du SAR sur la graphique n°26. Ce dernier a montré que 59 % des échantillons prélevés dans le périmètre El-Wifak, se situent à la zone où nous remarquons une alcalinité légère. Le reste (41%) se situe dans la zone où il n'a pas du risque d'alcalinité. Au sein de périmètre des jeunes nous remarquons que la totalité des échantillons n'indiquent aucun risque d'alcalinisation.

II.2.2.6. Conclusion

Cinq classes granulométriques sont déterminées à l'aide de l'analyse granulométrique. Il s'agit des limons ; des sables fins, des sables moyens, des sables grossiers et des petits graviers. Les courbes granulométriques du sol ont un faciès parabolique qui implique une dynamique

sédimentaire. Le coefficient d'uniformité de Hazen à montrer que la granulométrie est dite variée. Par ailleurs, le coefficient de classement présente une granulométrie mal graduée ce qui indique une absence de certains diamètres. La prédominance de la fraction sableuse, cette texture favorise la remontée capillaire des sels solubles pendant la saison chaude.

En générale, la conductivité électrique de l'extrait du sol est modérée et d'autant plus petit en profondeur qu'en surface sauf aux profils non irrigués où elle est variée au sens contraire, ce qui apparaît l'impact de l'irrigation à l'évolution de la salinisation de type secondaire du sol. Ce dernier en majorité est légèrement alcalins à cause peut être à la faible quantité des particules fines et la présence des sels alcalins.

Le taux du gypse, se manifeste par le phénomène de la précipitation des sels qui existent dans les eaux d'arrosage riches en sulfate et en calcium. La présence substantielle de gypse peut influencer la stabilisation de la structure. Globalement, Le gypse enregistre à des teneurs faibles, la valeur maximale du gypse est observée dans les horizons de surface ce qui traduit une où une accumulation ascendante se réalise sous forme de cristaux fins. La proportion de calcaire est réduite dans l'ensemble des sols analysés. Cela est attribuable à la faible teneur en carbonates de ces sols, ainsi qu'à l'effet du dioxyde de carbone (CO₂). Le sol étudié riche en sels particulièrement dans la couche superficielle. Les teneurs en chlorures et en sulfates sont élevées à la surface du sol, alors que les faibles teneurs observés sont ceux de bicarbonates. Une augmentation remarquable du rapport ionique Cl/SO₄ de profondeur vers la surface. Cette augmentation est un processus naturel de la salinité, en particulier dans les milieux riches en calcium. Les chlorures augmentent, car ils ont une grande mobilité par rapport aux sulfates. Le sodium est élevé et enregistre la plus grande quantité par rapport aux autres cations au niveau des horizons. Les données analytiques indiquent donc que le profil chimique de la solution du sol est de nature chlorurée sodique.

II.2.3. Etude de la minéralisation des eaux d'irrigation

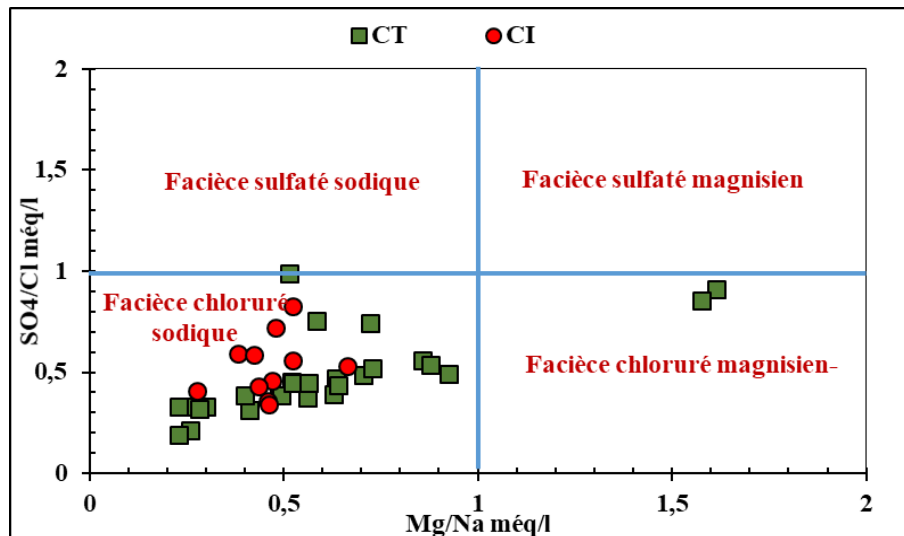
Dans l'étude qualitative des eaux au sein des aquifères, il est nécessaire de connaître les processus géochimiques qui contrôlent les origines naturelle de la minéralisation de ces eaux, et ceux qui ont le pouvoir de dégrader leur qualité chimique. L'interaction des minéraux entre les roches et l'eau, les apports atmosphériques tels que les poussières ; le gaz transporté par les précipitations, sont les naturelles sources des minéraux dans les eaux souterraines. La modification de la qualité de ces eaux peut être apportée par des mélanges par d'autres eaux souterraines ou par des eaux de surface différente, ceci est fait par le phénomène de

concentration des éléments solubles par l'évaporation, aussi par la consommation des certains éléments par les microorganismes (HALASSA 2021).

Cette partie est consacrée pour déterminer les divers mécanismes géochimiques susceptibles de se produire au sein des aquifères étudiés. Probablement, on peut évaluer l'origine des éléments chimiques à l'aide des corrélations entre eux. Afin d'atteindre cet objectif, nous utiliserons toutes les données disponibles dans cette partie. Les éléments chimiques utilisés doivent être dérivant d'une même origine.

II.2.3.1. Diagramme ($Mg^{2+}/Na^+ : SO_4^{2-}/Cl^-$)

La représentation des points sur le diagramme ($Mg^{2+}/Na^+ : SO_4^{2-}/Cl^-$) offre une perspective globale sur la répartition spatiale des caractéristiques géochimiques au sein des nappes étudiées dans la région d'étude (Graphique n°27).



Graphique n° 27 : Faciès géochimiques de l'eau Mio-pliocène et Albienne par les rapports Mg^{2+}/Na^+ et SO_4^{2-}/Cl^-

Les résultats des différentes analyses physico-chimiques sur les eaux souterraines d'irrigation de la région de Ouargla sont mentionnés dans le Tableau n°7. montre une concentration très élevée des chlorures suivi les sulfates qui ont des teneurs assez proches. Concernant les concentrations des cations on constate que le sodium est présent en grande quantité. Pour les anions et les cations, on peut retenir l'ordre d'abondance suivant : $SO_4^{2-} > Cl^- > HCO_3^-$ et $Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+$. Le faciès chimique prédominant dans l'eau Mio-pliocène est le chlorurée sodique, représentant 81,48% des échantillons, suivi en moindre proportion par un faciès secondaire chlorurée magnésienne, qui constitue 18,52% des échantillons, avec l'absence des faciès sulfatée magnésienne et sulfatée sodique. Pour l'eau d'irrigation albienne (CI) le faciès dominants est le chlorurée sodique, il regroupe la majorité des échantillons.

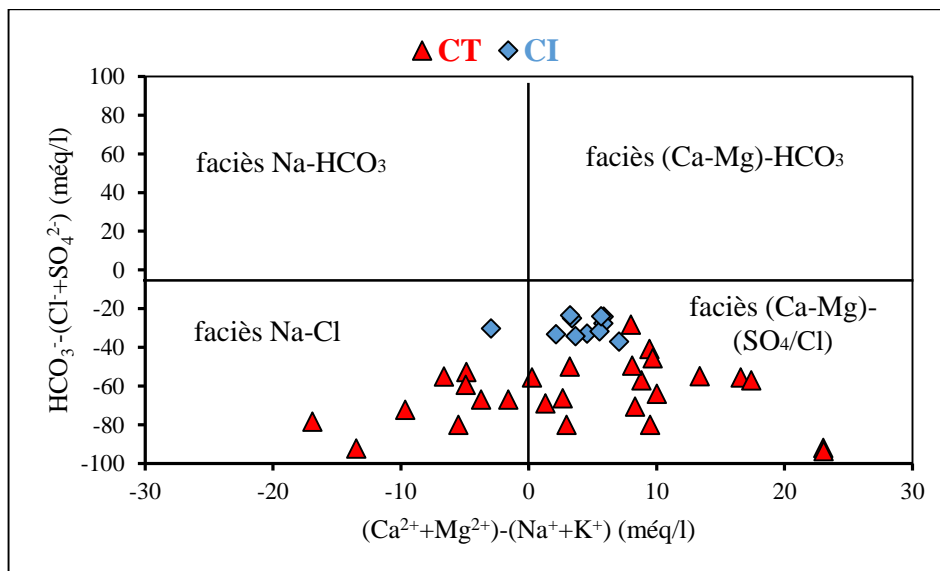
II.2.3.2. Diagramme de Chadha

Dans l'objectif de comprendre les processus hydrochimiques régissant la minéralisation au sein d'un système aquifère multicouche et de classer les données analytiques d'eau souterraine en diverse types d'eau, nous recourra au diagramme Chadha, (Chadha 1999).

Le diagramme Chadha (Graphique n°28) est essentiellement une version peu modifiée de la combinaison des diagrammes de Piper et du diagramme de Durov, avec une extension (Durov 1948). La projection des résultats pour les deux aquifères étudiés montre que :

Les eaux Miopliocènes se trouvent, en deux de faciès chimiques, le premier est caractérisé par une richesse en alcalino-terreux (Ca+Mg) avec un pourcentage de plus de 66%, Ce faciès indique une composition d'eau de type Ca-Mg-SO₄/Ca-Mg-Cl, dans cette catégorie les anions forts (Cl et SO₄) prédominent sur les anions faibles (HCO₃ et CO₃). De plus, les cations alcalino-terreux (Ca et Mg) l'emportent sur les alcalins (Na et K).

Le second faciès caractérisé par la dominance des minéraux alcalins (Na + K) avec un pourcentage de plus de 33%, dans ce domaine les échantillons se caractérisent par un type d'eau à dominance de sodium (Na) et de chlorure (Cl). Les eaux albiennes majoritairement se trouvent, avec un pourcentage de 99%, dans le faciès de type Ca-Mg-SO₄/Ca-Mg-Cl.



Graphique n°28 : Diagramme Chadha pour les faciès chimiques des eaux des aquifères étudiés dans la région de Ouargla

La dissolution des halites est apparait fortement dans l'eau de type Na-Cl. Alors que la coexistence de la dissolution des halites et du gypse, est indiquée dans celle de type Cl>SO₄>Ca>Na. En effet, la concentration de sodium (Na⁺) est diminué à cause de cet échange

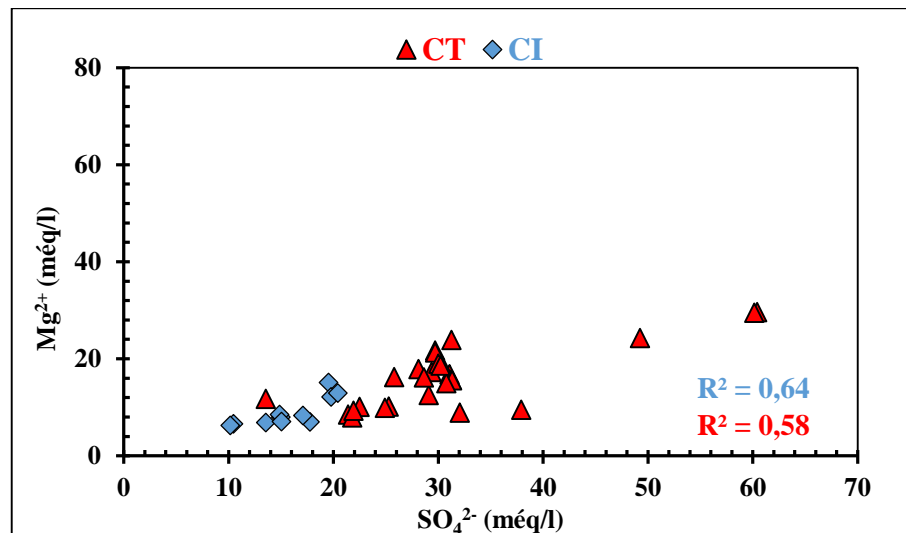
cationique, par contre celle du calcium (Ca^{2+}) est augmenté, ce qui entraîne une augmentation de la saturation des eaux en Ca^{2+} , contribuant à la diminution de la dissolution du gypse.

Ce processus a maintenu la teneur en chlorure toujours supérieur à celle du sulfate, un élément conservateur. En outre, la consommation de sodium tout au long de l'échange cationique a rendu les eaux souterraines plus sous-saturées en halite, ce qui a entraîné une plus grande dissolution (Hamed, Dassi et al. 2011)

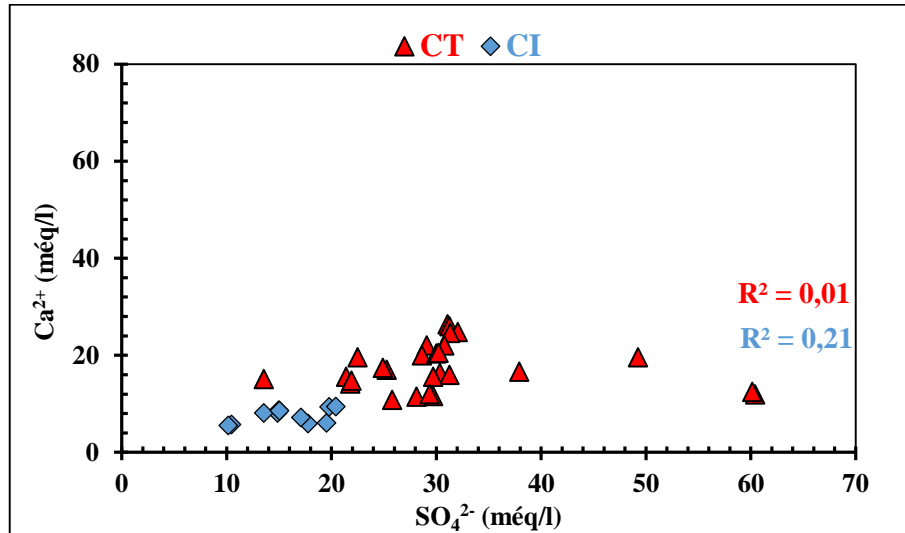
II.2.3.3. Corrélations entre les éléments majeurs

a) Ions majeurs Vis-à-vis aux sulfates et bicarbonates

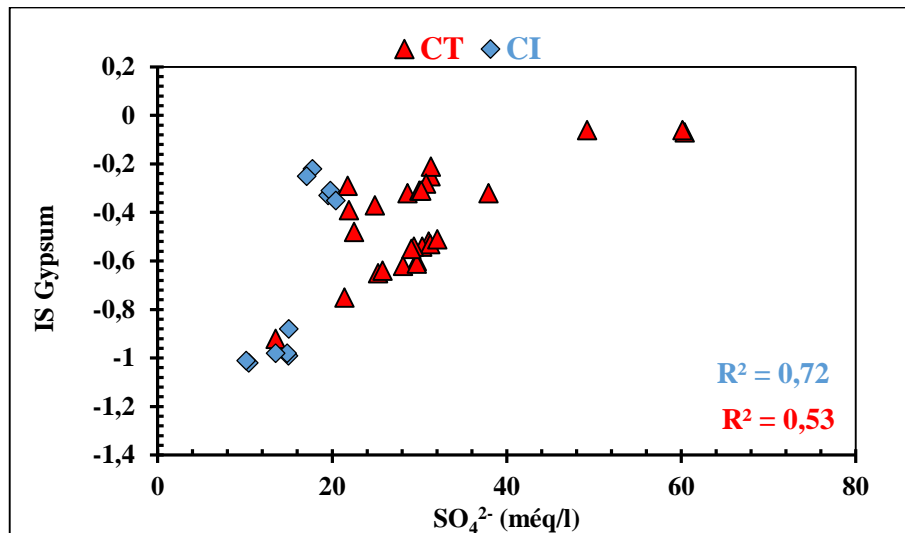
Les sulfates est élément le plus propagé dans les naturelles eaux, il existe sous forme oxydé et incorporé dans quelque dépôts évaporitiques comme le gypse, ou dans des minérales espèces comme le Barytine et l'anhydrite. L'ion de SO_4^{2-} , prédomine dans les eaux souterraines (milieu réducteur) est intimement liée aux propriétés redox du milieu (Blum A. 2002). Dans nos résultats, les eaux des aquifères du CT et CI, l'ion de SO_4^{2-} est le plus abondant dans les proportions des faciès chimiques. La principale source de l'ion sulfate est les formations évaporitiques. Les eaux maintiennent les sulfates au cours de leurs trajets dans ces formations par le processus de la dissolution de l'anhydrite ou de gypse.



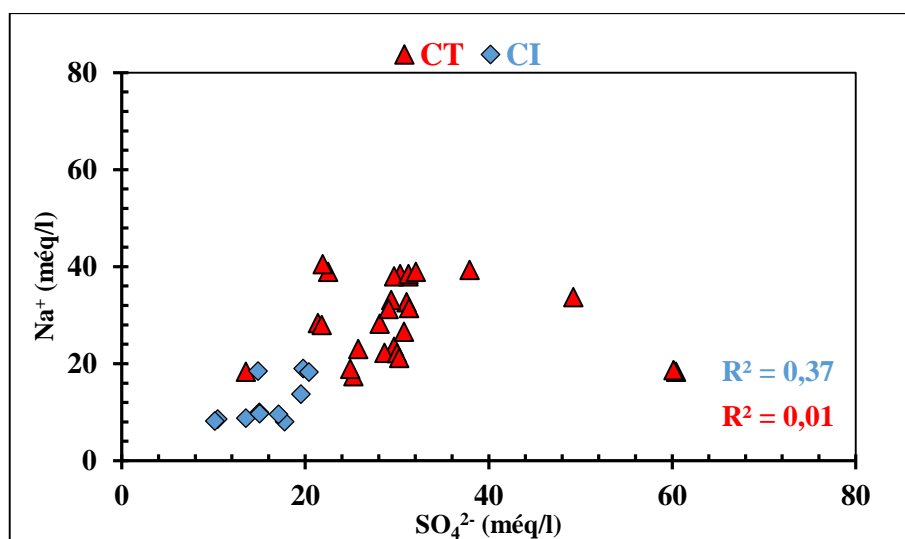
Graphique n°29 : Corrélation de concentration SO_4^{2-} vis-à-vis de Mg^{2+}



Graphique n°30 : Corrélation de concentration SO_4^{2-} vis-à-vis de Ca^{2+}

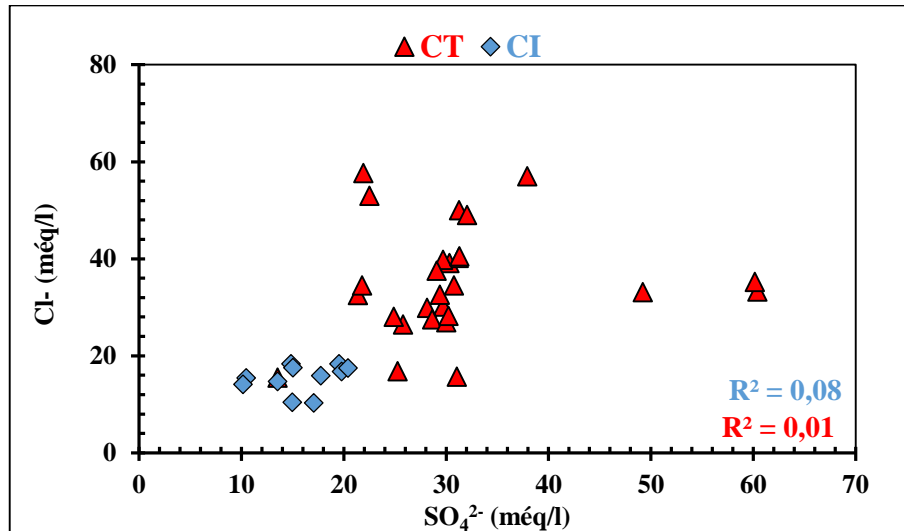


Graphique n°31 : Corrélation de concentration SO_4^{2-} vis-à-vis de IS de gypse

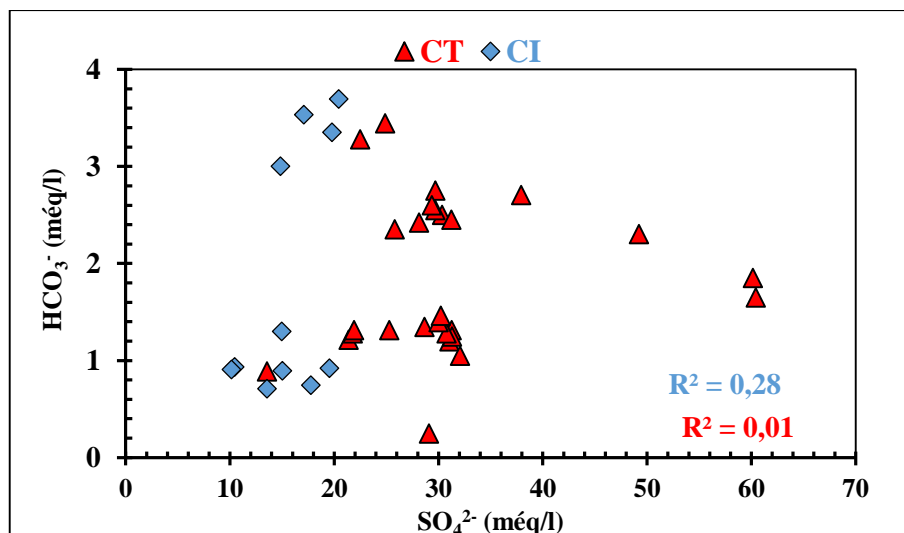


Graphique n°32 : Corrélation de concentration SO_4^{2-} vis-à-vis du Na^+

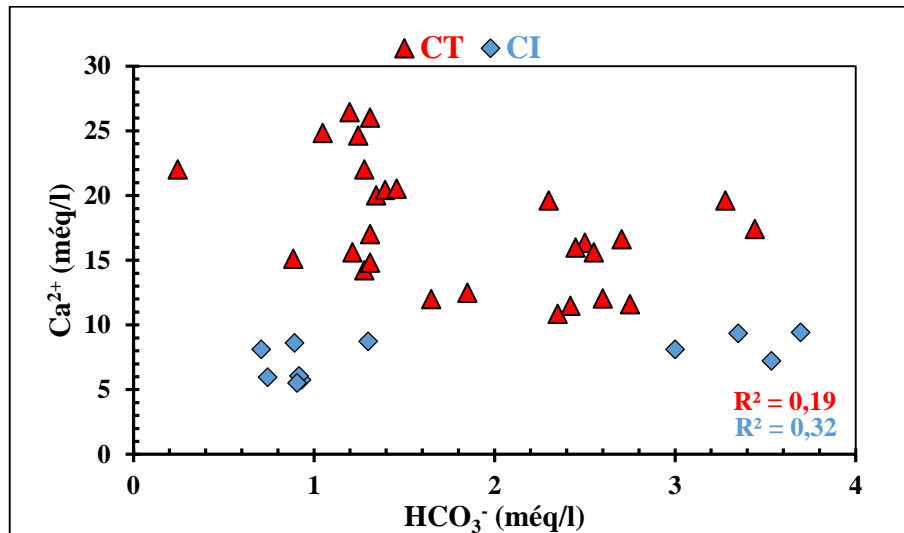
L'étude de la corrélation des teneurs en sulfates en fonction des autres teneurs en éléments chimiques tels que (Ca^{2+} ; Mg^{2+} ; Na^+ et IS de gypse), indique un coefficient de corrélation varie entre (0,19 et 0,72), le grand coefficient est enregistré entre les sulfate et le IS de gypse, par contre l'élément qui enregistre la moindre relation ($R^2=0,19$) avec les sulfates dans la nappe Miopliocène, est le sodium. Mais cette valeur minimale de coefficient dans la nappe albienne ($R^2=0,21$), est celle avec le calcium. Généralement on peut dire que les sulfates ont une bonne corrélation avec le Ca^{2+} ; le Mg^{2+} ; le Na^+ et IS du gypse (Graphique n° 29 ; 30 ; 31 et 32).



