

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie civil et Hydraulique

Année 2023/2024



N° d'enregistrement :

/...../...../...../...../

THESE

En vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en sciences

En Génie civil

Spécialité : Génie civil

Etude de l'évolution des caractérisations de sols agricoles irriguées par les eaux minéralisées dans les régions arides (Cas de région d'Oued-Souf)

Présenté par: ZAIZ Issam

Directeur de thèse: Pr. BOUTOUTAOU Djamel

Soutenu publiquement le: 28 /02/2024

Devant le jury composé de :

OULHACI Dalila	M.C.A	Université de Ouargla	Président
BOUTOUTAOU Djamel	Professeur	Université de Ouargla	Directeur de thèse
GHOMRI Ali	Professeur	Université d'El Oued	Examineur
KHECHANA Salim	Professeur	Université d'El Oued	Examineur
SAGGAI Sofiane	Professeur	E.S.A.S d'ELoued	Examineur
EL FERGOUGUI Myriam Marie	M.C.A	Université de Ouargla	Examineur

Dédicaces

... À l'esprit de ma chère mère, que Dieu l'offre le paradis...

... À mon cher père, que Dieu lui donne longue vie et santé...

... À ma chère femme et amour de ma vie, que Dieu nous laisse

ensemble ici et ailleurs...

... À mes chers enfants, que Dieu les garde...

... À mes frères et soeurs, symboles de ma fierté...

... Je dédie ce travail...

ZAIZ Issam

Remerciements

الحمد لله رب العالمين ذو الفضل وامنة على كل شيء

Je tiens à exprimer ma reconnaissance et mes gratitude et vifs remerciements à mon Directeur de thèse, Monsieur le Professeur **BOUTOUÏAOU Djamal** Enseignant à l'université de Kasdi Merbah - Ouargla, s'est investi dans le suivi mon travail avec un intérêt et une grande confiance qui ont été pour moi de très forts encouragements. Ses conseils bienveillants et ses recommandations précieuses ont largement contribué à la réalisation de ce travail.

Mes sincères remerciements et ma gratitude aux membres du jury :

Madame **OULHACI Dalila**, Maître de conférence à l'Université de Ouargla, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de cette thèse ;

Madame **EL FERGUOUGI Meriem**, Maître de conférence à l'Université de Ouargla, pour avoir accepté de juger et de commenter ce travail ;

Monsieur **GHOMRI Ali**, Professeur à Université d'El Oued, pour son aide, et pour avoir accepté de juger et de commenter ce travail ;

Monsieur **KHECHANA Salim**, Professeur à Université d'El Oued, pour son aide, et pour avoir accepté de juger et de commenter ce travail ;

Je tiens à remercier Monsieur **LANEZ Touhami**, Professeur Centre Universitaire d'Oued et directeur du laboratoire (VTRS) à qui j'adresse ma profonde reconnaissance pour l'aide et le soutien qu'il m'a apporté en vue de concrétiser ce travail ;

Mes remerciements vont également à l'ensemble des personnes du laboratoire de l'A.D.E d'El Oued (Algérienne Des Eaux) surtout chef de laboratoire : Mr **MHAOUAT Mohammed**, Les ingénieurs Mr **ZITOUNI Abdelrazek**, **GABOUSSA Safia**, **BADI Ouafa**, **GUÉMAOUN Sana**, **BENNOUR Imane**.

Mes remerciements s'adressent à mes amis de la D.R.E d'El Oued spécialement Mr **LACHAARI Mohammed Bachir**, Mr **AMAMRA Ali**, Mr **AHMIAD Hossin** qui ont su m'apporter la détente et la joie durant les périodes de stress ainsi que pour leur amitié et leur soutien.

J'adresse également mes sincères remerciements à mes collègues au département d'hydraulique et génie civil à l'Université d'El Oued, en particulier Mr **MILOUDI Abdelmonem**, Mr **MANI Mohamed**, Mr **OVAKOVAK Abdelkader**, Mr **RIGUET Ferhat**, Mr **DJEDID Tarek**.

Je remercie par la pensée toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de cette thèse, qu'ils trouvent ici l'expression de ma sincère reconnaissance.

ملخص :

إن مشكل ملوحة التربة و مياه الري يشكل العديد من الصعوبات الرئيسية في التنمية الزراعية في العديد من المناطق وخاصة المناطق الجافة، غالبًا ما تعمل هذه الصعوبات في وقت واحد وتساهم في خفض إنتاجية التربة.

يتم سقي المحيطات الزراعية لمنطقة واد سوف بالمياه المالحة المستخرجة من الطبقات الجوفية (الطبقة الحرة) وبالتالي فإن العواقب هي التملح التدريجي للتربة و في هذا السياق، تم إجراء تحليل نوعي لتطور ملوحة التربة في ثلاث مواقع (ورماس، الرقيبة و طريفواوي) يتم سقيها بنظام الرش المحوري على التوالي لمدة 2 و 5 سنوات. أما الجزء الثاني يتكون من دراسة تجريبية توضح تأثير ملوحة المياه وعدد مرات الري على التربة الزراعية على المدى القصير والمتوسط والبعيد.

أظهرت نتائج التحاليل التي تم إجراؤها على التربة أن هناك تطور في ملوحة التربة المرورية لمدة 2 و 5 سنوات. كما أظهر الجزء التجريبي الذي تم إجراؤه خلال هذه الدراسة أن الأملاح المودعة تحتوي على نسب مختلفة من الكاتيونات Na^+ ، Mg^{2+} ، K^+ و Ca^{2+} والأنيونات Cl^- ، SO_4^{2-} و HCO_3^- والتي تؤدي بدرجات مختلفة من الملوحة. أخيرًا ، أظهرت النتائج المختلفة للتجارب الميدانية وجود مخاطر عالية مرتبطة باستخدام المياه شديدة الملوحة لري التربة.

النتائج التي تم الحصول عليها تسمح للخبراء بالتنبؤ بملوحة التربة لاتخاذ الإجراءات اللازمة (تغيير المحاصيل ، غسل التربة ، إلخ) وتجنب تملح الأرض وبالتالي انخفاض المحصول الزراعي.

الكلمات المفتاحية : مناطق الجافة، وادي سوف، التربة، السقي، الملوحة .

Résumé :

Le problème de la salinité du sol et l'irrigation par des eaux saumâtres ont été constitués une autre contrainte majeure pour le développement de l'agriculture dans la région d'Oued Souf.

Dans le contexte aride, ses contraintes agissent le plus souvent simultanément et concourent à abaisser la productivité des sols. Les périmètres de la vallée d'Oued-Souf sont irrigués par des eaux provenant des nappes phréatiques saumâtres qui contribuent à salinisation progressive des sols. Dans ce contexte, une analyse qualitative de l'évolution de la salinité des sols dans trois stations (Réguiba, Oumes et Trifaoui), irrigués par un système d'aspersion (Pivot) avec une eau minéralisée depuis respectivement 2 et 5 années a été effectuée. Le deuxième volet consiste à étudier l'expérimentalement d'influence de la salinité des eaux et la fréquence d'irrigation sur le sol agricole dans un cours, moyen et long terme.

Les résultats des analyses effectuées sur terrain montrent que l'évolution de la salinité des sols irrigués depuis 2 et 5 ans est hautement significative. La partie expérimentale réalisée au cours de cette étude a montré que les sels déposés contiennent diverses proportions de cations (Na^+ , Mg^{2+} , K^+ et Ca^{2+}) et d'anions (Cl^- , SO_4^{2-} et HCO_3^-) qui mènent à différents degrés de la salinité.

Enfin, les différents résultats des essais en plein champ et d'expérimentation ont montré des risques élevés liés à l'utilisation des eaux saumâtres pour l'irrigation des sols. Les résultats obtenus permettent aux planificateurs de prévoir la salinisation des sols pour prendre des mesures nécessaires (changement de culture, lessivage etc.) et éviter la salinisation des terres et par conséquent la chute de rendement agricole.

Mots clés: Zone aride, Vallée de Oued-Souf, Sol, Irrigation, Salinité.

Abstract:

The problem of soil salinity and irrigation by brackish water constitute another major constraint for the development of agriculture in the Oued Souf region.

In the arid context, these constraints usually act simultaneously and contribute to lower soil productivity. The perimeters of the Oued-Souf valley are irrigated by water from brackish water tables that contribute to the gradual salinization of the soils. In this context, a qualitative analysis of the evolution of soil salinity in three stations (Réguiba, Oumes and Trifaoui), irrigated by a sprinkler system (Pivot) with mineralized water for 2 and 5 years respectively was carried out. The second part is to study experimentally the influence of the salinity of the water and the frequency of irrigation on the agricultural soil in a course, medium and long term.

The results of field analysis show that the evolution of salinity of irrigated soils over the past 2 and 5 years is highly significant. The experimental portion of this study showed that the deposited salts contain various proportions of cations (Na^+ , Mg^{2+} , K^+ and Ca^{2+}) and anions (Cl^- , SO_4^{2-} and HCO_3^-) that lead to different degrees of salinity.