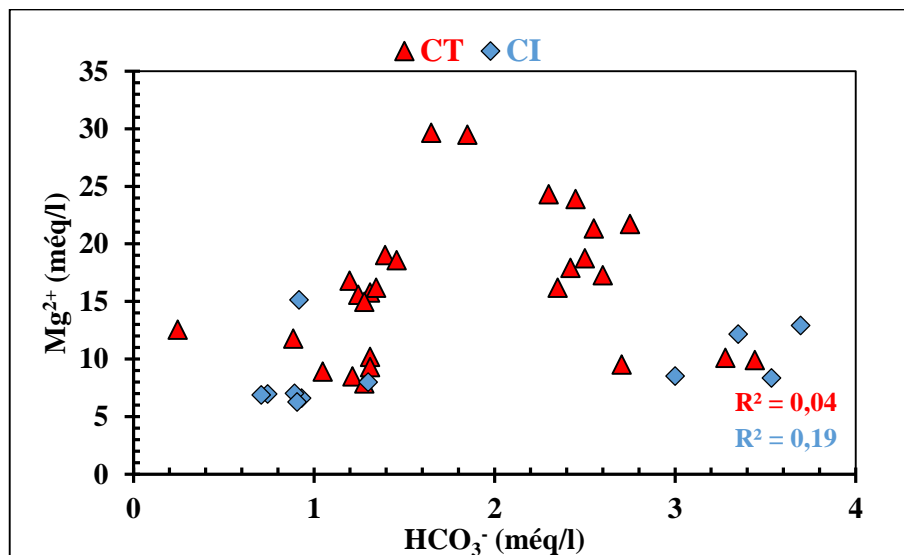
Graphique n°33 : Corrélation de concentration SO_4^{2-} vis-à-vis au Cl^-



Graphique n°34 : Corrélation de la concentration SO_4^{2-} vis-à-vis aux HCO_3^-



Graphique n°35 : Corrélation entre les concentrations HCO_3^- vis-à-vis au Ca^{2+}



Graphique n°36 : Corrélation entre les concentrations HCO_3^- vis-à-vis du Mg^{2+}

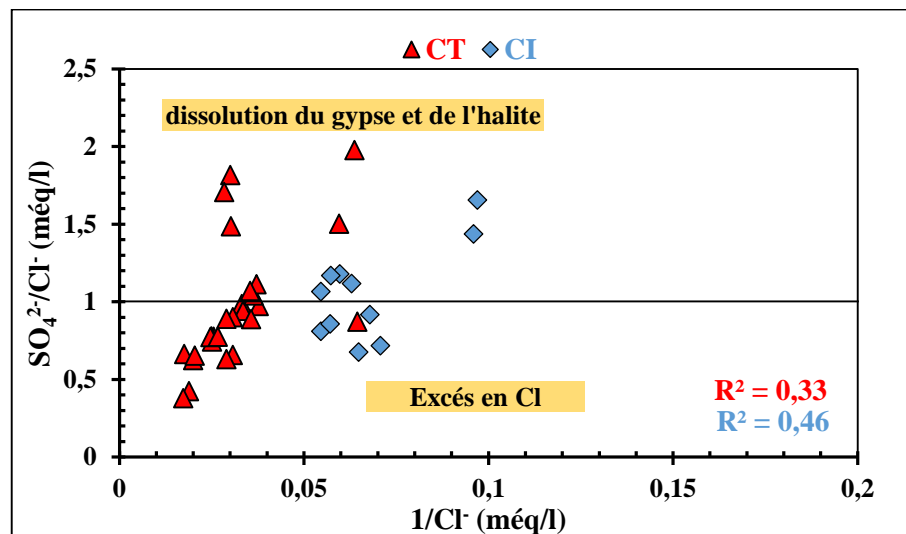
La corrélation des teneurs en sulfates en fonction du chlorure et des bicarbonates, indique des faibles coefficients, on peut dire que la relation entre les sulfates et le Cl^- et HCO_3^- est très faible. (Graphique n°35 et n°36).

La projection des teneurs en bicarbonates et en sulfates en fonction des concentrations en calcium et en magnésium, peut nous donner une synthèse de leurs origines carbonatée et/ou évaporitique pour les deux nappes étudiées. On remarque que la plupart des échantillons sont plus influencés par la dissolution des minéraux évaporitiques que carbonatés.

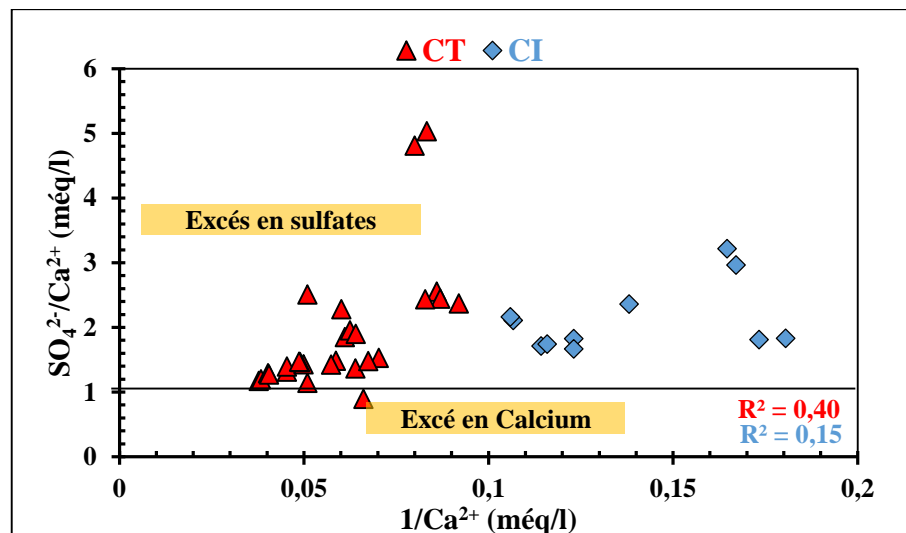
Les eaux étudiées (Miopliocènes et albiennes) caractérisées par des teneurs plus élevées en chlorure et en sulfate. Le pourcentage des points d'eau des aquifères étudiés, qui présentent un rapport (SO_4^{2-}/Cl^-) inférieure à 1, est de 59,25% pour les eaux Miopliocènes et de plus 45%

pour les eaux albienne. Ces eaux sont caractérisées par un excès en Cl^- . Par contre les points d'eau qui ont un rapport ($\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$) supérieur ou égale à 1, sont des eaux riches en sulfates, ces eaux favorisent la dissolution de gypse et de l'halite (Graphique n°37), ce qui traduit l'impact de cette dissolution dans l'acquisition de la charge saline de ces eaux.

Les eaux étudiées forment un assemblage des points d'eaux bipolaire (HALASSA 2021). Dans le diagramme ($\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$) vis-à-vis du ($1/\text{Cl}^-$), une part importante des échantillons se situe dans un pôle caractérisé par les rapports les plus faibles en $1/\text{Cl}^-$ et un pôle représenté par les rapports les plus élevés en $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ (Graphique n°37).



Graphique n°37 : Corrélation du rapport ($\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$) vis-à-vis du ($1/\text{Cl}^-$)



Graphique n°38 : Évolution du rapport ($\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$) vis-à-vis au ($1/\text{Ca}^{2+}$)

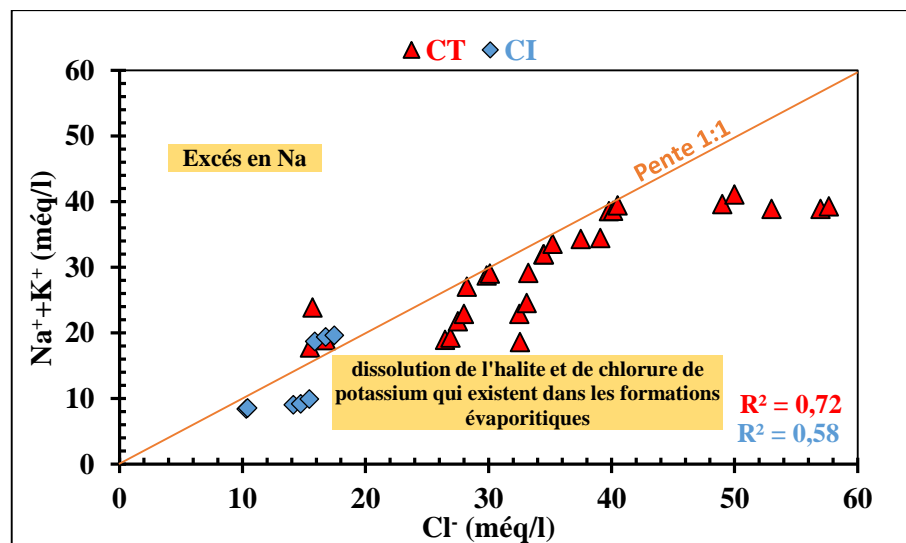
La projection de ($\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$ vis-à-vis du $1/\text{Ca}^{2+}$) indique que la totalité des points se situent dans la zone où le rapport ($\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$) supérieur à 1. A cette position nous constatons que les Sulfates dominent ces les eaux (pour les Miopliocènes et les albienne). Probablement,

à cause d'un échange de base dans les minéraux argileux, quelques échantillons ont un rapport ($\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$) proche inférieur de 1 (HALASSA 2021).

Les graphiques n°IV.37 et 38, nous permettent de conclure que l'origine de ces ions est principalement la dissolution des minéraux évaporitiques essentiellement le gypse et le sulfate de magnésium. Nous remarquons aussi qu'il n'a pas un excès en calcium observé par apport aux sulfates, le calcium peut être attribué à la dissolution de la calcite.

b) Chlorures et sodium

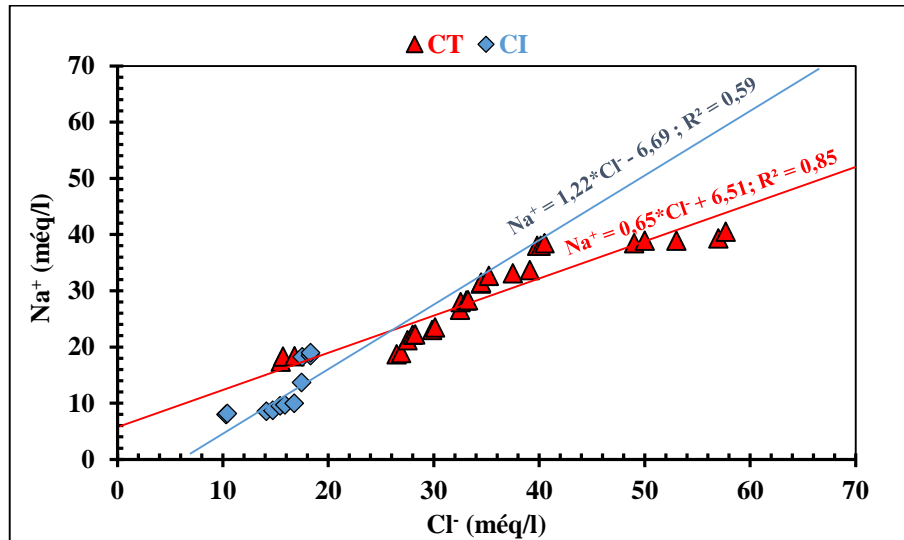
Le chlorure et le sodium sont des éléments ont une origine de la dissolution des formations salifères et à l'évaporation dans les systèmes endoréiques. L'halite se dissout en donnant le cation Na^+ et l'anion Cl^- . Nous pouvons utiliser le chlorure dans l'étude d'évolution des autres ions, par ce qu'il est considéré comme un stable traceur et un conservateur pour les très solubles évaporites, car il est rarement de participer aux précipitations salines, et il n'a pas aucun rôle dans les phénomènes d'oxydoréduction et peu influencé par les interventions bactériennes (Hachaichi 2017). Pour cela on peut étudier l'évolution de Na^+ en fonction des teneurs en chlorure.



Graphique n°39 : Corrélation en Cl^- vis-à-vis au $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ dans les eaux d'irrigation à la région de Ouargla

Les fortes teneurs en Na^+ , K^+ et Cl^- peuvent être d'origine de la dissolution de l'halite et du chlorure de potassium contenue dans les formations évaporitiques. La projection des valeurs de la somme de teneurs en sodium Na^+ et en potassium K^+ en fonction des concentrations en chlorures (Graphique n°39), indique, une bonne corrélation entre eux. Le plus grand pourcentage des échantillons pour les deux nappes, se trouve au-dessous de la droite de pente 1, dans la zone de la dissolution de l'halite et de chlorure de potassium. Par contre le moindre

pourcentage est enregistré pour les échantillons caractérisés par un excès du sodium, ce qui traduit d'un part la dominance de chlorure par rapport au sodium et au potassium et d'autre part l'existence d'autres origines tels que les échanges ioniques, au sein des argiles entre cations monovalent (Na^+ , K^+) et divalents (Ca^{2+} , Mg^{2+}).

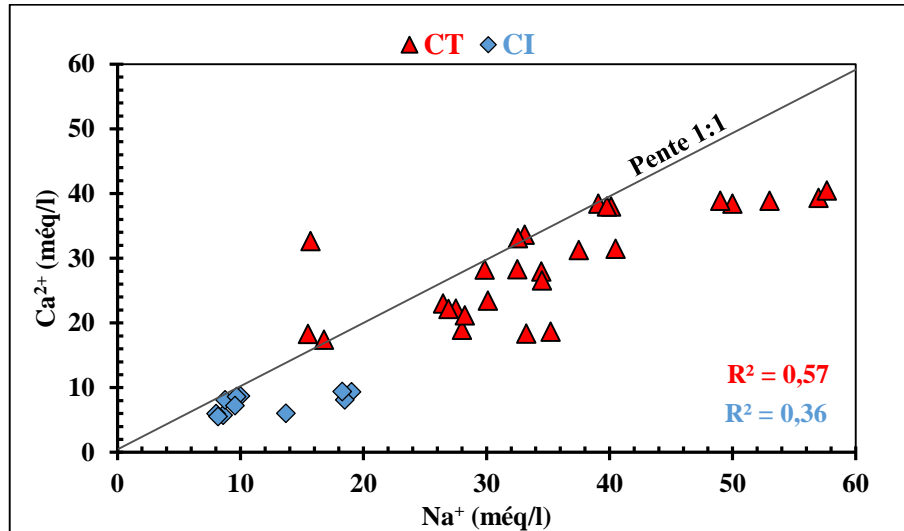


Graphique n°40 : Relations entre sodium et le chlore dans les eaux d'irrigation souterraines à la région de Ouargla

La présence conjointe des formations carbonatées et des argiles silteuses dans le contexte géologique de la nappe du CT, peut favoriser un tel échange. En particulier aux échanges de base (Ca^{2+} vs Na^+), ou l'hydrolyse des silicates dans les grès et les argiles (HALASSA 2021).

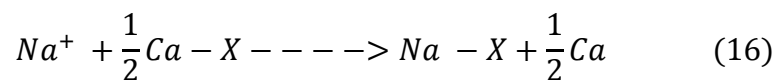
L'examen des valeurs de ces deux éléments montre que les concentrations sont très fortes dans l'eau Miopliocène au forage n° 22 situé à la commune Zaouïa Abidia, est le plus excessivement salées par rapport les autres forages (6,11 g/l de salinité), par contre l'eau du forage n°31 situé à la commune Hassi Ben Abdallah, présente les eaux les moins salées. La relation entre ces deux éléments est caractérisée par un bon coefficient de corrélation $R^2= 0,85$. Pour les eaux albiennes la relation entre le chlorure et le sodium moins corrélé par rapport à la nappe Miopliocène ($R^2= 0,59$) (Graphique n°40).

L'étude la variation du Ca^{2+} en fonction du Na^+ (Graphique n°41), indique que la majorité des points d'eau caractérisés par un excès en sodium, cet excès s'accroît avec la minéralisation des eaux. D'autres points se situent sur la droite de pente 1 et quelques points d'eau caractérisés par un excès en calcium par rapport au sodium. Cette variation est due essentiellement à la participation des ions Ca^+ aux processus d'échange cationique avec les minéraux argileux.

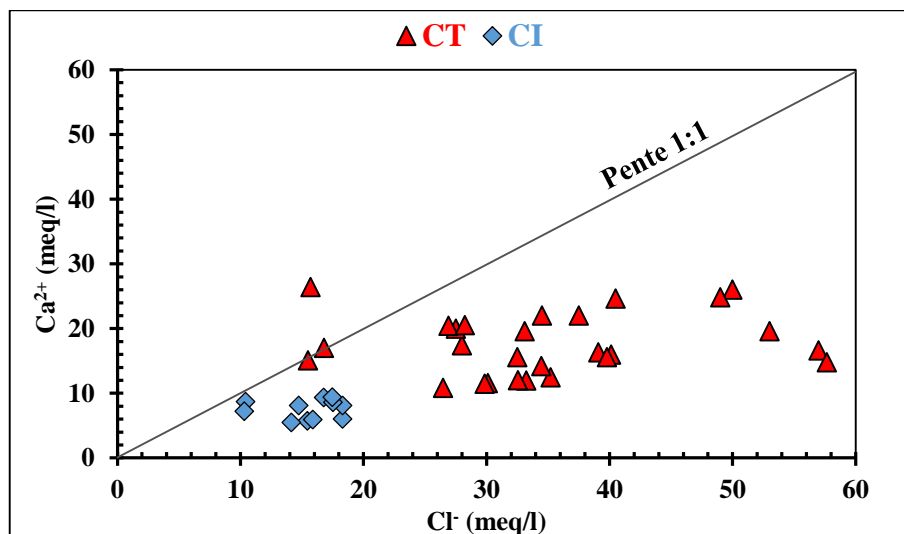


Graphique n°41 : Corrélations entre le Ca^{2+} en fonction du Na^+ dans les eaux d'irrigation souterraines dans la région de Ouargla

L'excès de Na^+ peut être expliqué probablement à la teneur en cet élément dans la réaction d'échange de cation, qui se produit entre les eaux riches en sodium (Na^+) et les sédiments des deux aquifères étudiés, selon l'équation ci-dessous :



Avec : X indique l'échangeur de sédiments (Appelo and Postma 1993).

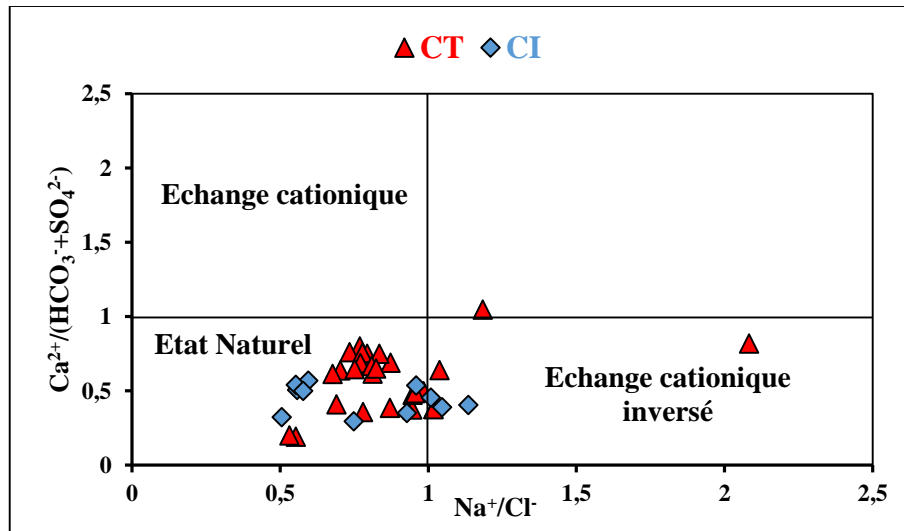


Graphique n°42 : Corrélations entre le Ca^{2+} en fonction du Cl^+ dans les eaux d'irrigation souterraines dans la région de Ouargla

Concernant la relation entre le Ca^{2+} et Cl^- le graphique n°42 montre qu'il existe une mauvaise corrélation entre ces éléments, par ce que la majorité des points d'eau destinés à l'usage agricole de la région de Ouargla, présentent que les teneurs en Ca^{2+} est toujours inférieur à ceux du Cl^- . Donc aucune relation trouvée, ce qui est logique et naturel, cela s'explique par le fait que ces deux éléments sont rarement directement associés dans les réactions chimiques des

eaux souterraines, ils présentent une très faible corrélation, en particulier à de faibles concentrations ou pour les fortes concentrations. Il est probable que l'évolution de leur concentration soit liée à la dissolution des évaporites.

La projection des résultats de calcul entre le rapport (Na^+/Cl^-) et le rapport ($\text{Ca}^{2+}/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$) à justifier la relation d'échange cationique (Graphique n°43), où les échantillons concernés par ce processus tracent dans le diagramme le déficit Ca^{2+} et l'excès de Na^+ .

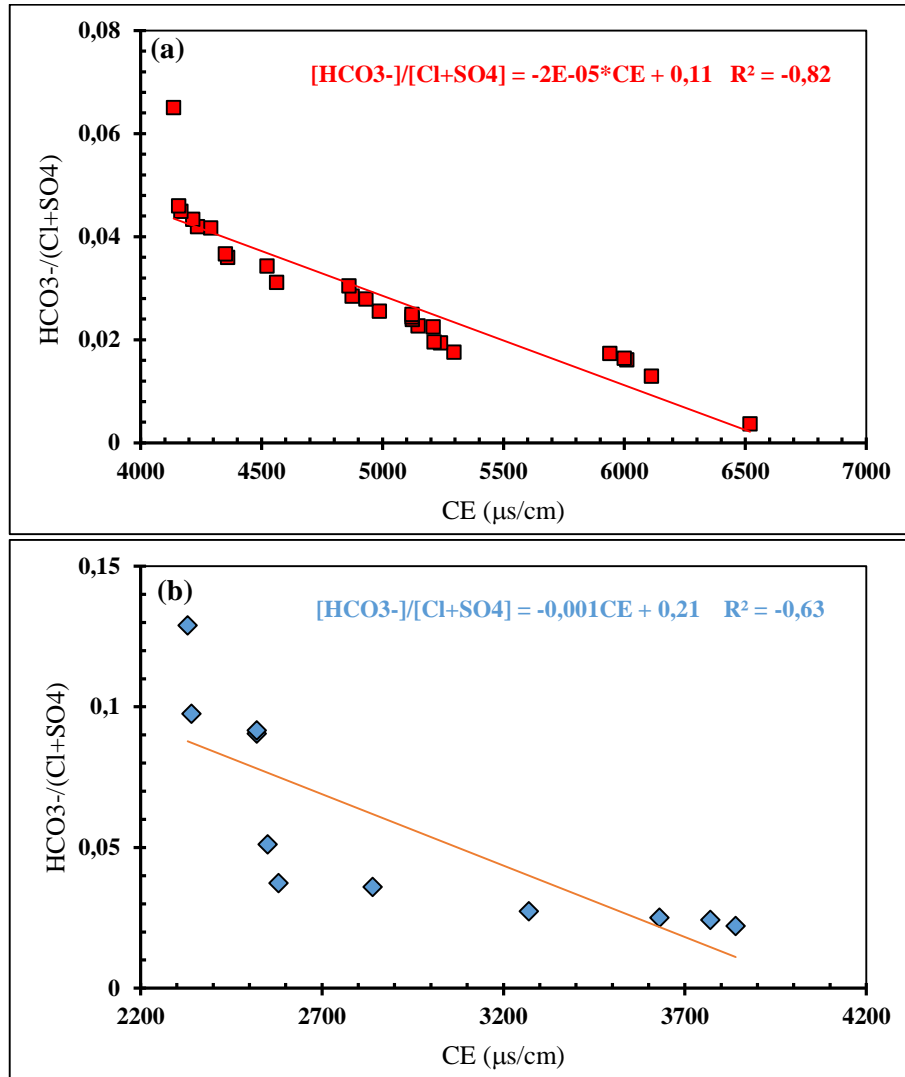


Graphique n°43 : Processus chimique des échanges cationiques de Cl et CT dans la région de Ouargla

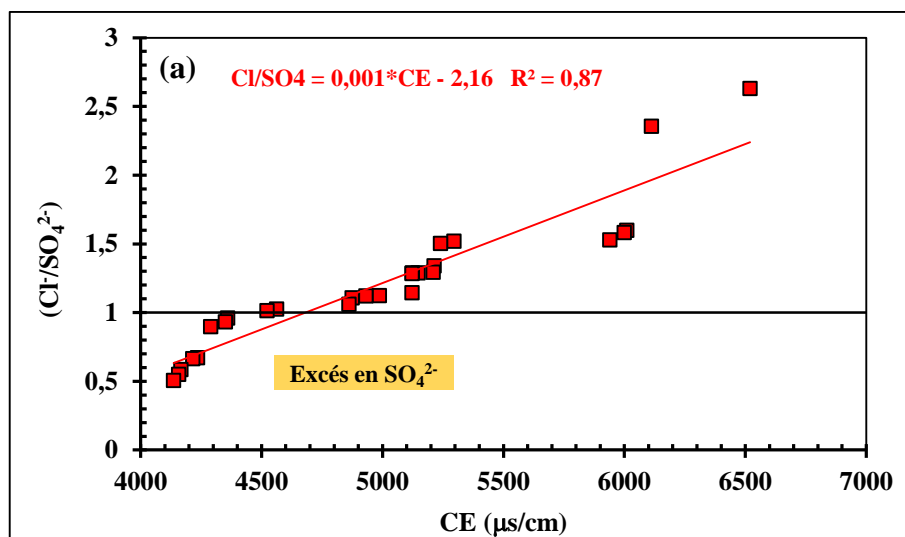
II.2.3.4. Relation de la CE et les anions majeurs

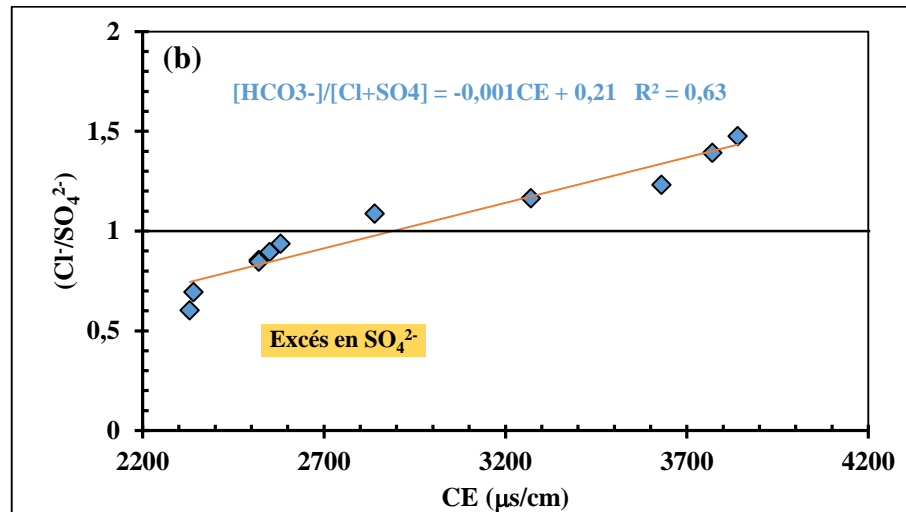
Les eaux Miopliocènes caractérisés par une richesse remarquable en chlorures et en sulfates par rapport aux anions carbonatés (HCO_3^-). La minéralisation excessive des eaux à raison de l'abondance de ces deux anions évaporitiques. Nous pouvons remarquer sur le diagramme présenté dans le graphique n°44 (a), montre une bonne corrélation significative ($-0,82$) entre la diminution du rapport ($[\text{HCO}_3^-]/[\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}]$) et l'augmentation de la CE.

Les anions majeurs au sein de la nappe albiennaise présentent en excès. Les sulfates et les chlorures prédominent les eaux alors que les bicarbonates restent, relativement, faible. L'eau albiennaise a une minéralisation excessive, mais moins accentuée par rapport aux eaux de la nappe du Complexe Terminal. Les valeurs enregistrées de la CE sont vraie entre de $2330 \mu\text{S}/\text{cm}$ et $3840 \mu\text{S}/\text{cm}$. Nous pouvons observer sur le graphique n°44 (b), une bonne corrélation ($R^2 = -0,63$) entre la diminution du rapport ($[\text{HCO}_3^-]/[\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}]$) et l'augmentation de la CE.



Graphique n°44 : La relation entre la CE et le rapport carbonates/évaporites dans les eaux d'irrigation à la région de Ouargla (a : la nappe Miopliocène ; b : la nappe albienne)





Graphique n°45 : La relation entre la CE et le rapport Cl^- / SO_4^{2-} dans les eaux du d'irrigation à la région de Ouargla (a : la nappe Miopliocène ; b : la nappe albiennne)

Concernant la nappe Miopliocène, nous pouvons constater que la majorité des échantillons présentent un excès en chlorures par rapport aux sulfates, cette dominance des chlorures est observée au-delà d'une valeur de 4500 $\mu S/cm$ de conductivité électrique, avec une corrélation plus importante de 0,87. (Graphique n°45.a). Par contre, dans la nappe albiennne les teneurs en chlorures et en sulfates sont plus équilibrés par rapport l'eau du Miopliocène (graphique n°45.b), Les grandes teneurs de chlorures soient à l'origine de l'augmentation de minéralisation de ces eaux.

II.2.3.5. Processus d'échanges de bases :

A travers leur parcours souterrains, les eaux souterraines se chargent progressivement en matières dissoutes, où ces dernières rentrent en contact avec des éléments ayant la propriété nécessaire pour commencer un échange ionique avec l'eau. C'est une caractéristique distinctive des argiles dont les feuillets portent une charge négative. Cette charge est compensée dans les espaces interfoliaires par des cations échangeables tels que : Na^+ , H^+ , K^+ , Mg^{2+} , et Ca^{2+} (Schoeller 1962, Al-Droubi 1976).

II.2.3.5.1. Indice d'échange de bases (i.e.b)

L'usage de cet indice nous permette de trouver les échanges dans les minéraux argileux, cet échange produit entre la phase liquide et les phases solides au cours de trajet souterrain de l'eau. Effectivement, les minéraux argileux effectuent des échanges ioniques, où les ions Na^+ et K^+ en solution sont échangés contre des ions Ca^{2+} et Mg^{2+} . L'indice d'échange de base (IEB) est défini comme le rapport entre les ions échangés et les ions de même nature qui étaient

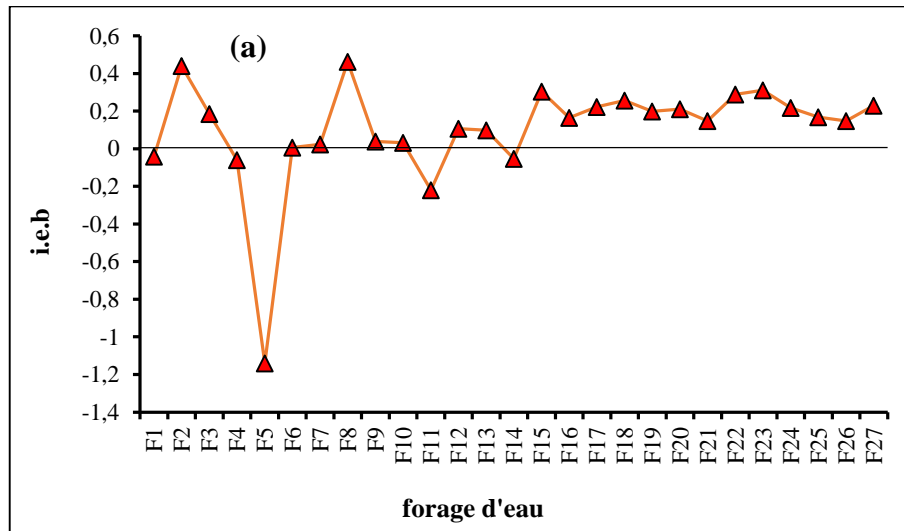
initialement présents dans l'eau (Schoeller 1962, Al-Droubi 1976). Il est calculé par la formule suivante :

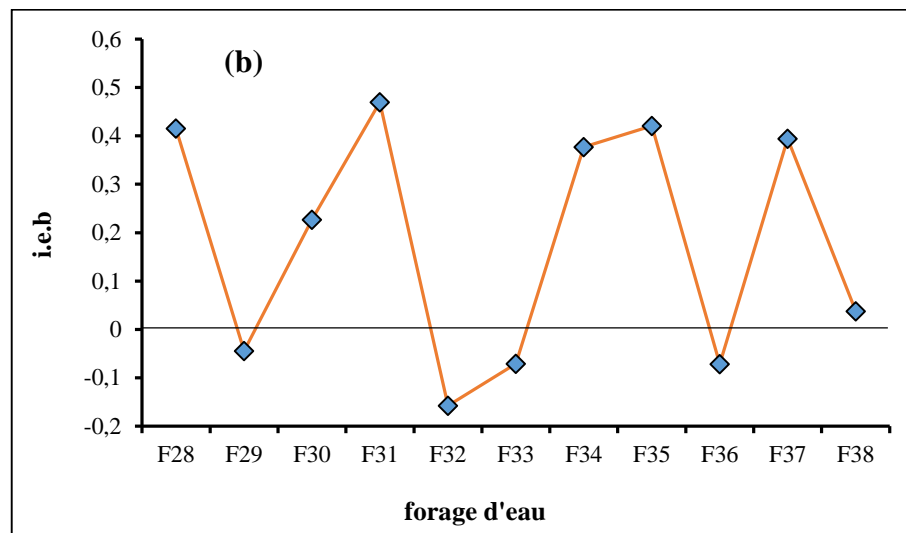
$$i.e.b = \frac{[Cl^- - Na^+ - K^+]}{Cl^-} \quad (17)$$

Les concentrations en milliéquivalent par litre.

- Si $IEB < 0$: Dans ce cas il se produit une introduction de cations au moment du contact avec les argiles, ce qui se manifeste par l'échange des ions Ca^{2+} et Mg^{2+} de l'eau contre les ions Na^+ et K^+ du sol.
- Si $IEB > 0$: c'est le cas contraire, il y a des phénomènes de consommation de Na^+ et K^+ par la végétation surviennent en raison de l'évapotranspiration et de re-concentration des chlorures. Donc les ions Na^+ et K^+ de l'eau sont échangés contre les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} du sol ;
- Si $IEB = 0$: Dans ce cas, un équilibre est atteint entre les compositions chimiques de l'eau et celles du sol environnant.

La projection des valeurs du i.e.b sur les graphiques n°46 (a) et (b), indique qu'on a six forages d'eau Miopliocène (F1 ; F4 ; F5 ; F6 ; F11 et F14) et quatre forage d'eau albienne (F29 ; F32 ; F33 et F36), présentent des i.e.b négatifs. Les valeurs positives de l'indice d'échange de base dans plus de 81% des échantillons pour le Miopliocène et plus de 63% pour l'albien.





Graphique n° 46 : Evolution de l'i.e.b. dans les eaux d'irrigation dans la région de Ouargla (a : la nappe Miopliocène ; b : la nappe albienne)

Nous pouvons également observer, qu'il y a un échange des ions Na^+ et K^+ de l'eau contre les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} du sol, cet échange est manifesté par la consommation de sodium et de potassium au sein des végétaux due à l'évapotranspiration ainsi que par reconcentration d'ions de chlorures (Cl^-).

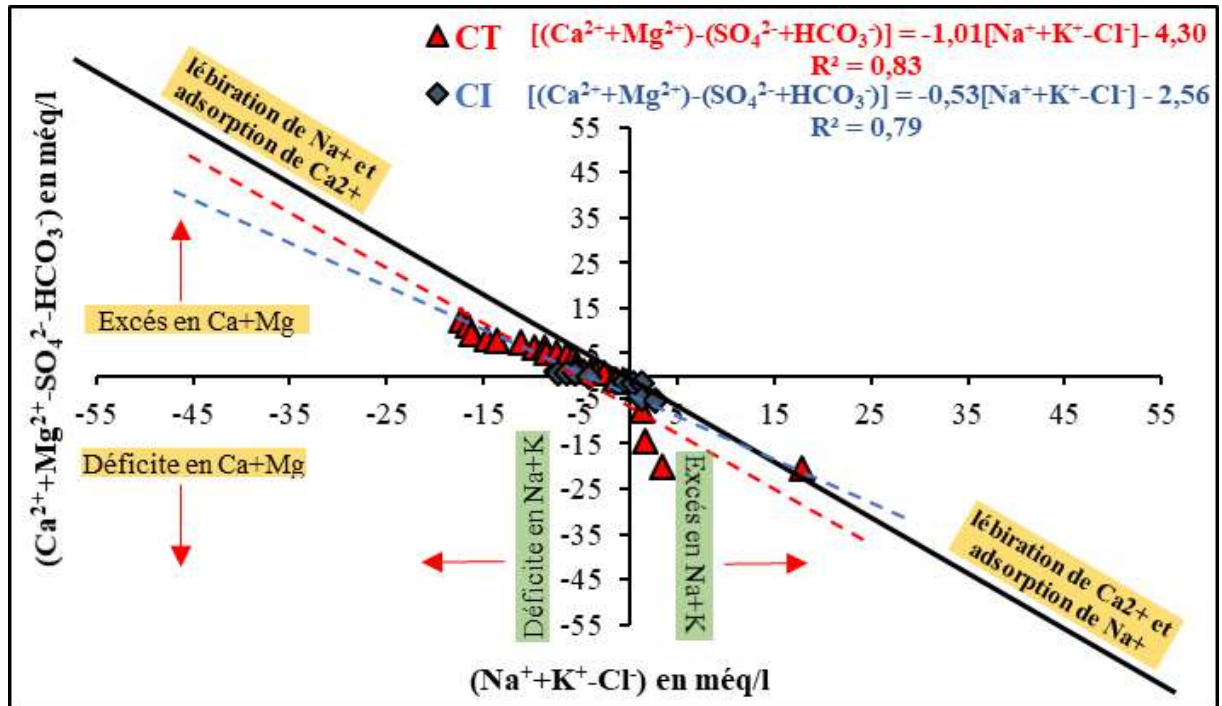
Les majeurs phénomènes géochimiques se déroulent dans l'aquifère, impliquant des mécanismes liés à la chimie des carbonates et aux échanges de bases. On a précédemment observé, en ce qui concerne le calcium, que la relation entre la somme des cations alcalino-terreux (en méq/l) avec les ions bicarbonates, caractérisé par une faible corrélation. La cause derrière cela était l'apport de gypse dissolvant, assemblé avec présence d'une saturation en dolomite en calcite, mais il faut prendre en considération la importante contribution des eaux piégées dans les dépôts sédimentaires pour bien expliquer l'évolution des faciès chimiques, et intégrer les échanges de bases et/ou les possibles entrées de cations résultant de l'hydrolyse des silicates.

Le graphique n°47 met en lumière et illustre les échanges de bases avec les minéraux d'argile qui impactent les eaux des aquifères lors de l'infiltration des eaux de pluie et pendant leur séjour au sein de l'aquifère.

Le diagramme $[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-}]$ versus $[\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-]$ (Graphique n°47) montre que l'évolution d'échange de base est exprimée avec une bonne corrélation ($R^2=0,83$ pour le Miopliocène et $R^2=0,79$ pour l'albien), cela confirme que, pour les points s'éloignant de

l'origine (0), le sodium et le calcium jouent un rôle important dans les réactions d'échanges de bases entre les minéraux d'argile et l'eau pendant leur séjour dans ces aquifères.

D'après ce diagramme, Nous observons qu'il y a un échange de bases impliquant les minéraux d'argile, qui libère le Na^+ et/ou de K^+ et fixe en Ca^{2+} et/ou Mg^{2+} ou l'inverse.

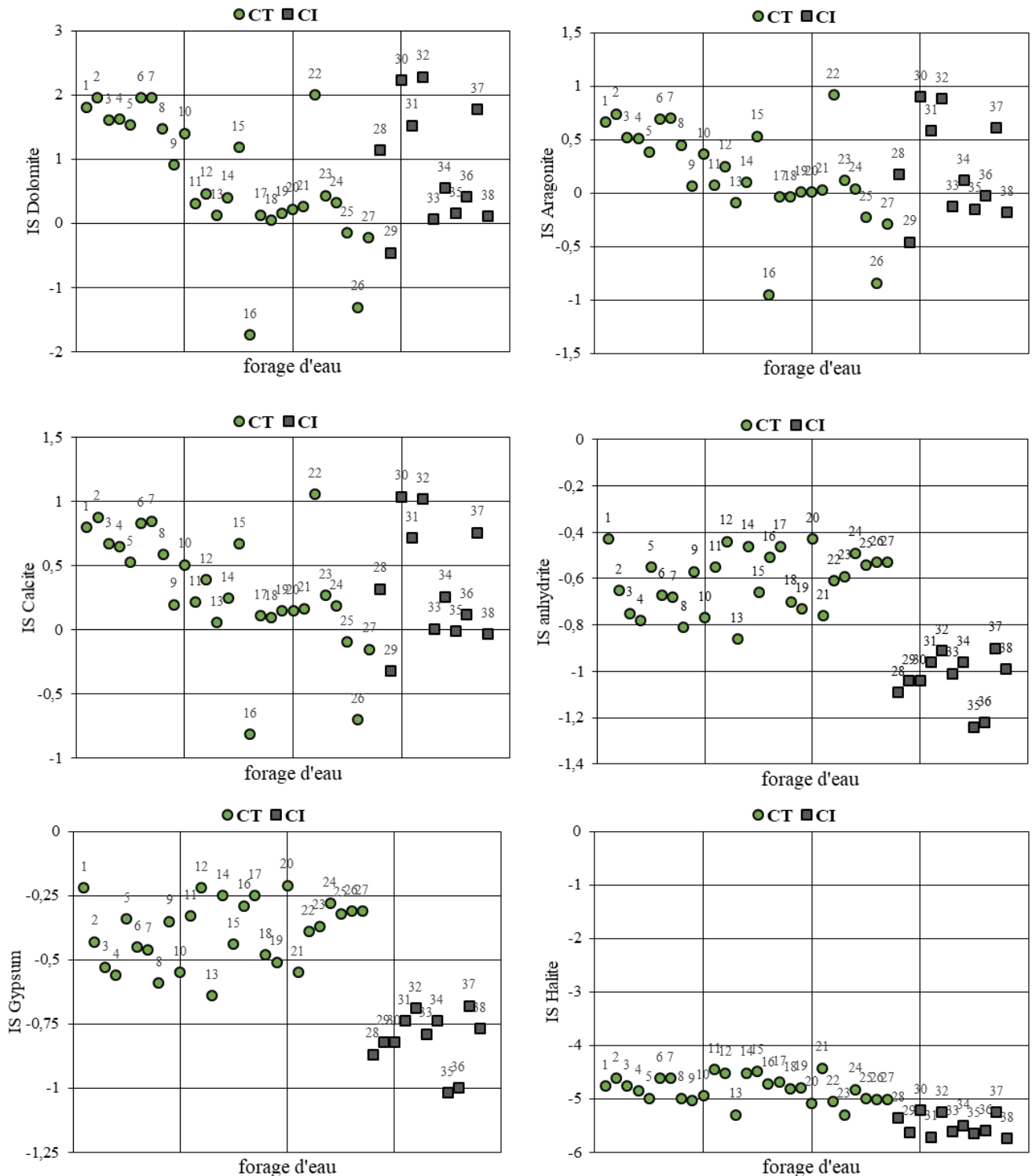


Graphique n°47 : Mise en valeur des échanges fondamentaux avec la relation entre $[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-}]$ et $[\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-]$ dans les eaux du Miopliocène et du l'albien

II.2.3.6. Interaction eaux sédiments

L'analyse des valeurs de l'indice de saturation (IS) des minéraux, comme présenté dans le graphique n°48, révèle que l'eau souterraine est en dessous de la saturation en ce qui concerne le gypse et l'anhydrite. Cela indique que ces minéraux se dissolvent dans l'eau souterraine là où les concentrations de Ca^{2+} et SO_4^{2-} sont élevées.

La sous-saturation par rapport à l'halite suggère que les sels gemmes dissolvant sont significatives dans les eaux d'arrosage. Cette observation peut s'expliquer par l'élévation des teneurs en ions de chlorure et en ions de sodium, indiquant ainsi un long séjour de l'eau dans le sous-sol



Graphique n°48 : Indice de saturation vis-à-vis aux principaux minéraux (carbonatés/sulfatés)

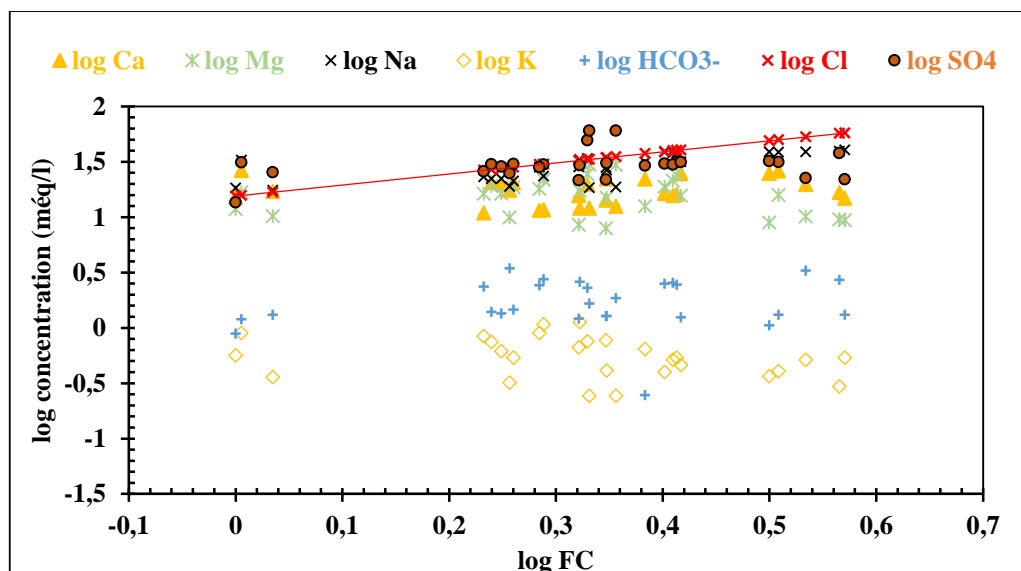
Pour la dolomite, 14% des échantillons des eaux de la nappe Miopliocène et un seul pour les eaux albiennes (échantillon n°29) ont d'un indice de saturation inférieure à zéro, donc on peut dire que ces eaux sont sous-saturées vis-à-vis à la dolomite. Le reste des échantillons (86% Miopliocène et 99% albien) sont sursaturés. Les pourcentages sont obtenus pour la calcite. La

précipitation de ces minéraux se produit généralement au nord de la nappe Miopliocène, cette précipitation entraînant un équilibre des teneurs en Ca^{2+} . En ce qui concerne l'aragonite, 26 % est le pourcentage des eaux Mio-pliocènes qui sont sous-saturés, tandis que ce chiffre s'élève à 45 % des eaux albiennes, cela explique la précipitation de ce minéral.