Finally, the various results of field trials and experiments showed high risks associated with the use of brackish water for soil irrigation. The results obtained allow the planners to predict the salinization of the soils in order to take necessary measures (change of crop, leaching etc.) and avoid the salinization of the land and consequently the fall in agricultural yield.

Key words: Arid zone, Oued-Souf Valley, Soil, Irrigation, Salinity.

Liste des abréviations

INSID	Institut National des Sols de l'Irrigation et du Drainage
DSA	Direction des Services Agricoles
ONM	Office Nationale de Météorologie
ANRH	Agence Nationale des Ressources Hydrauliques
CE	Conductivité Electrique
CI	Continental Intercalaire
CT	Complexe Terminal
SAT	Surface agricole totale.
SAU	Surface agricole utile.
FAO	L'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture
D.R.E	Direction des Resource en Eau.
S.A.R	Sodium absorption ratio.
TCMI	Institut Technique des Cultures Maraîchères et Industrielles
S.A.S.S	Système Aquifère du Sahara Septentrional.
ha	Hectare
qx	Quintaux
ENAGEO	Entreprise Nationale de Géophysique

Table de matières

	<i>Page</i>
<i>Introduction générale</i>	01
<i>Première Partie : Synthèse bibliographique</i>	
Chapitre I : Problème de salinisation des terres agricole dans les régions arides et semi-aride	
Introduction	04
1. Définition de la salinisation	04
2. Définition de la salinité	04
3. Dégradation de la qualité des sols dans les zones arides	05
4. Problèmes de l'agriculture irriguée dans les zones arides (aridoculture)	06
5. Origine de la salinité et les mécanismes de la salinisation des sols	08
5.1. Salinisation primaire ou naturelle	08
5.2. Salinisation secondaire	08
6. Classification des sols salés	09
6.1. Sols à complexe sodique ou sols alcalins (les solonetz)	09
6.2. Sols salins à complexe calcique (Solontchaks)	09
7. Extension et localisation de la salinité	09
7.1. Terres irriguées en Algérie	09
7.2. Terres irriguées au Sahara algérien	10
8. Sels solubles	10
8.1. Définition des sels solubles et la solubilité (S)	10
8.2. Principaux sels solubles dans le sol	10
8.2.1. Sels chlorurés	10
8.2.2. Sels sulfatés	11
8.2.3. Sels carbonatés et bicarbonatés	11
8.3. Propriétés des sels solubles	11
8.3.1. Paramètres influençant la solubilité	11
9. Les problèmes de la salinité	12
9.1. L'action des sels sur les propriétés du sol	12
9.1.1. Les effets des sels sur les propriétés physiques du sol	12
9.1.2. Les effets des sels sur la stabilité structurale	13
9.1.3. L'effet des sels sur la perméabilité	13
9.1.4. L'action des sels sur la rétention de l'eau	14
9.2. Influences des sols salés sur les plantes	14
10. Tolérance des plantes aux sels	15
11. Salinité de l'eau d'irrigation	15
11.1 Les critères d'évaluation d'une qualité d'eau d'irrigation	15
11.1.1. La salinité	15
11.1.2. Le SAR ou la teneur en sodium	16
12. Méthodes d'irrigation et salinité	17
12.1. L'irrigation de surface	17
12.2. L'irrigation par aspersion	17
12.3. L'irrigation goutte à goutte	17
13. Salinisation causée par l'irrigation	18
14. Conclusion	19

Deuxième Partie: Méthodologie et Résultats

Chapitre II : Caractéristiques physico géographique et climatiques de la région d'étude