II.2.3.7. Diagramme de concentration

La recherche a pour but de déterminer que la salinité est le résultat de la concentration des eaux. L'estimation de cette dernière se fait à l'utilisation d'un traceur chimique. L'ion chlorure ne précipite qu'à des valeurs élevées de force ionique, ce qui en fait un indicateur fiable du degré de concentration de l'eau. L'ion de Cl^- est un stable traceur et l'élément chimique qui conserve bien les évaporites, il a une grande solubilité, c'est rarement à entrer dans les précipitations salines, il n'a aucune intervention dans les phénomènes d'oxydoréduction et les bactéries influencent peu sur cet ion (Nezli, Achour et al. 2007).

Dans le diagramme de concentration présenté au graphique n° 49 on réalise la projection du logarithme du facteur de concentration en abscisse et du logarithme des concentrations en méq/l en ordonnée. Dans ces diagrammes, Un alignement observé des valeurs de chlorures qui semblent suivre une droite avec une pente de 1. Lorsque les éléments ne se concentrent pas proportionnellement au facteur de concentration, l'ordre de classement des concentrations des éléments, n'est pas toujours le même, pour cela les teneurs de certains éléments augmentent alors que d'autres diminuent.

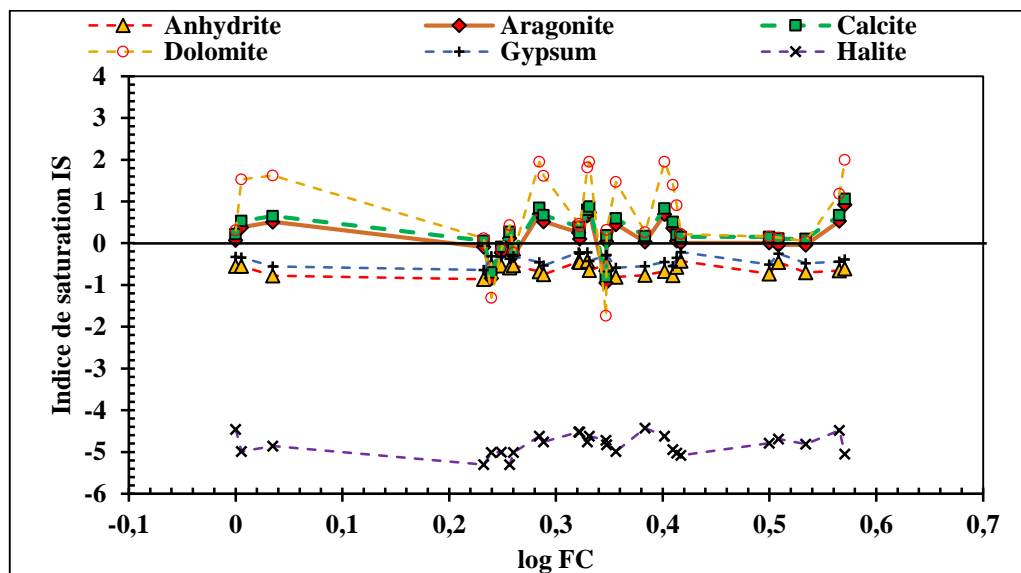


Graphique n°49 : Evolution des concentrations des éléments majeurs en fonction du facteur de concentration dans l'eau d'irrigation de la nappe Miopliocène

L'alcalinité ($\text{alc}-2\text{Ca}-2\text{Mg}<0$) dans la solution initiale est inférieure à la somme des équivalents des teneurs en magnésium et en calcium. Le rythme d'augmentation des teneurs en Ca et en Mg est inférieur à celui du facteur de concentration, et cela est en conformité avec l'alcalinité résiduelle négative due à la calcite ($\text{alc}-2\text{Ca}<0$). Le nuage de points représentant les valeurs de teneurs susmentionnés s'incurve vers le bas, indiquant ainsi une consommation des teneurs en magnésium et en calcium, tandis que la teneur en sulfate reste élevée, concordant avec une alcalinité résiduelle positive due à la calcite plus le gypse ($\text{alc}-2\text{Ca}+2\text{SO}_4>0$) et une alcalinité résiduelle positive due au gypse ($2\text{SO}_4-2\text{Ca}-2\text{Mg}>0$). Cette évolution est conforme au concept de l'alcalinité résiduelle généralisée (Al-Droubi 1976).

II.2.3.8. Equilibre sels/solution et comportement des ions

Dans le schéma ci-dessous (Graphique n°50), l'indice de saturation dans l'eau en minéraux est représenté sur l'axe des ordonnées, tandis que le logarithme du facteur de concentration est sur l'axe des abscisses ($\text{IS} = \text{Log}(\text{Fc})$). Nous pouvons observer que dès le début de la concentration ($\log \text{Fc} < 0.2$), les solutions se trouvent déjà dans un état d'équilibre (saturées) ou même au-delà du point de sursaturation, ce qui peut entraîner la précipitation de minéraux tels que la dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), la calcite (CaCO_3) et l'aragonite (CaCO_3). Ces processus contribuent au contrôle de l'alcalinité (sous forme de bicarbonate) ainsi qu'aux teneurs en calcium et en magnésium, qui ne peuvent pas augmenter simultanément.



Graphique n°50 : Evolution de l'indice de saturation des minéraux dans l'eau Miopliocène en fonction du facteur de concentration.

Concernant le sodium, il reflète une augmentation de molalité proportionnelle au facteur de concentration, donc parallèlement au chlore. Cependant l'excès du sodium pour de faibles concentration en chlorures (les échantillons les plus dilués) au détriment du calcium et du magnésium peut être expliqué également par un déséquilibre chloro-alcalin due, probablement, à un échanges de bases ou entres les eaux de la nappe et les argiles de la formation aquifère. Toutefois il se concentre dans les chotts et sebkhas par évaporation des eaux en surface avec formation de l'Halite (Graphique n°50) (Nezli 2009).

II.3.Conclusion

L'analyse de la minéralisation des eaux souterraines de Ouargla révèle généralement une concentration élevée en sels dissous, notamment en chlorures, sulfates, carbonates et bicarbonates, résultant de divers processus géologiques et hydrologiques. La forte évaporation dans le climat désertique contribue à la concentration des sels dans les eaux souterraines, accentuant ainsi le degré de minéralisation.

Cette minéralisation élevée peut poser des défis pour l'utilisation de ces eaux à des fins domestiques, agricoles et industrielles. Les niveaux élevés de sels dissous peuvent affecter la qualité de l'eau, rendant nécessaire le traitement avant sa consommation. De plus, une irrigation excessive avec ces eaux peut entraîner une accumulation de sels dans le sol, ce qui peut compromettre la fertilité des terres agricoles.

Par conséquent, la gestion durable des ressources en eau de Ouargla nécessite une compréhension approfondie de la minéralisation des eaux souterraines, ainsi que des mesures efficaces pour atténuer ses effets néfastes. Cela pourrait inclure des techniques de désalinisation pour rendre les eaux utilisables, des pratiques agricoles adaptées pour minimiser l'accumulation de sels dans le sol, ainsi que des politiques de conservation de l'eau pour assurer une utilisation équilibrée et efficace des ressources disponibles.

Chapitre III
Aptitudes des eaux à l'irrigation

III.1. Introduction

La qualité de l'eau utilisée à des fins agricoles, joue un rôle important dans la production agricole, la sécurité alimentaire et du niveau de santé humaine. La surexploitation des eaux souterraines a eu des effets néfastes sur ces eaux ressource en termes de qualité et de quantité. Cependant, l'impact de cette qualité de l'eau d'arrosage sur les cultures constitue une préoccupation majeure pour les agronomes et les économistes responsables du développement des régions arides et semi-arides.

Dans les terres arides, les sols salins sont également présents dans les zones où la salinité est causée par la mauvaise qualité de l'eau d'irrigation. Lorsque la qualité de l'eau et du sol est mauvaise, des pratiques de gestion spéciales sont nécessaires pour surmonter la réduction du rendement et de la qualité des cultures, par contre une bonne qualité de l'eau a le potentiel de maximiser le rendement des cultures dans le cadre de bonnes pratiques de gestion des sols et de l'eau.

L'objectif de cette étude est l'évaluation de la qualité physico-chimique des eaux souterraines utilisées en irrigation dans la région de Ouargla, à partir l'utilisation d'un ensemble des indices de qualité et l'établissement d'une cartographie spatiale de ces indices. Cette spatialisation permettra d'établir des modèles d'une classification globale de ces ressources selon leur qualité et leur aptitude à l'irrigation. Les cartes thématiques ont été élaborées à l'aide d'un système d'information géographique.

III.2. Indice de qualité :

La spatialisation de la qualité des eaux souterraines a été établie par la détermination de l'aptitude de ces eaux à des fins d'irrigation qui dépendait des effets des concentrations des éléments majeurs dans l'eau sur les sols et les plantes. L'effet des teneurs élevés en sels minéraux dans les sols agricoles irrigués peut affecter la structure du sol, la perméabilité et la croissance des plantes.

Dans le cadre de ce travail des classifications pour évaluer l'aptitude de l'eau à des fins d'irrigation ont été déterminés à travers huit indices suivants :

- a) Rapport d'adsorption du sodium (SAR).
- b) Conductivité électrique (CE),
- c) Pourcentage de magnésium (%Mg) ;
- d) Salinité potentielle (SP)

- e) Carbonate de sodium résiduel (RSC) ;
- f) Pourcentage en sodium (%Na) ;
- g) Indice de perméabilité (IP) ;
- h) Rapport de Kelly (KR)

Tableau n°21 : Résultats de calcul des différents indices de qualité de l'eau d'irrigation dans la région de Ouargla

forage	Commune	Nappe	Indices de qualité							
			SAR (méq/l)	Na (%)	RSC (méq/l)	IP (%)	Mg (%)	KR (méq/l)	SP (méq/l)	CE (μ s/cm)
F1	El-Hadjira	CT	7,19	43,95	-41,64	45,35	55,34	0,77	38,06	6520
F2			4,03	30,89	-40,00	32,75	71,19	0,44	38,74	4290
F3			5,75	42,39	-30,63	44,21	65,17	0,70	33,97	5240
F4			4,72	39,52	-25,92	41,59	37,45	0,64	20,35	5296
F28			3,84	44,55	-12,25	47,30	35,42	0,74	13,16	2840
F5	Alia	CT	7,03	43,71	-42,07	44,48	38,86	0,76	19,64	4862
F6	Hassi ben Abdallah	CT	9,18	52,52	-32,65	54,41	53,41	1,09	42,99	6010
F7			7,37	49,78	-27,00	51,70	60,91	0,96	33,61	5210
F8			4,08	31,09	-40,13	33,05	70,23	0,45	40,70	4360
F9			8,52	49,17	-37,44	50,82	59,89	0,95	44,09	5940
F10			8,85	51,06	-34,41	52,85	57,72	1,03	43,66	6000
F11			5,00	41,29	-26,01	42,63	43,78	0,68	18,10	4987
F12			8,16	54,59	-22,92	56,11	35,24	1,17	35,77	5124
F29			4,97	48,28	-14,25	50,77	59,94	0,90	21,44	3840
F30			3,56	45,29	-9,43	48,83	41,16	0,79	18,87	2550
F13			N'goussa	CT	6,26	46,85	-24,74	49,02	59,86	0,85
F14	8,65	53,88		-26,75	55,62	58,89	1,13	36,40	4350	
F31	6,59	53,79		-13,32	58,42	43,76	1,14	19,91	3770	
F15	Ouargla	CT	10,88	60,25	-23,45	62,59	36,40	1,50	61,35	4166
F32		7,18	59,68	-10,25	63,71	38,66	1,40	21,04	3630	
F16	Rouissat	CT	8,42	56,53	-20,85	58,12	35,69	1,27	37,77	4522
F17		8,41	48,16	-40,54	49,33	37,74	0,92	53,95	4875	
F18	Ain El-Beida	CT	10,09	56,98	-26,49	59,30	34,02	1,31	56,35	5122
F19	Tebesbest	CT	9,47	53,78	-32,71	54,96	26,39	1,15	53,00	5122
F20	Touggourt	CT	7,02	44,25	-39,00	45,45	38,75	0,78	44,46	4932
F33		3,54	42,81	-11,55	45,68	33,72	0,71	17,33	2520	
F34		3,83	44,12	-11,96	47,19	32,88	0,75	20,26	2580	
F21	Megarine	CT	7,53	48,01	-34,35	48,25	36,29	0,90	41,31	4215
F35		6,23	52,11	-13,50	56,94	45,12	1,06	20,66	3270	
F22	Zaouïa Abidia	CT	11,66	62,97	-22,83	64,43	38,58	1,68	60,99	5213
F23	M'nagueur	CT	5,13	41,34	-23,91	44,94	36,27	0,69	31,53	6112
F24	Nezla	CT	6,18	42,19	-35,75	43,59	40,47	0,72	38,43	5147
F36		3,79	47,95	-8,39	52,23	40,43	0,88	16,39	2340	
F25	Sidi Slimane	CT	5,23	38,70	-34,90	40,03	44,70	0,61	31,28	4136
F37		3,86	44,76	-8,72	52,46	40,90	0,78	13,23	2520	
F26	Baldet Omar	CT	4,99	36,73	-38,08	37,88	48,22	0,56	30,78	4158
F27	Temacine	CT	4,80	35,73	-37,68	37,15	47,52	0,54	32,12	4235
F38		3,90	48,07	-8,81	52,16	40,79	0,88	17,72	2330	

a) Taux d'adsorption du sodium (SAR)

Les sols présentant des concentrations élevées de sodium (en solution) sont réputés pour avoir une mauvaise structure physique. La toxicité due au sodium survient lorsque le sodium s'accumule dans les tissus des plantes. Une augmentation du SAR dans les eaux d'irrigation se

traduit par une augmentation du SAR dans les solutions du sol, ce qui entraîne également une augmentation du sodium échangeable dans le sol (Grattan 2002) (Janardhana Raju, Ram et al. 2009)

Le SAR peut être déterminé par l'équation suivante :

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} \quad (18)$$

Les concentrations en milliéquivalent par litre.

- Si le SAR < 10 **Classe S1** : Une eau présentant une faible teneur en sodium peut être utilisée pour l'arrosage de la plupart des types de sols sans que l'on ait à craindre des problèmes d'alcalinisation ;
- Si le 10 < SAR < 18 **Classe S2** : Une eau ayant une concentration modérée en sodium peut poser certains problèmes dans des sols de type grossier ou des sols contiennent une quantité en matières organiques qui favorisent une grande absorption de l'eau.
- Si le 18 < SAR < 26 **Classe S3** : L'eau présentant une grande concentration en sodium peut entraîner des problèmes dans la majorité des sols et ne doit être utilisée qu'avec des mesures de prévention particulières, telles qu'un drainage efficace, un lessivage élevé et l'ajout de matières organiques. En l'absence de gypse, il est nécessaire d'inclure un amendement chimique ayant un effet similaire ;
- Si le SAR > 26 **Classe S4** : Les eaux contiennent une très grande concentration en sodium, ces eaux considérées inappropriées pour l'arrosage des cultures, sauf dans le cas d'une salinité modérée ou faible, où l'utilisation de gypse ou d'amendements similaires permettrait leur utilisation.

Tableau n°22 : Qualité des eaux d'irrigation selon l'indice SAR

Classe	Valeur du SAR	Qualité de l'eau	Pourcentage des eaux
S1	SAR < 10 méq/l	Eau d'irrigation excellente qualité ; faible danger d'alcalinisation.	88,89% CT 100 % CI
S2	10 < SAR < 18 méq/l	Eau d'irrigation de bonne qualité ; danger d'alcalinisation moyenne.	11,11% CT 0% CI

Secteurs de qualité

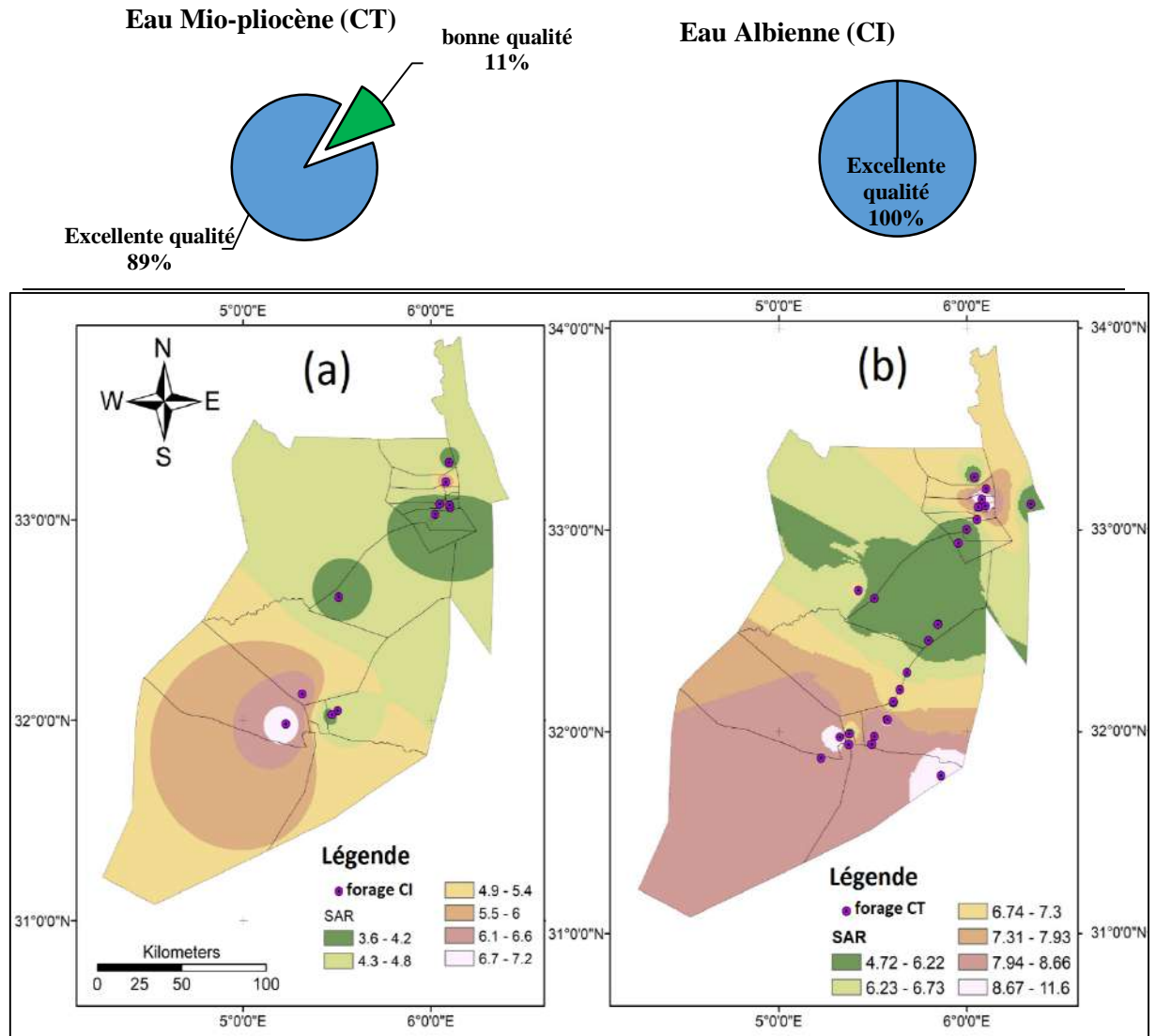


Figure n°20 : La répartition spatiale du SAR des eaux d'irrigation. (a) eau albienne (CT) ; (b) eau Mio-pliocène (CI).

Le SAR des eaux d'irrigation atteint des valeurs faibles dans la plupart des échantillons où la valeur maximale enregistrée est de 11,66 dans les eaux Mio-pliocène, cette valeur indique que l'alcalinité est moyenne par contre dans les 89% des échantillons le risque de l'alcalinité est faible. Les valeurs du SAR calculées permettent de classer ces eaux dans deux classes S1 et S2 (Tableau n°21). Selon les valeurs du SAR, la totalité des forages qui captent la nappe du CI se situent dans la classe (S1) des excellentes eaux à l'usage agricole ce qui signifie qu'on peut irriguer par ces eaux sans risque d'alcalinisation pour presque tous les sols. Plus de 88% des eaux de CT se situent dans la même classe (S1), ces eaux peuvent être irrigables pour la pluparts des sols, le reste 11% représente la classe (S2) des bonnes eaux présentant une quantité moyenne de sodium, Cela conduit à des problèmes pour irriguer les sols grossiers ou sur des sols contenant une quantité de la matière organique qui absorbent bien l'eau (figure n°20).

b) Conductivité électrique (CE)

La CE constitue un indicateur fiable et efficace pour mesurer la salinité et évaluer son impact potentiel sur les cultures. Une salinité en excès, conduit à la réduction l'activité osmotique des plantes, perturbant ainsi l'absorption de nutriments du sol et d'eau.

- $CE < 250 \mu\text{S/cm}$ **Classe 1** : Eau caractérisé par une salinité faible peut être employée pour irriguer la majorité des plantes et sur la plupart des sols.
- $250 < CE < 750$ **Classe 2** : Eau contenant une moyenne salinité, peut être utilisée avec un lessivage modéré ;
- $750 < CE < 2250$ **Classe 3** : Eau caractérisée par une grande salinité, ne peut pas être employée pour l'arrosage des plantes au sein des sols peu drainés, même lorsque le lessivage est adéquat ;
- $2250 < CE < 5000$ **Classe 4** : Eau présentant une très grande salinité n'est pas adaptée à l'arrosage dans des conditions normales.

Tableau n°23 : Qualité des eaux d'irrigation selon la conductivité (CE)

Classe	Valeur de la CE	Qualité de l'eau	Pourcentage des eaux
C4	$2250 < CE < 5000$ $\mu\text{S/cm}$	Eau à très grande salinité. Elle n'est pas adaptée pour irriguer dans des conditions normales.	100% CT
			100% CI

Le classement des eaux d'irrigation selon la conductivité résulte que la totalité de ces eaux se situent dans la dernière classe C4 qui se caractérise par une très forte salinité. La conductivité varie entre 4136 à 6520 $\mu\text{S/cm}$ Pour l'eau Mio-pliocène et varie de 2330 à 3840 $\mu\text{S/cm}$ pour celles l'albiennes (tableau n°23).

L'utilisation incontrôlée des eaux avec un niveau de salinité trop élevé à l'irrigation peut engendrer des conséquences néfastes sur la structure des sols, et sur la plante par la réduction de sa capacité à absorber l'eau ce qui conduit à entraîner une diminution des rendements, le flétrissement et la brûlure des feuilles et d'autres symptômes. Pour cela, ces eaux ne sont pas adaptées à irriguer dans des conditions normales. Alors que l'amélioration de la qualité de ces eaux salines devient une nécessité afin d'éviter ces dangereuses conséquences, des rééquilibrages de concentration des éléments peuvent être envisagés dans les ouvrages de stockage et de distribution.

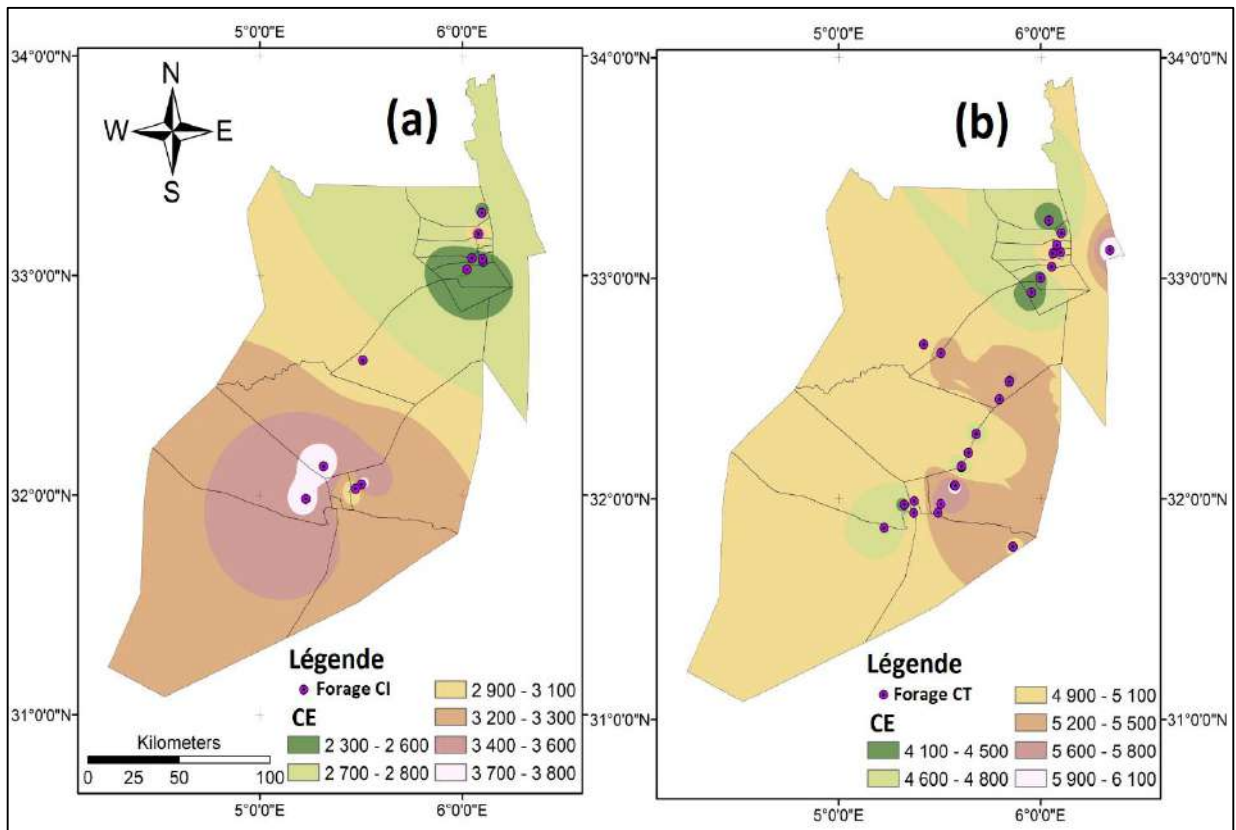


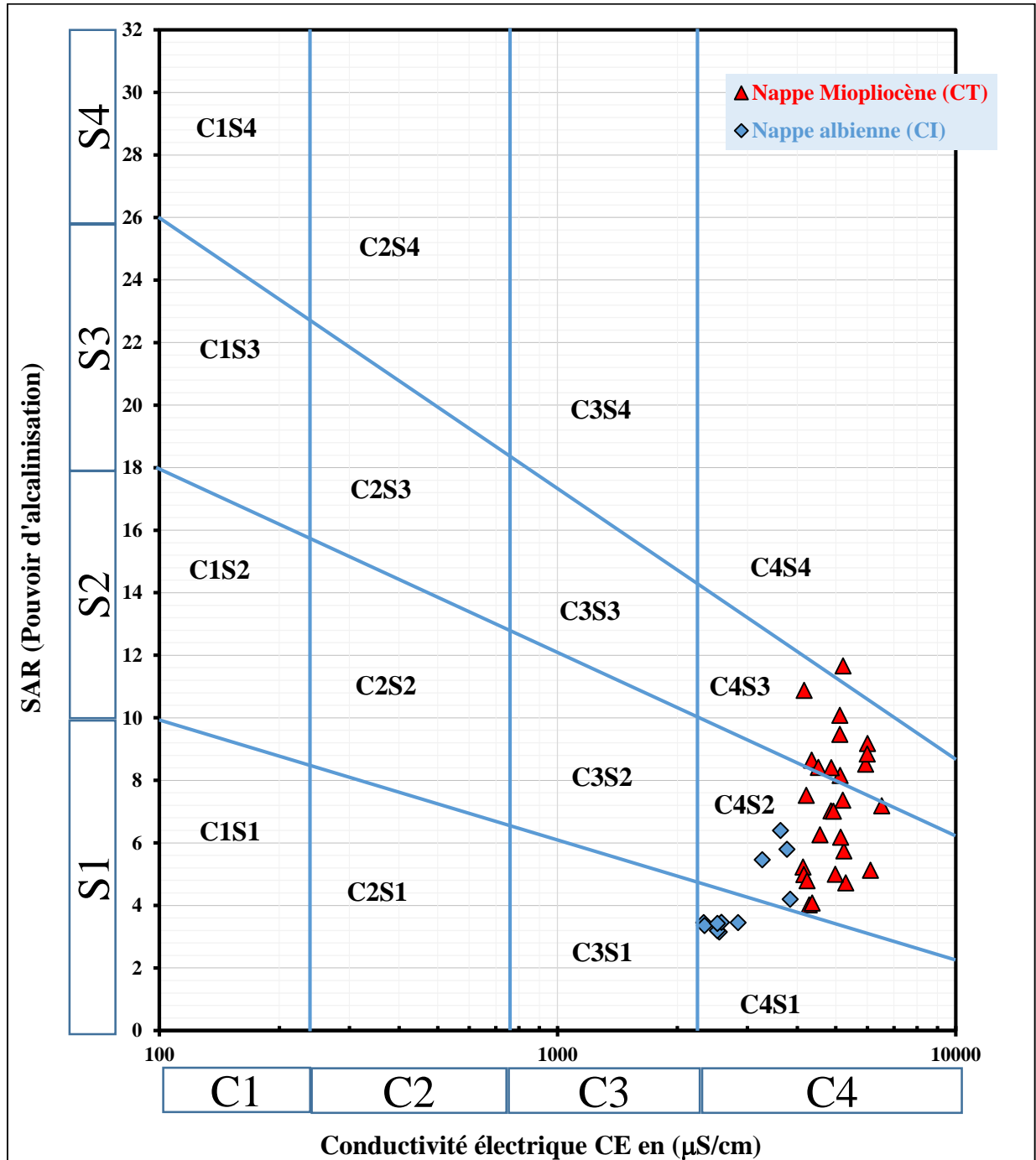
Figure n°21 : La répartition spatiale de la conductivité électrique CE des eaux d'irrigation.
(a) eau albienne (CI) ; (b) eau Mio-pliocène (CT).

c) Evolution de la conductivité par rapport au SAR

On prend en considération de l'évolution de la conductivité par rapport au SAR selon le diagramme de log Wilcox (Graphique n°51), les eaux étudiées appartiennent à quatre classes : C4S1 ; C4S2 ; C4S3 et C4S4. Ces eaux se caractérisent par une mauvaise qualité pour irriguer la majorité des espèces cultivées, il faut procéder à un lessivage intensif et cultiver des espèces ont une forte tolérance. Dans le cas contraire, l'eau est considérée comme inutilisable en raison de son fort risque sur les sols peu drainés et de son potentiel de danger pour la majorité des cultures.

Tableau n°24: Qualité des eaux d'irrigation selon le couplement SAR et CE

Classe	Pourcentage des eaux	Qualité de l'eau
C4S1	63,64% CI	Eau médiocre Eau fortement minéralisée adaptée à l'irrigation de cultures spécifiques qui présentent une bonne tolérance au sel, et ce, sur des sols bien drainés et lessivés.
C4S2	36,36 % CI 40,75 % CT	
C4S3	55,55 % CT	
C4S4	3,70% CT	



Graphique n°51: Evolution de la conductivité par rapport au pouvoir alcalinisant (SAR) selon le diagramme de log Wilcox

Les rendements agricoles sont généralement faibles dans les terres irriguées avec des eaux appartenant à la catégorie douteuse à impropre. Cela est probablement dû à la présence de sels de sodium en excès, qui provoquent des effets osmotiques sur le système sol-plante. Lorsque la concentration de sodium est élevée dans l'eau d'irrigation, les ions sodium ont tendance à être adsorbés par les particules d'argile, déplacement des ions Mg et Ca par un processus d'échange de bases. Ce processus d'échange de Na dans l'eau contre Ca et Mg dans le sol réduit la

perméabilité et aboutit finalement à un sol avec un mauvais drainage interne. Par conséquent, l'air et l'eau circulant est limitée dans des conditions humides, et ces sols sont généralement durs lorsqu'ils sont secs (Collins et Jenkins 1996).

d) Pourcentage de magnésium (%Mg) :

Le pourcentage de magnésium, ou le risque associé au magnésium, représente la mesure de l'impact du magnésium présent dans l'eau d'irrigation. Un surplus de magnésium peut compromettre la qualité des sols, entraînant ainsi une baisse du rendement des cultures. Le %Mg est calculé comme suit (Ayers et Westcot 1985) :

$$\%Mg = \left(\frac{Mg^{2+}}{(Ca^{2+} + Mg^{2+})} \right) \times 100 \quad (19)$$

Les concentrations en milliéquivalent par litre.

- Si %Mg < 50 : l'eau est bonne pour l'irrigation ;
- Si %Mg > 50 : l'eau est mauvaise pour l'irrigation.

Tableau n°25: Qualité des eaux d'irrigation selon l'indice (%Mg)

Classe	% Mg	Qualité de l'eau	Pourcentage des eaux
C1	Mg < 50%	l'eau est bonne pour l'irrigation	62,96% CT
			90,91 CI
C2	Mg > 50%	l'eau est mauvaise pour l'irrigation	37,04% CT
			9,09 % CI

Secteurs de qualité



A travers le calcul des pourcentages de magnésium, on constate que les bonnes eaux dominent les mauvaises eaux où les Mio-pliocènes représentent une proportion qui dépasse 60%, cette valeur augmente jusqu'à elle atteint 90 % dans l'eau albienne. A l'autre côté dans la deuxième classe les eaux de mauvaise qualité représente un pourcentage de 37 %, où ce pourcentage diminue au sein des eaux albiennes jusqu'à il atteint un minimum de 9,09% (Tableau n°24).

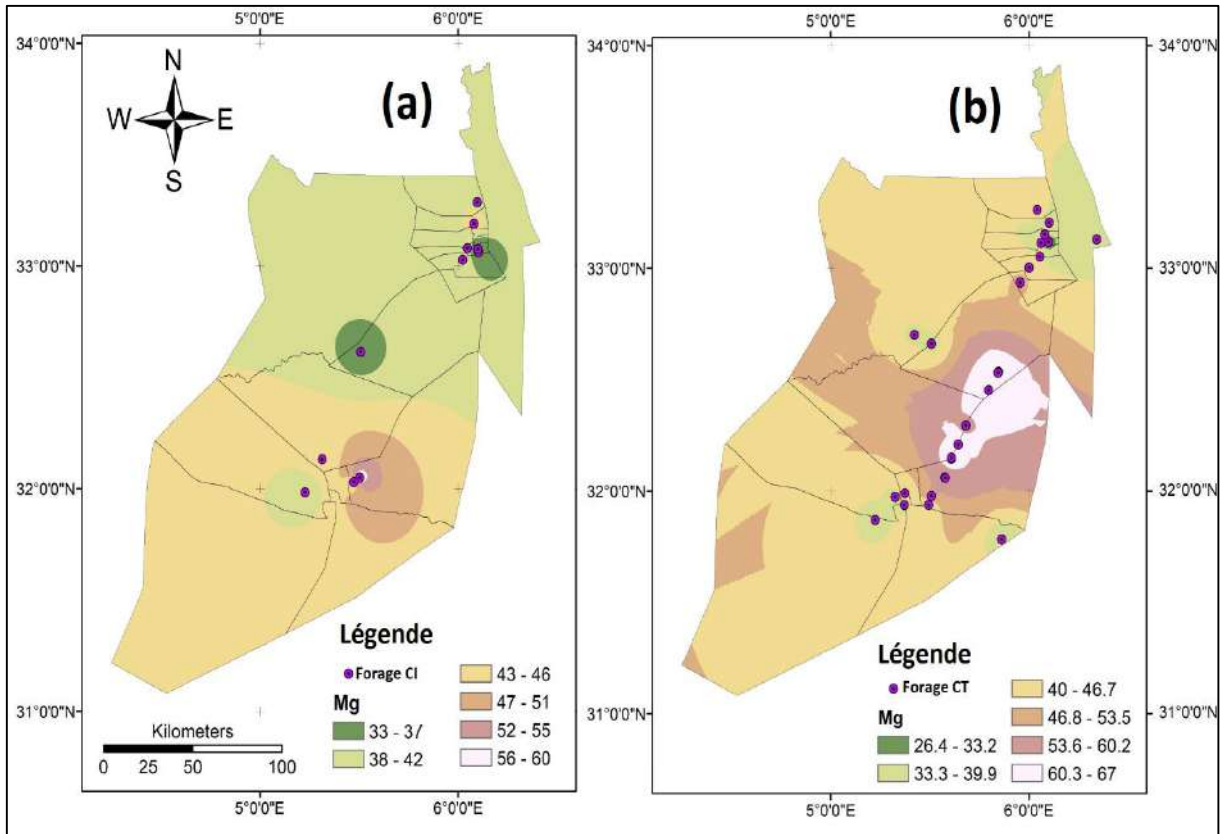


Figure n°22: La répartition spatiale du pourcentage en magnésium (%Mg) des eaux d'irrigation. (a) eau albienne (CI) ; (b) eau Mio-pliocène (CT).

e) Pourcentage en sodium (%Na) :

Le cation du sodium est crucial, mais son excès au-delà de la structure du sol peut entraîner des détériorations et diminuer le rendement des cultures (Janardhana Raju, Ram et al. 2009). En cas de concentration élevée de Na^+ dans l'eau d'irrigation, le sodium a tendance à être absorbé par les particules d'argile, étant remplacé par les ions Mg^{2+} et Ca^{2+} . Ce processus d'échange de Na^+ dans l'eau par Mg^{2+} et Ca^{2+} dans le sol réduit la perméabilité du sol (Kelly 1957) (Vasanthavigar, Srinivasamoorthy et al. 2010). C'est la raison pour laquelle le taux de sodium est considéré comme un indicateur crucial lors de l'évaluation de l'eau destinée à l'irrigation (Ncibi, Gaaloul et al. 2016). Le %Na est calculé selon la formule ci-dessous :

$$\%Na = \left(\frac{(\text{Na}^+ + \text{K}^+)}{(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{K}^+)} \right) \times 100 \quad (20)$$

Les concentrations en milliéquivalent par litre.

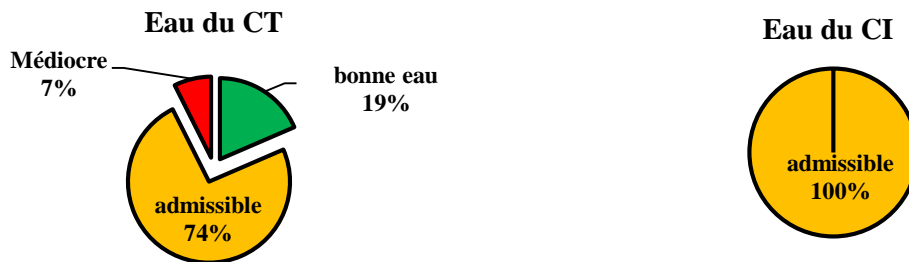
- Si %Na < 20 l'eau d'irrigation est de très bonne qualité ;
- Si 20 < %Na < 40 l'eau d'irrigation est de bonne qualité ;
- Si 40 < %Na < 60 l'eau est admissible pour l'irrigation ;

- Si $60 < \%Na < 80$ l'eau d'irrigation est médiocre ;
- Si $\%Na > 80$ l'eau est de mauvaise qualité pour l'irrigation.

Tableau n°26: Qualité des eaux d'irrigation selon le pourcentage en sodium (%Na)

Classe	% Na	Qualité de l'eau	Pourcentage des eaux
C2	$20 < \%Na < 40$	L'eau est bonne pour l'irrigation	18,52% CT
C3	$40 < \%Na < 60$	L'eau est admissible pour l'irrigation.	74,07% CT 100% CI
C4	$60 < \%Na < 80$	L'eau d'irrigation est médiocre.	7,41% CT

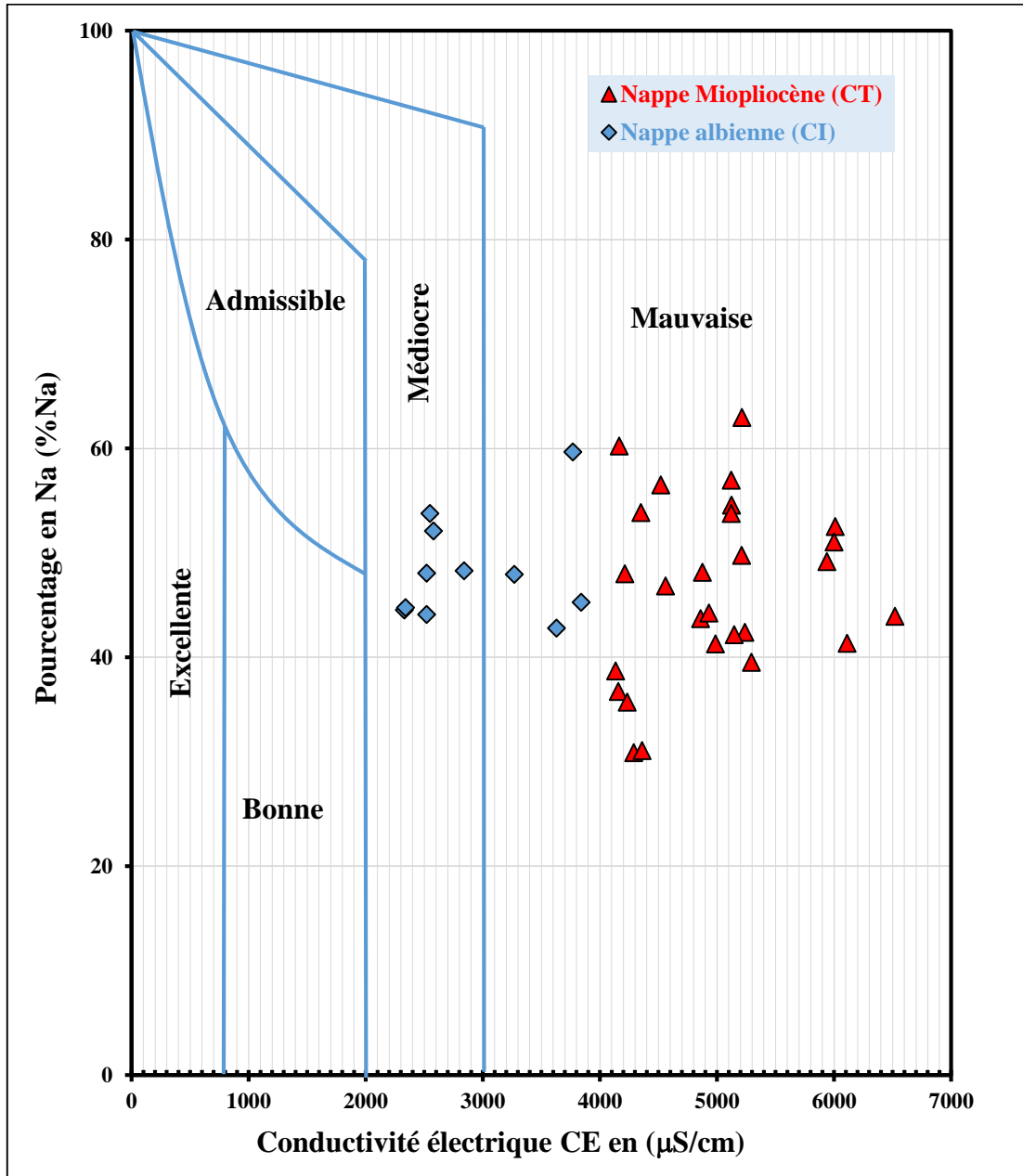
Secteurs de qualité



On constate que les eaux admissibles à l'irrigation dominent les bonnes eaux et les eaux médiocres, selon les pourcentages de Na des eaux d'irrigation, où les eaux Mio-pliocènes admissibles représentent une proportion qui dépasse 70%, cette valeur augmente jusqu'elle atteint 100 % dans l'eau albienne. A l'autre côté dans la deuxième classe (C2) les eaux de bonne qualité, représentent 18,52 % pour les eaux Mio-pliocènes (CT). La quatrième classe (C4) les eaux de médiocre qualité représente un pourcentage de 7,41 % (Tableau n°25).

f) Evolution de la conductivité par rapport au %Na

Il est important d'évaluer l'eau d'irrigation fondée sur le sodium échangeable, puisque si le sodium combiné avec le carbonate ou du chlorure peut endommager la qualité du sol (Varol et Davraz 2014). Selon le diagramme de Wilcox (Graphique n°52) qui prend en considération de l'évolution de la conductivité par rapport au pourcentage de sodium (%Na), la totalité des eaux d'irrigation Miopliocènes appartiennent dans la classe de la mauvaise qualité (%Na varie entre 30% à 62%) et (La CE varie entre 4200 à 6480 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Les eaux de la nappe albienne se situent dans deux classes, la première classe de qualité médiocre regroupe sept forage qui sont (F28 ; F30 ; F33 ; F34 ; F36 ; F37 et F38). Le reste quatre forages (F29 ; F31 ; F32 et F35) se trouvent dans la classe de mauvaise qualité.



Graphique n°52: Evolution de la conductivité par rapport au pourcentage de Na (%Na) selon le diagramme de Wilcox

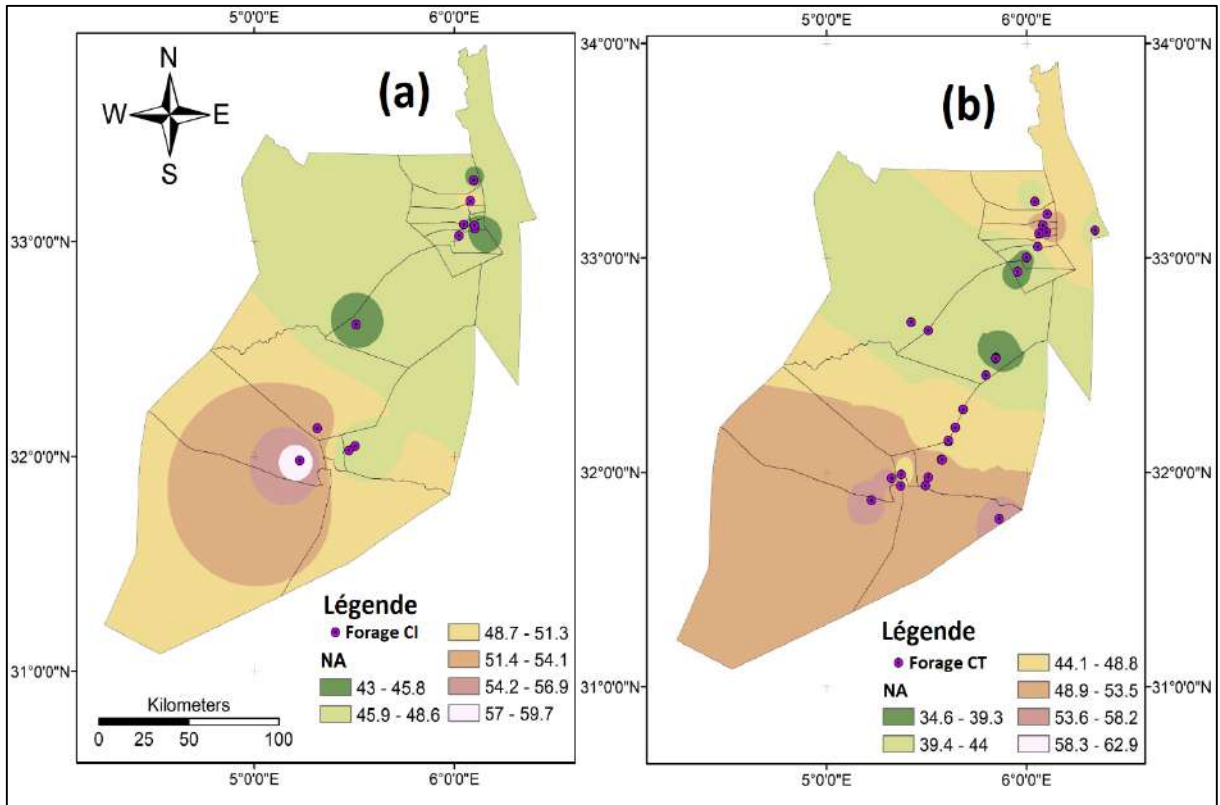


Figure n°23 : La répartition spatiale du pourcentage en sodium (%Na) des eaux d'irrigation.
(a) eau albienne (CI) ; (b) eau Mio-pliocène (CT).

g) Indice de perméabilité (IP) :

Les eaux d'irrigation peuvent être classées en fonction de l'indice de perméabilité (PI) (Doneen 1964). L'utilisation à long terme de l'eau d'irrigation peut altérer la perméabilité du sol, étant influencée par les niveaux de sodium, de calcium, de magnésium et de bicarbonate dans le sol (Reddy 2013). L'indice de perméabilité est donné par l'équation suivante (Doneen 1964):

$$IP = \left(\frac{(Na^+ + \sqrt{HCO_3^-})}{(Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+)} \right) \times 100 \quad (21)$$

Les concentrations en milliéquivalent par litre.

- Si $IP > 75\%$: L'eau est appropriée (bonne) pour l'irrigation ;
- Si $25\% < IP < 75\%$: L'eau est considérée comme admissible sous certaines conditions pour son utilisation. ;
- Si $IP < 25\%$: L'eau n'est plus adaptée à l'utilisation (utilisable).

Tableau n°27: Qualité des eaux d'irrigation selon l'indice de perméabilité (IP)

Classe	IP	Qualité de l'eau	Pourcentage des eaux
C2	$25\% < IP < 75\%$	L'eau est considérée comme	100% CT
		admissible sous certaines conditions pour son utilisation	100 % CI

La classification selon les valeurs d'IP donne lieu une classe, c'est la classe (C2) ces eaux utilisées dans l'agriculture dans la région de Ouargla son indice de perméabilité varie de 32,75 à 64,43%. Pour les eaux de CT, et comprise entre 45,68 et 63,79% pour les eaux albiennes (tableau n°27).

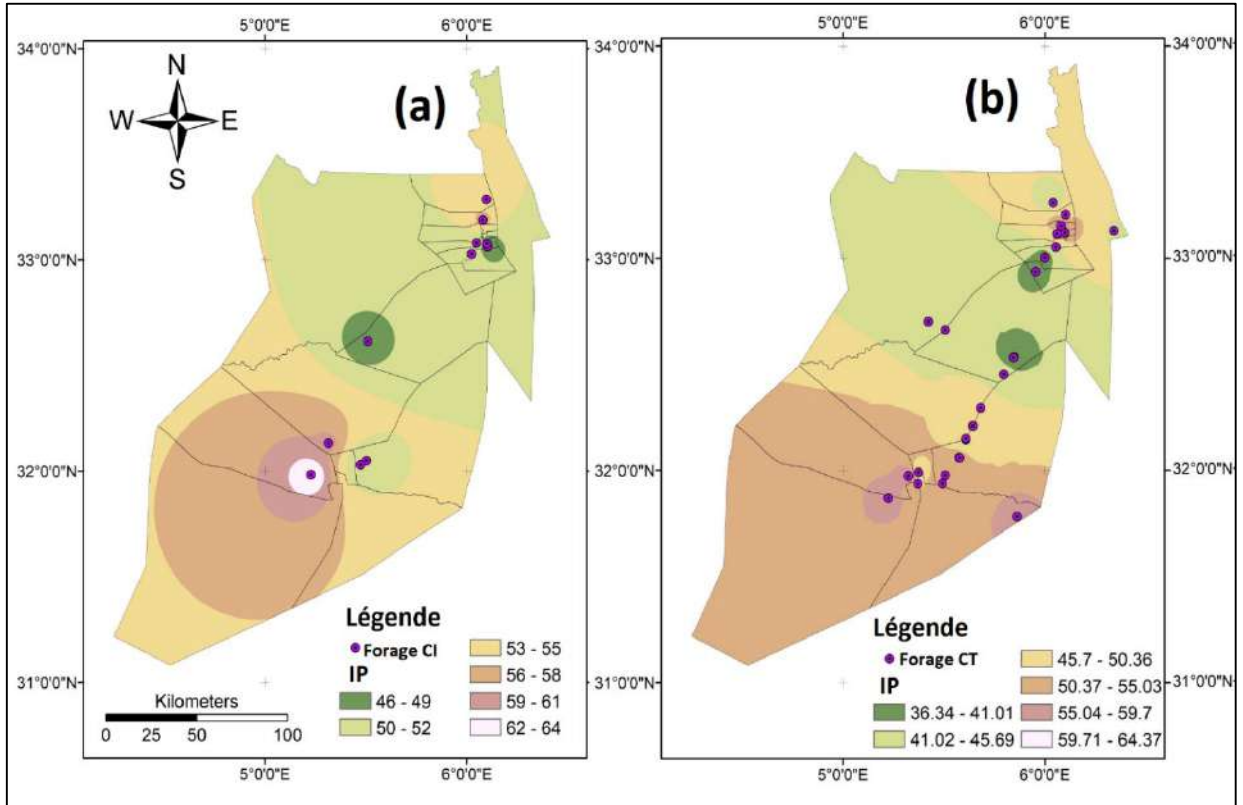


Figure 24: La répartition spatiale de l'indice de perméabilité (IP) (%Na) des eaux d'irrigation. (a) eau albiennes (CI) ; (b) eau Mio-pliocène (CT).

h) Rapport de Kelly (KR)

L'indice KR est défini comme le rapport entre les teneurs de Na^+ et la somme de Ca^{2+} et Mg^{2+} . Il sert de fondement pour évaluer l'aptitude des eaux à des fins d'arrosage. (Grattan 2002). Une concentration élevée en Na^+ dans l'eau d'arrosage est jugée inadéquate pour son utilisation (Kumar 2013). Cet indice est donné par la relation :

$$\text{KR} = \frac{\text{Na}^+}{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}} \quad (22)$$

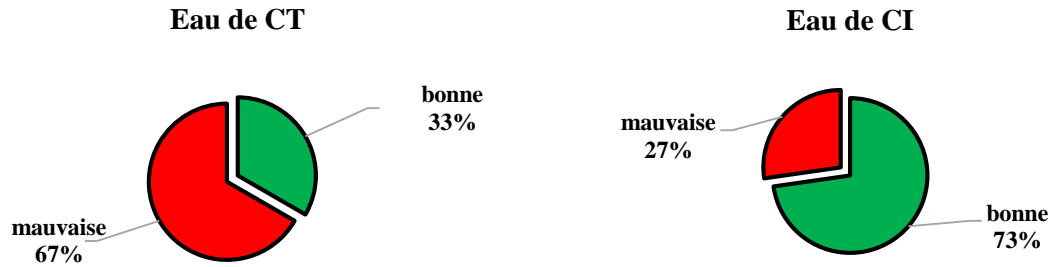
Les concentrations en milliequivalent par litre.

- Si $\text{KR} > 1$: l'eau est mauvaise pour l'irrigation ;
- Si $\text{KR} < 1$: l'eau est bonne pour l'irrigation.

Tableau n°28: Qualité des eaux d'irrigation selon l'indice de rapport de Kelly (KR)

Classe	KR	Qualité de l'eau	Pourcentage des eaux
C1	$KR > 1$	L'eau est mauvaise pour l'irrigation ;	33,33% CT 27,27 CI
C2	$KR < 1$	L'eau est bonne pour l'irrigation.	66,67% CT 72,73 % CI

Secteurs de qualité



Les résultats de calcul de RK pour les eaux Mio-pliocènes présentent des valeurs variant de 0,44 à 1,68 méq/L, avec une moyenne de 0,90 méq/L, pour les eaux albiennes elles sont comprises entre 0,71 et 1,40 méq/L, avec une moyenne de 0,91 méq/L (tableaux n°28). Les eaux souterraines de la zone d'étude appartiennent aux deux classes des eaux de bonnes et mauvaise qualités pour l'irrigation.

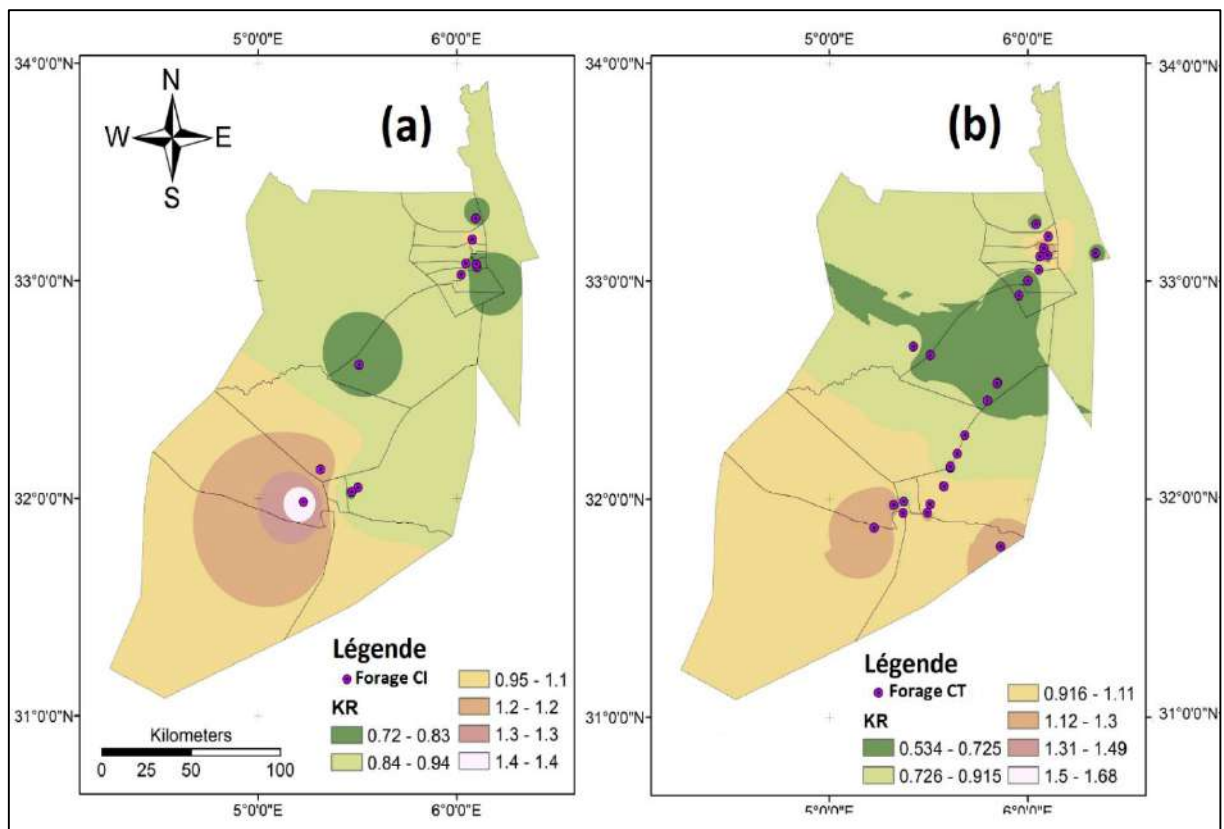


Figure n° 25: La répartition spatiale du Rapport de Kelly (KR) des eaux d'irrigation. (a) eau albiennne (CI) ; (b) eau Mio-pliocène (CT).

i) Salinité potentielle (SP) :

La salinité du sol est formée par l'ensemble des sels, notamment les chlorures de sodium et les sulfates de magnésium. Par conséquent, la salinité potentielle (SP) pourrait être estimée en prenant en compte les deux éléments (Cl^- et SO_4^{2-}) (Doneen 1961).

$$PS = Cl^- + \sqrt{SO_4^{2-}} \quad (23)$$

Cl^- et SO_4^{2-} sont exprimés en méq/l

- Si $SP < 5$ Classe 1 : Eau excellent à bonne pour l'irrigation ;
- Si $5 < SP < 10$ Classe 2 : Eau bonne à médiocre ;
- Si $SP > 10$ Classe 3 : Eau médiocre à mauvaise.

Tableau n°29: Qualité des eaux d'irrigation selon l'indice de salinité potentielle (SP)

Classe	IP	Qualité de l'eau	Pourcentage des eaux
C3	SP > 10 méq/l	Eau médiocre à mauvaise pour l'irrigation	100% CT 100 % CI

La classification selon les valeurs de la salinité potentielle résulte que les eaux de la région d'étude se situent dans la dernière classe, c'est la classe (C3) où ces eaux se caractérisent par une mauvaise qualité, l'indice de SP est varié de 18,10 à 61,35 méq/l, pour les eaux de CT, et comprise entre 13,16 et 21,44 méq/l pour celles albiennes (tableau n°29).

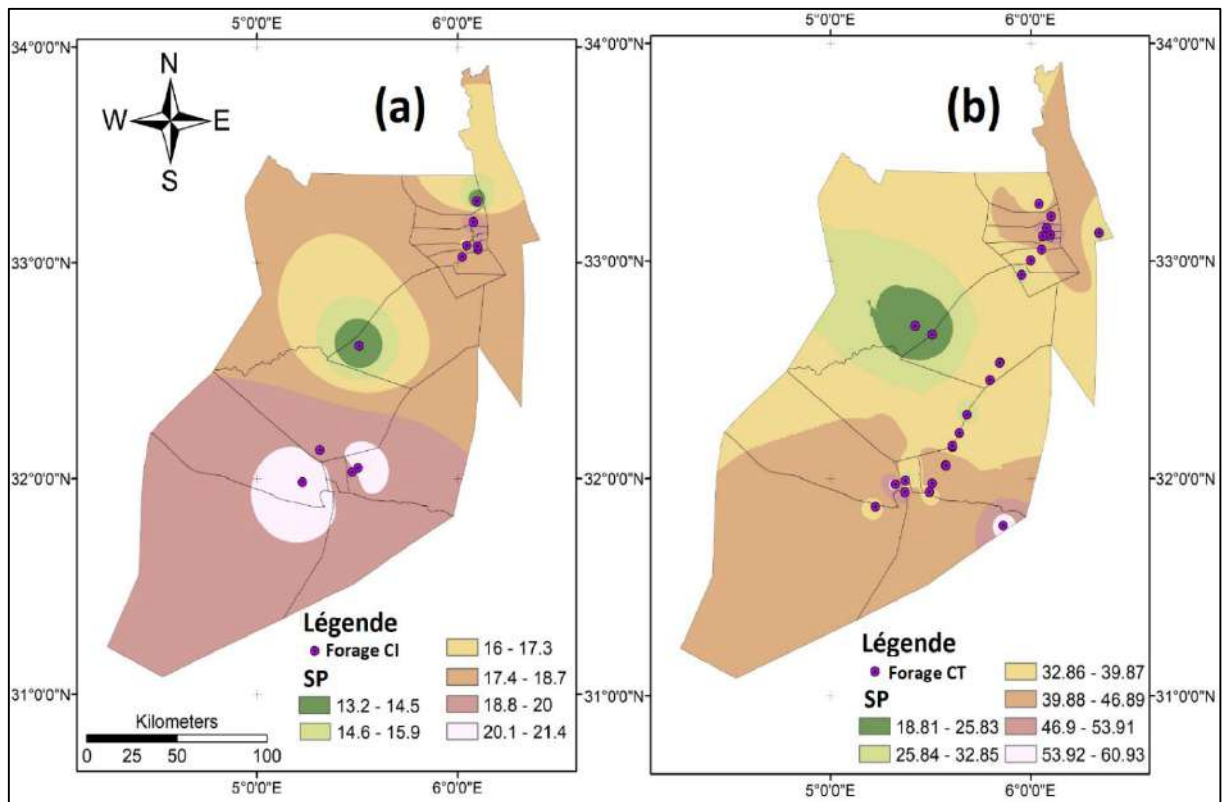


Figure n°26: La répartition spatiale de la salinité potentielle (SP) des eaux d'irrigation.
(a) eau albiennne (CI) ; (b) eau Mio-pliocène (CT).

j) **Carbonate de sodium résiduel (RSC) :**

L'excès de la somme de carbonate et de bicarbonate par rapport à la somme de calcium et de magnésium dans l'eau souterraine influence également l'inaptitude de cette eau à des fins d'irrigation. Ce phénomène est désigné par le terme d'Alcalinité Résiduelle des Eaux (RSC) (Janardhana Raju, Ram et al. 2009) (Ncibi, Gaaloul et al. 2016). Le RSC est calculé en utilisant la formule donnée ci-dessous :

$$RSC = [(HCO_3^- + CO_3^{2-}) - (Ca^{2+} + Mg^{2+})] \quad (24)$$

Les concentrations en milliéquivalent par litre.

- Si $RSC < 1,25$ le risque est nul ;
- Si $1,25 < RSC < 2,5$ le risque est modéré ;
- Si $RSC > 2,5$ le risque est sévère.

Tableau n°30: Qualité des eaux d'irrigation selon le carbonate de sodium résiduel (RSC)

Classe	RSC	Qualité de l'eau	Pourcentage des eaux
C1	RSC < 1,25 méq/l	Risque de l'alcalinité résiduel est nul	100% CT 100 % CI

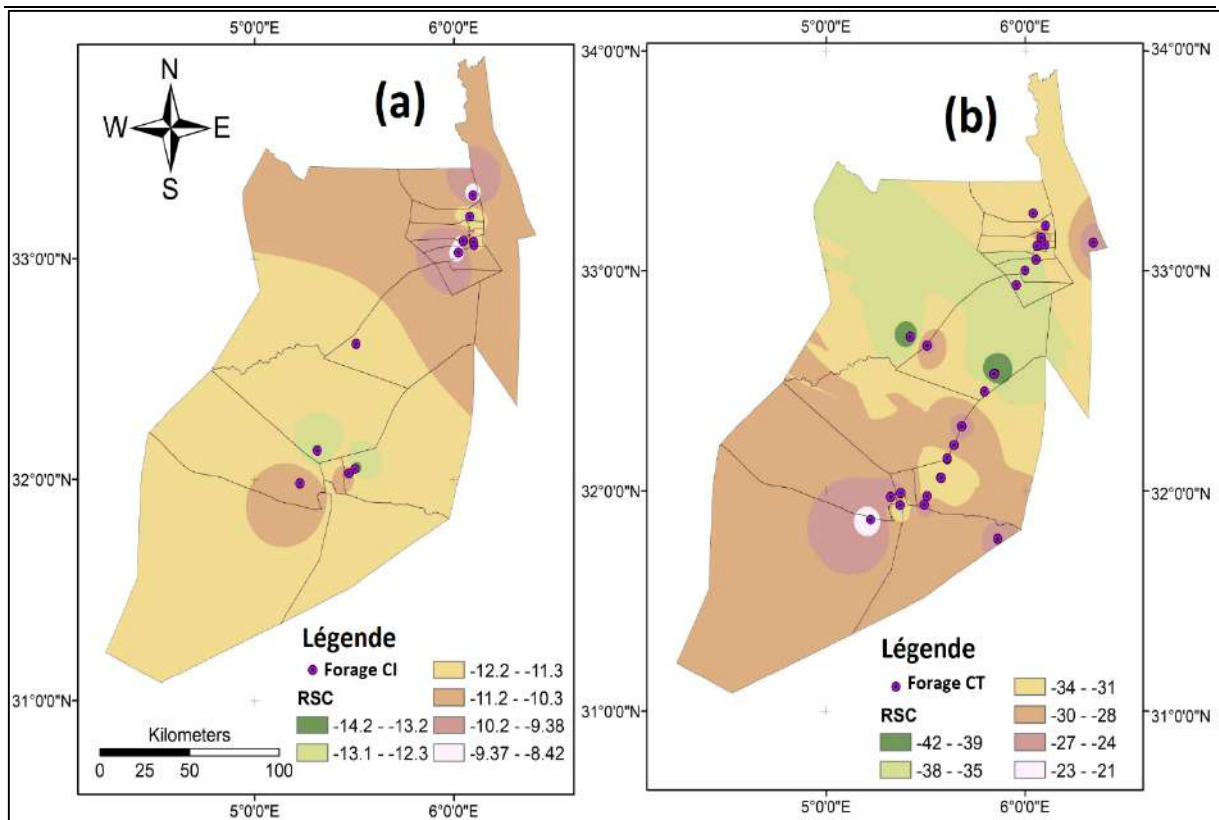


Figure n° 27: La répartition spatiale du carbonate de sodium résiduel (RSC) des eaux d'irrigation. (a) eau albienne (CI) ; (b) eau Mio-pliocène (CT).

Les résultats du calcul du carbonate de sodium résiduel montre que les eaux d'irrigation étudiées se situent dans la première classe, c'est la classe (C1) où le risque de l'alcalinité résiduel est nul, par ce que la concentration de calcium et de magnésium est largement plus grand par rapport celle-ci du carbonate et du bicarbonate. Dans ce cas ces eaux se caractérisent par une bonne qualité selon l'indice RSC, cet indice est varié de -8,39 à -42,07 méq/l, pour les eaux de CT, et comprise entre -8 et -14,25 méq/l pour les eaux de CI.

III.3. Evaluation globale de la qualité :

Cette évaluation est basée sur la quantification qualitatif globale de la classification individuelle pour les huit indice qui sont prennent en considération à cette étude, pour cela nous avons noté par le signe (+) pour les eaux d'irrigation admissibles ; bonnes et d'excellentes qualités, et par le signe (-) pour les eaux médiocres et de mauvaises qualités. Pour obtenir une classification globale nous avons proposé le brème suivant :

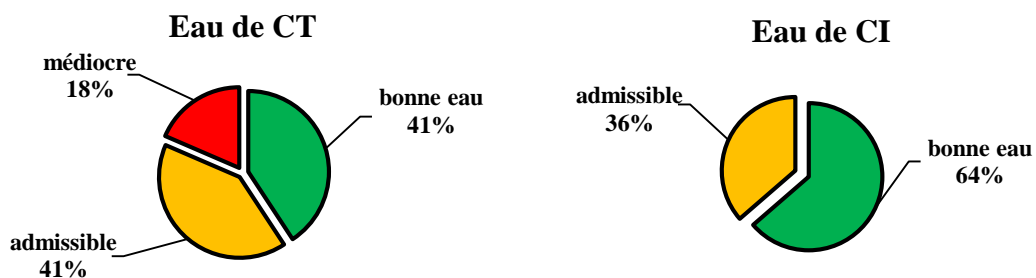
- Si $\sum (+) = 7$ l'eau a une excellente qualité ;
- Si $\sum (+) = 6$ l'eau a une bonne qualité
- Si $\sum (+) = 5$ l'eau est admissible à l'irrigation
- Si $\sum (+) = 4$ l'eau est médiocre pour l'irrigation
- Si $\sum (+) = 3$ l'eau a une mauvaise qualité pour l'irrigation

Tableau n°31. Evaluation qualitatif globale des eaux d'irrigation de la région de Ouargla

N° de forage	Classification individuelle								Classification globale
	SAR	Na	RSC	IP	Mg	KR	SP	CE	
Nappe de CT									
F1	+	+	+	+	-	+	-	-	Admissible
F2	+	+	+	+	-	+	-	-	Admissible
F3	+	+	+	+	-	+	-	-	Admissible
F4	+	+	+	+	+	+	-	-	Bonne
F5	+	+	+	+	+	+	-	-	Bonne
F6	+	+	+	+	-	-	-	-	Médiocre
F7	+	+	+	+	-	+	-	-	Admissible
F8	+	+	+	+	-	+	-	-	Admissible
F9	+	+	+	+	-	+	-	-	Admissible
F10	+	+	+	+	-	-	-	-	Médiocre
F11	+	+	+	+	+	+	-	-	Bonne
F12	+	+	+	+	+	-	-	-	Admissible
F13	+	+	+	+	-	+	-	-	Admissible
F14	+	+	+	+	-	-	-	-	Médiocre
F15	+	-	+	+	+	-	-	-	Médiocre
F16	+	+	+	+	+	-	-	-	Admissible
F17	+	+	+	+	+	+	-	-	Bonne
F18	+	+	+	+	+	-	-	-	Admissible
F19	+	+	+	+	+	-	-	-	Admissible
F20	+	+	+	+	+	+	-	-	Bonne

F21	+	+	+	+	+	+	-	-	Bonne
F22	+	-	+	+	+	-	-	-	Médiocre
F23	+	+	+	+	+	+	-	-	Bonne
F24	+	+	+	+	+	+	-	-	Bonne
F25	+	+	+	+	+	+	-	-	Bonne
F26	+	+	+	+	+	+	-	-	Bonne
F27	+	+	+	+	+	+	-	-	Bonne
Nappe de CI									
F1	+	+	+	+	+	+	-	-	Bonne
F2	+	+	+	+	-	+	-	-	Admissible
F3	+	+	+	+	+	+	-	-	Bonne
F4	+	+	+	+	+	-	-	-	Admissible
F5	+	+	+	+	+	-	-	-	Admissible
F6	+	+	+	+	+	+	-	-	Bonne
F7	+	+	+	+	+	+	-	-	Bonne
F8	+	+	+	+	+	+	-	-	Admissible
F9	+	+	+	+	+	+	-	-	Bonne
F10	+	+	+	+	+	+	-	-	Bonne
F11	+	+	+	+	+	+	-	-	Bonne

Secteur de la qualité globale



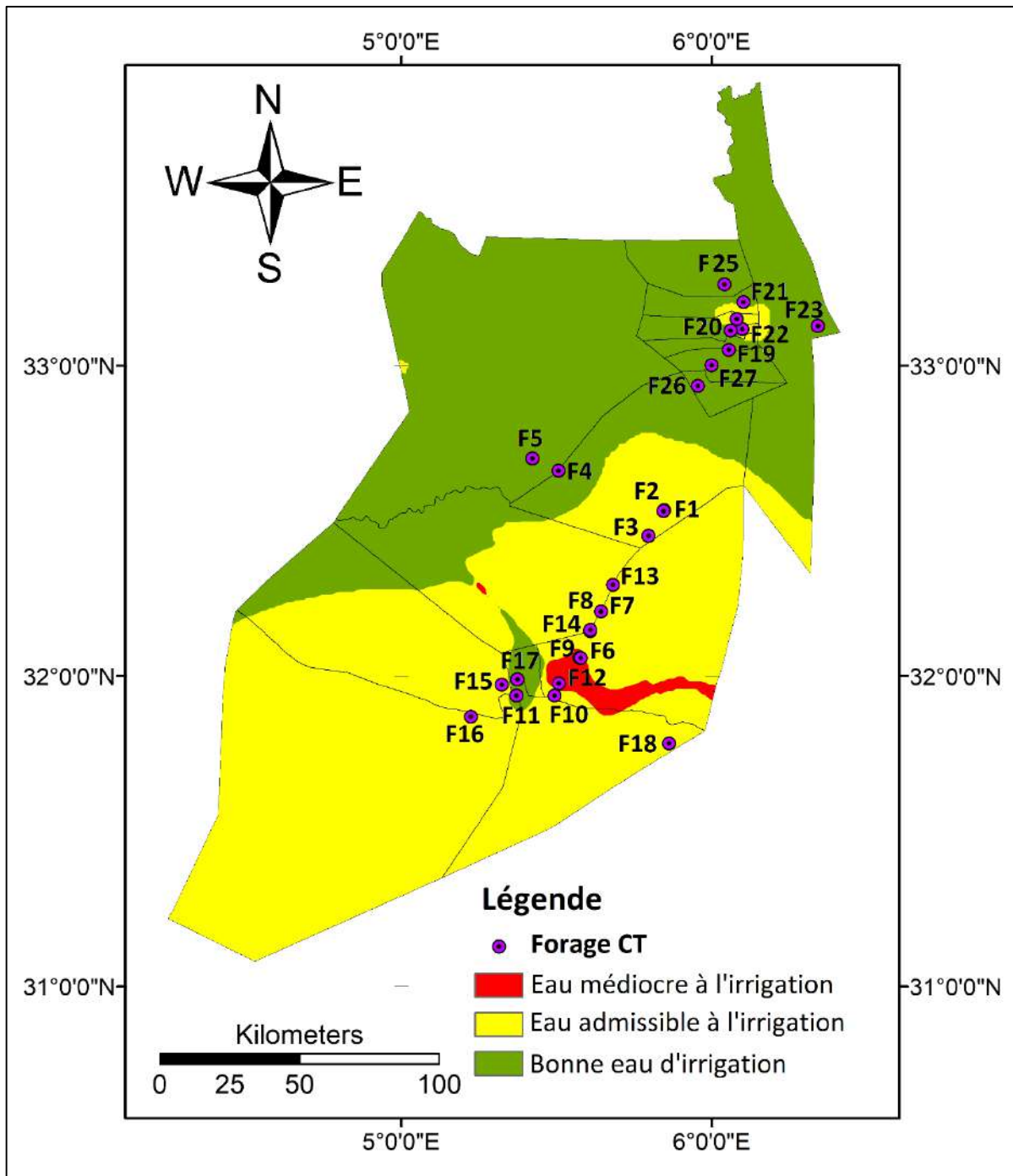


Figure n°28: La carte finale de la qualité de l'eau d'irrigation Mio-pliocène dans la région de Ouargla

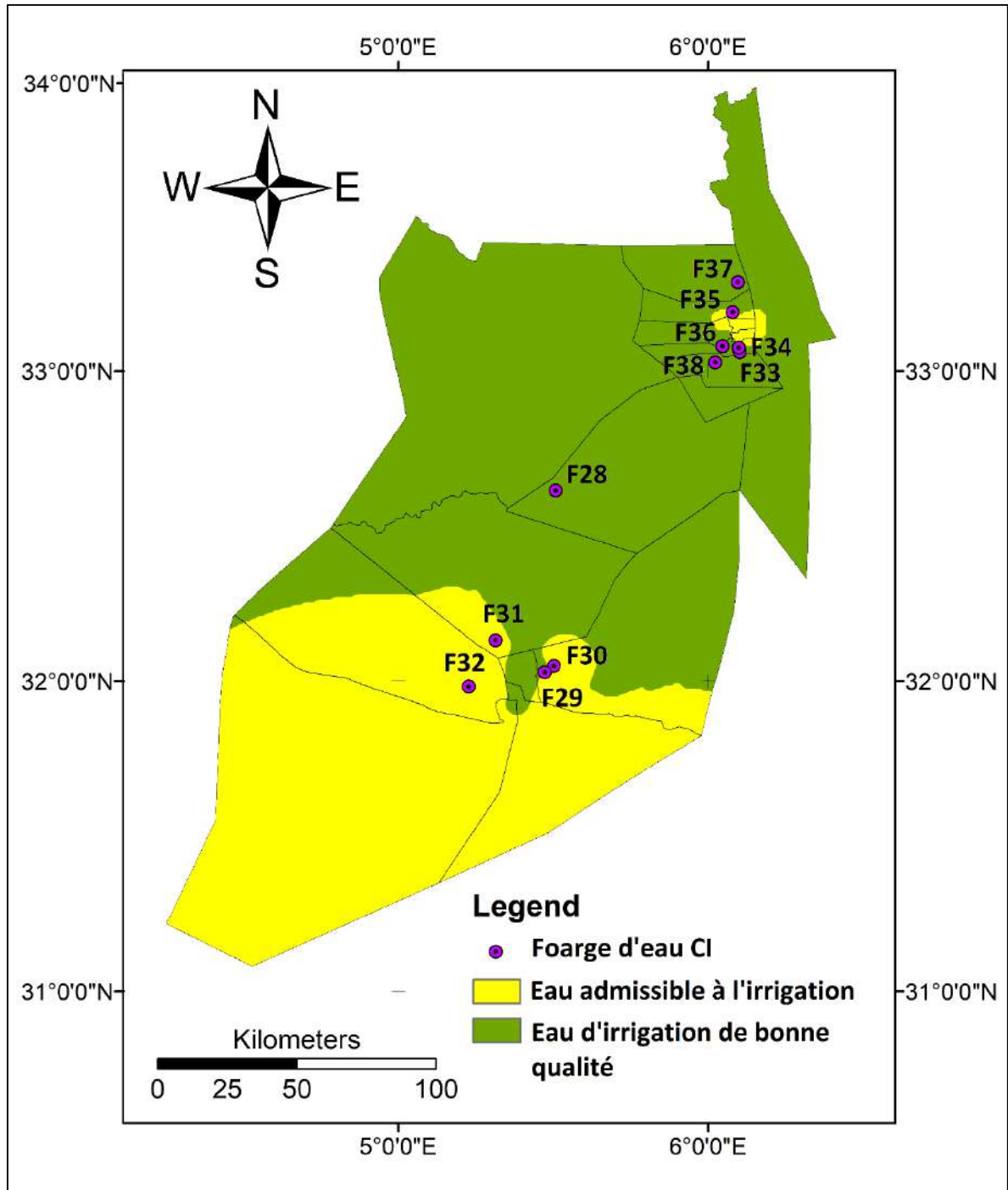


Figure n°29: La carte finale de la qualité de l'eau d'irrigation Albienne dans la région de Ouargla

III.4. Conclusion

Dans cette étude, nous avons essayé d'évaluer la qualité des eaux souterraines utilisées en irrigation dans la région de Ouargla en utilisant huit indices de qualité des eaux destinée à l'activité agricole dont le SP ; RSC ; CE ; %Mg ; %Na ; IP ; KR et SAR. En plus des critères, nous avons utilisé les diagrammes de Wilcox et de log Wilcox pour trouver la classification des eaux vis-à-vis au couplement entre la CE et le SAR et %Na.

Les résultats de la conductivité électrique (CE) montrent que les eaux pour les deux nappes étudiées, la nappe albienne (CI) et celle Miopliocène (CT), sont caractérisées par une très forte minéralisation et présentent un grand danger de salinisation et d'alcalinisation des sols, on peut dire que ces eaux ne conviennent pas à l'irrigation avec des conditions ordinaires. Ces eaux sont caractérisées aussi par une valeur maximale du taux d'absorption de sodium pour les deux nappes exploitées, qui dépasse 11 méq/l et une moyenne de 7,21 méq/l pour les eaux Miopliocène et une moyenne de 4,66 méq/l pour les eaux albienne. Selon cet indice la majorité échantillons sont situées dans la catégorie des excellentes eaux. Par contre quand on a lié le SAR avec la CE à l'aide du diagramme de log Wilcox, nous avons constaté que les eaux d'irrigation situées dans la classe des eaux médiocres (C4S1 ; C4S2 ; C4S3 et C4S4) pouvant convenir à l'irrigation de certaines cultures bien tolérantes aux sels et sur des sols bien drainés et lessivés.

Selon la valeur moyenne du rapport de Kelly, la majorité des valeurs sont inférieure à 1 ($RK < 1$) donc on peut dire que la majorité des eaux souterraines étudiées ont d'une excellente qualité pour l'agriculture. Selon le %Na, on distingue 70% d'eau de CT et 90% d'eau de CI sont admissibles à l'usage agricole. A travers le calcul des pourcentages de magnésium, on constate que les bonnes eaux dominent les mauvaises eaux où les Mio-pliocènes représentent une proportion qui dépasse 60%, cette valeur augmente jusqu'elle atteint 93 % dans l'eau albienne. A l'autre côté dans la deuxième classe les eaux de mauvaise qualité représente un pourcentage de 37,04%, où ce pourcentage diminue au sein des eaux albiennes jusqu'il atteint un minimum de 9,09%. Par contre quand on a lié le %Na avec la CE à l'aide du diagramme de Wilcox, nous avons remarqué que la totalité des eaux Miopliocènes se situent dans la catégorie de mauvaise qualité.

Le calcul de la salinité potentielle a montré que la totalité eaux étudiées se situent dans la dernière classe, c'est la classe (C3) où ces eaux se caractérisent par une mauvaise qualité,

l'indice SP est varié de 18,10 à 61,35 méq/l, pour les eaux de CT, et comprise entre 13,16 et 21,44 méq/l pour les eaux albiennes. L'indice de carbonate de sodium résiduel a montré que les eaux d'irrigation se situent dans la première classe (C1), où qu'il n'a aucun risque de l'alcalinité résiduel sur les sols irrigués. Dans ce cas ces eaux se caractérisent par une bonne qualité selon RSC.

Les deux modèles élaborés pour classer globalement les eaux de deux aquifères étudiés, à l'aide de systèmes d'information géographique (SIG), permettent l'identification et la localisation des risques potentiels associés à la qualité de l'eau d'arrosage à l'échelle régionale. Cela facilite la prise des actions préventives et correctives, soulignant la nécessité d'une gestion attentive des ressources agricoles au niveau de l'exploitation.

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

CONCLUSION GENERALE

L'objectif principal de cette étude prévoir la détermination de la qualité des eaux souterraines utilisées pour l'arrosage des cultures dans des nouveaux périmètres agricoles, en mettant la lumière de l'incidence de ces eaux sur la salinisation du sol et l'environnement dans la région de Ouargla. Pour atteindre ce but, un travail de prospection et d'échantillonnage et de collecte de données et d'analyse a été réalisé au niveau de la zone d'étude.

Ouargla, située dans une dépression faisant partie du Bas Sahara, s'inscrit dans un vaste bassin sédimentaire du Sahara septentrional. Cette région est creusée dans un dépôt détritique composé de terrains tertiaires (Mio-Pliocène) et de dépôts détritiques quaternaires. Dans ce contexte, les sables prédominent, avec une alternance d'argiles, de gypse et de calcaires.

Le climat dans la région d'étude se caractérise par une rare et irrégulière pluviométrie. En raison des défis tels que la sécheresse et le manque des sources d'eau de surface, ainsi qu'en raison de l'augmentation de la demande en eau, les agriculteurs à recourir aux d'autres sources comme le prélèvement des eaux souterraines pour satisfaire leurs besoins en irrigation. Bien que ces actions soient souvent considérées comme la solution la plus efficace pour augmenter la production agricole et de lutter contre la pauvreté en milieu rural et saharien.

La région compte deux importantes nappes aquifères exploitées à des fins agricoles, la nappe du Continental Intercalaire (CI) ou de l'Albien d'argile et de grès, et la nappe du Complexe Terminal (CT), comprenant le niveau aquifère du Mio-Pliocène, également connue sous le nom de nappe des sables. La lithologie de cette dernière est en continuité avec les sables fins gypseux du Quaternaire, abritant une nappe phréatique.

Dans cette étude on a vu que les eaux du Mio-pliocène ont un faciès hydrogéochimiques prédominant chloruré sodique, ces eaux sont en contact avec une lithologie riche en évaporites, présentent une très grande minéralisation, indiquée par des valeurs de conductivité électrique très élevées, généralement comprises entre 4,14 et 6,52 mS/cm. En ce qui concerne les eaux de l'Albien, le faciès dominants est le chloruré sodique, ces eaux présentent une minéralisation moins prononcée que celle des eaux de la nappe du Mio-Pliocène. Les valeurs enregistrées varient de 2,33 à 3,84 mS/cm.

La minéralisation très élevée des eaux de la nappe du Mio-Pliocène est due à la présence d'évaporites. La dissolution du chlorure de potassium et de l'halite présents dans les formations

évaporitiques entraîne une augmentation des concentrations en Na^+ , K^+ et Cl^- . Nous observons une corrélation significative $r(\text{K+Na} : \text{Cl}) = 0,85$, ce qui indique l'influence de la dissolution de l'halite. Les teneurs élevées en sodium et en sulfates entraîne la prédominance du faciès chloruré sodique. Cependant le retrait du calcium peut être expliqué par le processus de la précipitation des carbonates et des phosphates, cette diminution de leurs teneurs abaissée l'activité de ces deux élément ce qui conduit à l'émergence d'un faciès sulfaté sodique, peut-être par un échange de base.

L'étude granulométrique du sol indique la prédominance du sable, cette texture favorise la remontée capillaire des sels solubles pendant la saison chaude. Le sol étudié ne présente aucun risque de sodicité, car la prédominance du sable et la faible présence d'argile, écartent cette possibilité.

Le sol est légèrement alcalin, car la majorité des échantillons ont un pH inférieur à 8,2. Les résultats de la conductivité électrique du sol indiquent une minéralisation modérée. En général, la variation verticale de la conductivité démontre une présence significative de sels apportés par l'eau d'irrigation. Ainsi, la conductivité électrique est plus faible en profondeur qu'en surface, à l'exception des profils non irrigués où elle varie dans le sens opposé. Ces variations de la CE est en corrélation avec le SAR et l'ESP. Elle est liée à une diminution des concentrations en Ca^{2+} et Mg^{2+} au profit de Na^+ ainsi qu'à une augmentation du rapport $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ (bonne corrélation $R^2 = 0,78$). De plus, elle augmente avec la concentration de la solution saline, laquelle est elle-même influencée par la teneur en eau d'irrigation dans le sol. Le sel de chlorure est le plus dominant par rapport aux autres anions. En ce qui concerne les cations, le sodium présent la plus forte teneur.

Le mouvement du gypse se manifeste par la précipitation des eaux d'irrigation riches en sulfate et en calcium. Le gypse présente des teneurs faibles, avec des valeurs maximales observées dans les horizons supérieurs du sol. La présence de calcaire dans le sol est limitée en raison de la faible teneur en carbonates. À l'échelle de classification des sols, cette étude a démontré que le sol est classé dans la catégorie des sols non salins, en raison de l'efficacité de l'auto-lessivage et de la profonde nappe phréatique. Cependant, des valeurs élevées de conductivité électrique (CE) ont été observées, indiquant que ces sols pourraient devenir salins à long terme.

L'étude de la classification signifie que ces eaux ne sont pas adaptées à l'irrigation dans des conditions normales. En d'autres termes, les caractéristiques de ces eaux ne sont pas appropriées ou idéales pour une utilisation régulière dans le processus d'irrigation. Cela peut être dû à divers facteurs tels que la composition chimique inappropriée, un niveau de salinité élevé, ou d'autres propriétés qui pourraient être préjudiciables à la croissance des cultures. En conséquence, il serait recommandé de trouver des sources d'eau plus appropriées ou d'appliquer des traitements spécifiques pour rendre ces eaux adaptées à l'irrigation.

RECOMMANDATIONS

La lutte contre la salinité des sols agricoles dans notre région est un défi important, car un niveau élevé de sel dans le sol apporté par les eaux d'irrigation peut affecter négativement la croissance des cultures. On pose quelques recommandations généralisées pour lutter contre la salinité des terres agricoles :

- Dans les zones où il existe une nappe phréatique salée le drainage adéquat et efficace assure une élimination de l'excès d'eau salée, et permet de prévenir l'accumulation de sels dans le sol.
- La mise en œuvre d'une irrigation de manière mesurée et contrôlée est recommandée afin d'éviter tout excès d'utilisation d'eau, qui pourrait entraîner une accumulation de sels dans le sol.
- Il est recommandé d'utiliser des sources d'eau de qualité présentant une faible teneur en sel pour l'irrigation.
- L'amélioration du sol peut être réalisée par l'ajout d'amendements organiques, tels que des matières organiques. Ces éléments contribuent à améliorer la structure du sol, favorisent la rétention d'eau, et peuvent jouer un rôle dans la neutralisation des effets des sels.
- L'application d'une technique de lessivage consiste à irriguer le sol avec des quantités importantes d'eau afin d'éliminer les sels accumulés. Il est crucial que l'eau de lessivage s'écoule correctement, sans causer d'autres problèmes environnementaux.
- La sélection de cultures résistantes, qui démontrent une plus grande tolérance à la salinité, peut être une stratégie bénéfique. Certaines plantes présentent une capacité accrue à prospérer dans des conditions salines, ce qui peut favoriser leur implantation réussie dans de tels environnements.

- L'application de gypse peut aider à améliorer la structure du sol et favoriser l'élimination des ions sodium responsables de la salinité.
- Il est essentiel de surveiller régulièrement la salinité du sol afin de pouvoir prendre rapidement des mesures correctives lorsque cela s'avère nécessaire.
- La rotation des cultures, en alternant les types de plantes cultivées, est une pratique qui peut aider à diversifier les cultures et ainsi prévenir l'accumulation de sels spécifiques dans le sol.
- L'adoption d'une approche de gestion intégrée, qui combine différentes stratégies en fonction des conditions spécifiques de la zone, est recommandée pour lutter contre la salinité des terres agricoles.

À la lumière des résultats obtenus, cette étude pourrait représenter une contribution significative pour mettre en lumière les processus liés aux interactions entre l'eau d'irrigation et le sol irrigué dans les régions du Sahara septentrional. Il serait bénéfique de compléter cette étude par des travaux supplémentaires axés particulièrement sur la surveillance de la salinisation des périmètres irrigués, dans le but de les protéger et de les améliorer.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

Al-Droubi, Abdullah. 1976. Géochimie des sels et des solutions concentrées par évaporation. Modèle thermodynamique de simulation. Application aux sols salés du Tchad (Persée-Portail des revues scientifiques en SHS).

Aliev, M. 1972. "Structures géologiques et perspectives en pétrole et en gaz au Sahara Algérien (Tome 1)." In.: Alger.

Allison, LE, Richards, Lorenzo Adolph. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils (Soil and Water Conservative Research Branch, Agricultural Research Service).

Appelo, CAJ, and D J Leiden Postma, the Netherlands. 1993. 'Geochemistry, groundwater and pollution AA Balkema Publishers'.

Aranyossy, JF, and A Mamou. 1985. 'Apport des techniques nucléaires à l'étude des aquifères du Sud tunisien', IAEA. Vienne, RAF/8/007 : 51p.

Aubert, Georges. 1976. 'Les sols sodiques en Afrique du Nord'.

Aubert, Guy. 1978. Méthodes d'analyses des sols (Centre national de documentation pédagogique, Centre régional de documentation pédagogique de Marseille).

Ayers, Robert S, and Dennis W Westcot. 1985. Water quality for agriculture (Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome).

Bagnouls, Fr, and Henri Gaussen. 1957. "Les climats biologiques et leur classification." In Annales de géographie, 193-220. JSTOR.

Barbouchi, Meriem, Rachid Lhissou, Karem Chokmani, Riadh Abdelfattah, Abderrazak El Harti, and Nadhira Ben Aissa. 2013. 'Caractérisation de la salinité des sols à l'aide de l'imagerie radar satellitaire : cas de la Tunisie et du Maroc'.

BARTHELEMY, G J Alger, 71p. 1984. 'La terre et ses secrets, édit ENAL n 1708/84'.

Bel, F, and D J Ed. ERESS Cuche, Ouargla. 1969. 'Mise au point des connaissances sur la nappe du Complexe Terminal'.

Bel, F, and F J DEC Demargne, ANRH, Alger, Algérie. 1966. 'Etude géologique du Continental terminal', 24: 22.

Ben Naceur, M, M Ben Salem, M Rouassi, Z El Borji, and C Rahmoun. 2002. "Influence du manque d'eau sur le comportement écophysologique de quatre variétés de blé dur." In Annales de l'INRGREF, 133-52.

Bendjelid, Abed, Jean-Claude Brûlé, and JACQUES FONTAIN. 2004. AMENAGEURS ET AMENAGES EN ALGERIE ; HERITAGES DES ANNEES BOUMEDIENE ET CHADLI (Editions L'Harmattan).

Blum A., L. Chery, J. Barbier, D. Baudry. 2002. 'Contribution à la caractérisation des états de référence géochimique des eaux souterraines. Outils et méthodologie', E. P.-G., 5.

BRESLER E., MCN EAL B.L., CARTER D.L., 1982. Saline and Sodic Soils. Principles, Dynamics, Modeling (Springer-Verlag).

- Busson, G. 1970. Le Mésozoïque saharien. 2ème partie : Essai de synthèse des données des sondages algéro-tunisiens. (C.N.R.S: Paris).
- Chadha, DK J Hydrogeology journal. 1999. 'A proposed new diagram for geochemical classification of natural waters and interpretation of chemical data', 7: 431-39.
- Chehema, A J L'effet du Changement Climatique sur l'élevage et la gestion durable des parcours dans les zones arides et semi-arides du Maghreb» université Kasdi Merbah-Ouargla-Algérie, du. 2011. 'Le Sahara en Algérie, situation et défis', 21.
- Cherbuy, B. 1991. Les sols salés et leur réhabilitation : Etude bibliographique (Cemagref).
- CHIHOUB, Mohamed, and Abdelhak MEZIANI. 2020. 'Impact de la variabilité climatique sur les eaux souterraines de la nappe alluviale de la plaine de Sidi Bel Abbès', université ibn khaldoun-tiaret.
- Collins, Robert, and Alan J Journal of Hydrology Jenkins. 1996. 'The impact of agricultural land use on stream chemistry in the middle hills of the Himalayas, Nepal', 185: 71-86.
- Conac, Françoise J. 1978. 'Irrigation et développement agricole : l'exemple des pays méditerranéens et danubiens'.
- Conrad, G, and J Ch Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Fontes. 1972. 'Circulations, aires et périodes de recharge dans les nappes aquifères du Nord-Ouest saharien : Données isotopiques (18O, 13C, 14C)', 275: 165-68.
- Cornet, A J Géog. Phys. et Géol. Dyn. 1964. 'Introduction à l'hydrogéologie saharienne', 6: 5-72.
- Cornet, A J Hydraulique et équipement rural. Service des études scientifiques. Rapport, Alger, Algérie, 108p. 1961. 'Initiation à l'hydrogéologie saharienne'.
- Cornet, André, and Nicolas J Gouskov. 1952. 'Les eaux du Crétacé inférieur continental dans le Sahara Algérien (nappe dite "Albienne")'.
- Côte, Marc J Science et changements planétaires/Sécheresse. 1998. 'Des oasis malades de trop d'eau', 9: 123-30.
- Daddi Bouhoun, M. 2010. 'Contribution à l'étude de l'impact de la nappe phréatique et des accumulations gypso-salines sur l'enracinement et la nutrition du palmier dattier dans la cuvette de Ouargla (sud-est algérien)', Université de Annaba-Badji Mokhtar.
- Daoud, Youcef, et Amor J Science et changements planétaires/Sécheresse Halitim. 1994. 'Irrigation et salinisation au Sahara algérien', 5: 151-60.
- Daoudi, A, N Benterki, and MR J Une agriculture saharienne sans les Oasiens Bouasla. 2021. 'Modèles émergents de grandes exploitations agricole dans la wilaya de Ouargla : La politique de la mise en valeur dans les zones arides en débat' : 92-117.
- DEKKICHE, B J Gand, 210p. 1974. 'Contribution à l'étude des sols du Hodna et corrélation géochimique des eaux de la nappe Thèse Doct, Univ'.

- Derdour, Hamid. 1981. 'Contribution à l'étude de l'influence du taux de sodium échangeable sur le comportement des sols au compactage'.
- Djerbi, M J Ed. FAO, Rome. 1994. 'Précis de phoeniculture', 24.
- Djili, K J ese doctorat. 2000. 'Contribution à la connaissance des sols du nord de l'Algérie. Création d'une banque de données informatisées et utilisation d'un système d'information géographique pour la spatialisation et la valorisation des données pédologiques' : 227.
- Doneen, LD. 1961. "The influence of crop and soil on percolating water Proc." In Biennial Conference on Groundwater Resource.
- Doneen, LD J Department of Irrigation, University of California, California. 1964. 'Water quality for agriculture', 48.
- Douaoui, A, and T Hartani. 2007. "Impact de l'irrigation par les eaux souterraines sur la dégradation des sols de la plaine du Bas-Chéouli." In Troisième atelier régional du projet Sirma, 5 p. : Cirad.
- Dubost, Daniel. 1991. 'Ecologie, aménagement et développement agricole des oasis algériennes', Tours.
- Duchaufour, Philippe. 1977. Pédologie : Tome 1 : Pédogenèse et classification (Masson).
- Durand, JH. 1958. "Les sols irrigables (Etude pédologique) ; Les propriétés physiques des sols et leur détermination." In.: P.
- Durov, SA J Union of Sovietic Socialist Republics. 1948. 'Natural waters and graphical representation of their composition: Doklady Akademii Nauk', 59: 87-90.
- Edmunds, WM, AH Guendouz, Al Mamou, Al Moulla, Pl Shand, and K J Applied geochemistry Zouari. 2003. 'Groundwater evolution in the Continental Intercalary aquifer of southern Algeria and Tunisia: trace element and isotopic indicators', 18: 805-22.
- El Asslouj, Jaouad, S Kholtei, Namira El Amrani, and Abderraouf J Afrique Science : Revue Internationale des Sciences et Technologie Hilali. 2007. 'Analyse de la qualité physico-chimique des eaux souterraines de la communauté des Mzamza, au voisinage des eaux usées', 3.
- Emberger, Louis. 1955. Une classification biogéographique des climats.
- Fabre, Jean. 1976. Introduction à la géologie du Sahara algérien et des régions voisines : La couverture phanérozoïque (Publisher not identified ED).
- FAO, IPTRID. 2006. "Electronic conference on salinization: extension of salinization and strategies of prevention and rehabilitation. Project CISEAU." In.
- FAO. 2021. "L'État des ressources en terres et en eau pour l'alimentation et l'agriculture dans le monde – Des systèmes au bord de la rupture." In, edited by FAO, 93 p. Rome, Italy.
- FONTAINE, Jacques J Les Cahiers d'URBAMA. 1996. 'Sociétés sahariennes entre mythe et développement'.
- Forges, M J CIHEAM, options méditerranéennes. 1972. 'Irrigation et salinité' : 40-45.

Gonfiantini, R, G Conrad, J Ch Fontes, G Sauzay, and BR %J Isotope techniques in groundwater hydrology Payne. 1974. 'Etude isotopique de la nappe du Continental Intercalaire et de ses relations avec les autres nappes du Sahara septentrional', 1: 227-41.

GOUAIDIA, Layachi, Omar GUEFAIFIA, Abderahmane BOUDOUKHA, Mohamed Laid HEMILA, and Claude J Géo-Eco-Trop MARTIN. 2013. 'Evaluation de la salinité des eaux souterraines utilisées en irrigation et risques de dégradation des sols : Exemple de la plaine de Meskiana, nord-est algérien [Assessment of the groundwater salinity used for irrigation and risks of soil degradation : Example of the plain of Meskiana, Northeastern Alegria]', 37: 81-92.

Grattan, Stephen. 2002. Irrigation water salinity and crop production (Ucanr Publications).

Guendouz, A, AS Moulla, WM Edmunds, K Zouari, P Shand, and A Mamou. 2003. 'Hydrogeochemical and isotopic evolution of water in the Complexe Terminal aquifer in the Algerian Sahara', Hydrogeology journal, 11: 483-95.

Guendouz, A, Z Reghis, and AS J Rapport Moulla. 1992. 'Etude hydrochimique et isotopique des eaux souterraines de la cuvette de Ouargla' : 65.

Hachaichi, Zohra. 2017. 'Quantification de la recharge naturelle et artificielle d'un système aquifère soumis à des contraintes climatiques et anthropiques en zone semi-aride (bassin de Sbiba et Foussana) Tunisie centrale', Université d'Avignon.

HALASSA, Younes. 2021. 'Étude hydrogéologique du Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS) dans la zone frontalière algéro-tunisiens : (Région des Chotts)', université Kasdi Merbah Ouargla.

HALILAT, MT. 1993. "Etude de la faune fertilisation azotée et potassique sur blé dur (variété aldura) en zone saharienne (région d'Ouargla)." In : Mémoire de magister I. NS Batana. 130p.

HALILAT, MT. 2004. "Effect of potash and nitrogen fertilization on wheat under Saharan conditions." In IPI regional workshop on Potassium and Fertigation development in West Asia and North Africa. Rabat, Morocco, 24-28.

Halitim, A. 1988. 'Sols des régions arides d'Algérie. Ed. OPU, Alger, 384p. Expérimentale de sable additionné d'argile', Thèse Doc. INA Paris.

Halitim, Amor. 1985. 'Contribution à l'étude des sols des zones arides (hautes plaines steppiques de l'Algérie): morphologie, distribution et rôle des sels dans la genèse et le comportement des sols', Ecole Nationale Supérieure Agronomique.

Hamed, Younes, Lassaad Dassi, Meriem Tarki, Riadh Ahmadi, Khalid Mehdi, and Hamed Ben J Environmental Earth Sciences Dhia. 2011. 'Groundwater origins and mixing pattern in the multilayer aquifer system of the Gafsa-south mining district: a chemical and isotopic approach', 63: 1355-68.

Horning, M 1973. "Rôle de l'aménagement rationnel de l'eau d'irrigation au niveau des exploitations." In Séminaire régional FAO/PNUD Damas, 10-21.

INSID. 2008. "Sols salins en Algérie." In, 7 pages. Alger, Algérie : INSTITUT NATIONAL DES SOLS, DE L'IRRIGATION ET DU DRAINAGE.

- Jaber, Abdelhafid. 1970. 'Contribution à l'étude expérimentale des mouvements-ascendant et descendant-des solutions de sels de sodium (carbonate, sulfate et chlorure) et de certains aspects de leur action physique sur un sol soumis à l'influence d'une nappe peu profonde dans laquelle ils sont dissous', ORSTOM.
- Janardhana Raju, N, Prahlad Ram, and Sangita J Journal of the Geological Society of India Dey. 2009a. 'Groundwater quality in the lower Varuna river basin, Varanasi district, Uttar Pradesh', 73: 178-92.
- Kelly, WP J KELLY WP. Use of saline irrigation water, soil science. 1957. 'Adsorbed Sodium, cation exchange capacity and percentage sodium adsorption in alkali soils, sci., vol. 84', 95: 355-91.
- Kilian, C J Comptes Rendus Sommaires des Séances de la Société Géologique de France. 1931. 'Des principaux complexes continentaux du Sahara', 9: 109-11.
- Kopittke, PM, HB So, and NW J European Journal of Soil Science Menzies. 2006. 'Effect of ionic strength and clay mineralogy on Na–Ca exchange and the SAR–ESP relationship', 57: 626-33.
- Koull, K, MH Kherraze, K Lakhdari, T Benzaoui, S Helimi, MS Laouissat, Y Kherfi, A Bougafla, F Mimouni, et K J Alg Rég Arid Lakhdari. 2013. 'Eaux d'irrigation et salinisation des sols des périmètres irrigues dans la vallée de l'oued righ', 12: 97-102.
- Krupkin, PI J Sov. Soil Sci. no. 1963. 'Movement of salt solutions and soil materials', 6: 567-74.
- Kumar, Manjesh, and Ramesh J International Research Journal of Environment Sciences Kumar. 2013. 'Assessment of physico-chemical properties of ground water in granite mining areas in Goramachia, Jhansi, UP, India', 2: 19-24.
- Laaboudi, A, A Chabane, and FE Belkhiri. 2015. 'MÉTHODES DE DÉTERMINATION DES BESOINS EN EAU DE LA CULTURE DANS LES RÉGIONS SAHARIENNES', Institut National de la Recherche Agronomique d'Algérie, 27: 79-91.
- Lahlou, Mouanis, Mohamed Badraoui, Brahim Soudi, A Goumari, and Daniel Tessier. 2002. "Modélisation de l'impact de l'irrigation sur le devenir salin et sodique des sols." In Atelier du PCSI (Programme Commun Systèmes Irrigués) sur une Maîtrise des Impacts Environnementaux de l'Irrigation, 19 p. : Cirad-IRD-Cemagref.
- Lallemand-Barres, A J Etude documentaire. 1980. 'Aménagement des sols salés, irrigation avec des eaux salées'.
- Landeau A. Monition L. 1977. 'Nouvelle évaluation de l'eau pour l'irrigation ', Service Géologique National : 25.
- Legros, Jean-Paul. 2009. "La salinisation des terres dans le monde." In Proc. Académie des Sciences et Lettres de Montpellier Conf. n, 257-69.
- Loyer, Jean-Yves J Cahier ORSTOM, série Pédologie. 1991. 'Classification des sols salés : les sols Salin' : 51-61.

- Maillard, J Risques et recommandations. Handicap International. 2001. 'Le point sur l'Irrigation et la salinité des sols en zone sahélienne' : 34.
- Marc, L J Mémento Technique de Riziculture. 2001. 'Le contrôle de la salinité dans les rizières' : 6-12.
- Margat, J. J La recherche. 1990. 'Les gisements d'eau souterraine', 221: 590-96.
- Marlet, Serge, and Jean-Olivier Job. 2006. 'Processus et gestion de la salinité des sols'.
- Marlet, Serge, Bernard Vincent, Alain Vidal, Sami Bouarfa, J Wu, J Yang, Mamadou Kabirou N'Diaye, Marcel Kuper, and Daniel Zimmer. 2005. "Gestion de l'eau et de la salinité et redistribution des sels dans les périmètres irrigués." In.
- Massoud, FI J Food, and Rome Agriculture Organization of the United Nations, Italy. 1981. 'Salt affected soils at a global scale and concepts for control, FAO Land and Water Development Div., Technical Paper'.
- Massoumi, Ali Mohamad. 1968. 'Etude expérimentale sur le mécanisme du mouvement capillaire de l'eau et des sels solubles dans le sol : Influence des rapports cationiques des solutions et de texture sur le processus d'alcalisation'.
- Maton, Laure. 2006. 'Représentation et simulation des pratiques culturelles des agriculteurs à l'échelle régionale pour estimer la demande en eau d'irrigation : application à un bassin versant maïsicole du sud-ouest de la France...'
- Messahel, M, Mekki, B, Mohamed S 2004. 'Aménagements hydro agricoles : Situation actuelle et perspectives de développement en Algérie', Options Méditerranéennes, Séries B : 83-95.
- Milos, H, J FAO. Rome. 1971. 'L'eau et l'environnement Bull', 8: 32-38.
- Munns, Rana, Richard A James, and André J Journal of experimental botany Läuchli. 2006. 'Approaches to increasing the salt tolerance of wheat and other cereals', 57: 1025-43.
- Ncibi, K, N Gaaloul, and A, J IJIAS Gasmi. 2016. 'Contribution of the multivariate analysis and the GIS for hydrochemical characterization of phreatic aquifer to the plain of Sidi Bouzid (Central Tunisia)', 15: 667-84.
- Nezli, IE J Hydraulique. Université Mohamed Kheider–Biskra, Algérie. 2009. 'Approche hydrogéochimique à l'étude des aquifères de la basse vallée de l'Oued M'Ya (Ouargla)': 117.
- Nezli, IE, S Achour, and L J LARHYSS Journal P-ISSN -/E-ISSN - Djabri. 2007. 'Approche géochimique des processus d'acquisition de la salinité des eaux de la nappe phréatique de la basse vallée de l'oued M'Ya (Ouargla)'.
- Nicod, Jean J Méditerranée. 1975. 'G. Gaucher, S. Burdin, Géologie, géomorphologie et hydrologie des terrains salés', 22: 84-85.
- Omeiri, N 2016. "Contribution à la définition d'une approche de lutte contre la dégradation des sols des oasis algériennes : cas de l'oasis de Ouargla." In Mémoire de Doctorat, edited by Univ. Ouargla. Univ. Ouargla.

- ONM. 2016. 'Données climatologiques de la station météorologique d'Ain El-Beida Ouargla pendant 1996 - 2016'.
- OSS. 2003. "Système Aquifère du Sahara Septentrional. Observatoire du Sahara et du Sahel." In, 275p. Tunisie.
- Ouled Baba, SY, M. 2005. "Recharge et paléorecharge du système aquifère du Sahara septentrional." In Thèse de Doctorat en Géologie Faculté des Sciences de Tunis, 277p. Tunisie.
- Perron, Alexandre. 2003. Mesure de vitesse dans une solution électrolytique à force ionique élevée par une méthode électrochimique (Université du Québec à Chicoutimi).
- Plauchu, Vincent. 2004. Economie de l'environnement (Université Pierre Mendès France : France).
- Pousset, Joseph. 2002. Engrais verts et fertilité des sols (France Agricole Editions).
- Ranbir, Chhabra J Soil salinity, and water quality. 1996. 'Soil salinity and water quality'.
- Reddy, K Srinivasa J Int J Water Resour Environ Eng. 2013. 'Assessment of groundwater quality for irrigation of Bhaskar Rao Kunta watershed, Nalgonda District, India', 5: 418-25.
- Ruellan, A, R Poss, E Blanchart, A Brauman, M Grimaldi, M Grünberger, M Barbiero, V Chaplot, O Monga, and M, J Les dossiers thématiques de l'IRD Bernoux. 2008. 'Les sols, des milieux vivants très fragiles' : page 21.
- Salhi, Abdelkader. 2017. 'Transformations spatiales et dynamiques socio-environnementales de l'oasis de Ouargla (Sahara algérien). Une analyse des perspectives de développement. Thèse de Doctorat en Géographie', Aix-Marseille Université.
- Schoeller, Henri. 1962. "Les eaux souterraines." In. : Masson.
- Servant, Jean. 1975. 'Contribution à l'étude pédologique des terrains halomorphes : l'exemple des sols salés du sud et du sud-ouest de la France', université des sciences et techniques, Languedoc.
- Shiklomanov, Igor A, J Water international. 2000. 'Appraisal and assessment of world water resources', 25: 11-32.
- Smith, Martin. 1992. "CROPWAT un logiciel pour la planification et la gestion des systèmes d'irrigation." In. : FAO.
- Szabolcs, István. 1989. Salt-affected soils (CRC Press, Inc.).
- Thior, Mamadou, Tidiane Sané, Oumar Sy, Luc Descroix, Lat Grand Ndiaye, Abdou Kadri Sambou, Dramane Cissokho, and Boubacar J revue ivoirienne des sciences et technologies Solly. 2019. 'Caractéristiques granulométriques et dynamique sédimentaire entre les différentes unités géomorphologiques du littoral de la Casamance (Sénégal)'.
- Tiercelin, Jean-Robert, and Alain Vidal. 2006. 'Traité d'irrigation'.
- UNESCO. 1972. "Projet Reg 100. Etude Des Ressources En Eau Du Sahara Septentrional. Rapport Sur Les Résultats Du Projet." In. : UNESCO Paris.

- VAN HOORN, JW, et JG Cours d 'irrigation VAN ALPHEN, IAM/Bari, Italie, 95p. 1998. 'Maîtrise de la salinité, bilan de sels et besoins de lessivage des sols irrigués'.
- Varol, Simge, and Aysen, J Environmental Earth Sciences Davraz. 2014. 'Assessment of geochemistry and Hydrogeochemical processes in groundwater of the Tefenni plain (Burdur/Turkey)', 71: 4657-73.
- Vasanthavigar, M, K Srinivasamoorthy, K Vijayaragavan, R Rajiv Ganthi, S Chidambaram, P Anandhan, R Manivannan, S ,J Environmental monitoring Vasudevan, and assessment. 2010. 'Application of water quality index for groundwater quality assessment: Thirumanimuttar sub-basin, Tamilnadu, India', 171: 595-609.
- WEC. 2007. "La géologie pétrolière de l'Algérie." In In Sonatrach – Schlumberger Well Evaluation Conference, edited by Schlumberger, p16 –18. Algérie
- Yeo, Anthony, J Scientia Horticulturae. 1998. 'Predicting the interaction between the effects of salinity and climate change on crop plants', 78: 159-74.
- Zaman, Mohammad, Shabbir A Shahid, Lee Heng, Shabbir A Shahid, Mohammad Zaman, Lee J Guideline for salinity assessment Heng, mitigation, adaptation using nuclear, and related techniques. 2018. 'Soil salinity: Historical perspectives and a world overview of the problem': 43-53.
- Zid, E, and C Grignon. 1991. "Les tests de sélection précoce pour la résistance des plantes aux stress. Cas des stress salin et hydrique." In L'amélioration des plantes pour l'adaptation aux milieux arides, deuxièmes journées scientifiques du réseau Biotechnologies végétales, Tunis, 4-9 décembre 1989, 91-108.