Introduction.....	20
1. Cadre géographique.....	20
1.1. Situation géographique de la région d'Oued Souf.....	20
1.2. Les peuplements de la région d'Oued Souf.....	21
2. Contexte climatique.....	22
2.1. Les paramètres climatiques.....	23
2.1.1. Températures.....	23
2.1.2. Précipitations.....	23
2.1.3. Vents.....	24
2.1.4. Evaporation.....	24
2.1.5. Humidité de l'air.....	24
2.1.6. Insolation.....	24
2.2. Diagramme ombrothermique de GAUSSEN.....	25
2.3. Bilan hydrologique.....	26
3. Ressources en eau dans le Sahara.....	27
3.1. La nappe phréatique.....	28
3.2. La nappe du Continental Intercalaire.....	29
3.3. La nappe du Complexe Terminal.....	30
4. Les potentialités souterraines totales reconnues et leurs répartitions.....	30
4.1. Répartition du nombre de forages par zones.....	31
4.2. Répartition du nombre de forages par nappe et par usages.....	31
4.2.1. Zone des Chotts (Oum Etiour – Hamrayia – Still).....	32
4.2.2. Zone de l'Oued Righ Nord (La vallée Nord de l'Oued Righ).....	32
4.2.3. Zone Frontalière (Taleb El Arbi – Douar El Maâ – Benguecha).....	32
4.2.4. Zone du Souf (La vallée du Souf – Mih Ouensa – Oued Allenda).....	34
4.3. Evaluation des volumes soutirés des ressources en eau par zones, par usage.....	34
4.3.1. Exploitation de la nappe du Complexe Terminal (C.T).....	34
4.3.2. Exploitation de la nappe du Continental Intercalaire (C.I).....	36
4.3.3. Exploitation de la nappe phréatique.....	36
5. L'agriculture dans la région du souf.....	36
5.1. L'ancien système agricole du souf.....	36
5.2. Le nouveau système agricole du souf.....	37
5.3. Situation actuelle sur la production au niveau de la wilaya d'El Oued.....	37
5.3.1. Superficie des terres utilisées par l'agriculture.....	37
5.3.2. Les principales cultures et leurs superficies agricoles.....	40
5.3.3. Situation actuelle de la filière pomme de terre dans la région d'El Oued.....	42
5.3.4. Évolution de la production de la pomme de terre dans la région d'El Oued.....	43
5.3.5. Evolution de la superficie cultivée de la pomme de terre.....	43
5.3.6. Évolution de la production.....	44
5.3.7. Evolution du rendement.....	45
6. Conclusion.....	46
Chapitre III : Etude expérimentale de salinisation des sols en termes agricoles	
1. Méthodologie générale.....	48
<i>Première Volet : Les essais en plein champ</i>	
2. Matériel d'étude.....	49
2.1. Choix du site expérimental.....	50
2.2. Présentation de la station expérimentale.....	50
2.2.1. Station d'Ourmes (ST01).....	50
2.2.2. Station de Reguiba (ST02).....	51
2.2.3. Station de Trifaoui (ST03).....	51
2.3. Matériel végétal utilisé.....	51
3. Stratégie d'échantillonnage.....	51
3.1. Pour le sol.....	52
3.2. Pour l'eau.....	53

4. Méthodes d'analyse.....	53
4.1. Méthodes d'analyse des eaux.....	53
4.1.1. Le bilan cationique.....	54
4.1.2. Le bilan anionique.....	54
4.1.2.1. Dosage du chlorure.....	54
4.1.2.2. Dosage des carbonates et bicarbonates.....	54
4.1.2.3. Dosage des sulfates.....	54
5. Résultats et discussion.....	54
5.1. Analyse granulométriques du sol.....	56
5.2. Les caractérisations morphologiques des stations agricoles.....	57
5.2.1. Description morphologique Station-1- d'Ourmes.....	57
5.2.1.1. Description morphologique du profil n° 01 (non cultivé).....	57
5.2.2. Description morphologique Station-2- de Reguiba.....	57
5.2.2.1. Description morphologique du profil n° 02 (non cultivé).....	58
5.2.3. Description morphologique Station-3- d'Ourmes.....	58
5.2.3.1 Description morphologique du profil n° 03 (non cultivé).....	58
5.3. Caractérisation physicochimique des eaux d'irrigation.....	61
5.3.1. Faciès chimique des eaux d'irrigation.....	62
5.4. Géochimie et l'Indice de saturation (SI) des minéraux des eaux d'irrigation.....	63
5.5. Caractéristiques physico-chimiques du sol.....	63
5.5.1. Conductivité électrique (C.E) du sol.....	64
5.5.2. PH des sols.....	66
5.5.3. Evolution du faciès chimiques de la solution du sol.....	70
5.6. Spéciation des cations et anions dans les solutions extraites des sols.....	73
5.7. Diagnostic des sources des ions.....	75
5.8. Relation entre la salinité d'eau d'irrigation et la salinisation des sols.....	77
5.9. L'effet de la salinité sur la diminution des rendements de la pomme de terre.....	78
6. Conclusion.....	79
<i>Deuxième Volet : L'expérimentation sur le régime hydrique en conditions salines</i>	
Introduction.....	80
7. Matériel et méthodes.....	81
7.1. Lieux d'échantillonnage de matériaux étudiés.....	81
7.2. Les eaux d'irrigation.....	81
7.3. Les dispositifs expérimentaux.....	82
7.4. Protocole d'irrigation des parcelles et de leur suivi.....	83
8. Résultats et discussion.....	83
8.1. Le pH.....	83
8.2. La Conductivité Electrique (CE).....	87
8.3. La teneur en ions majeurs.....	87
8.3.1. Le chlore Cl ⁻	89
8.3.2. L'alcalinité HCO ³⁻	90
8.3.3. Le sulfate SO ₄ ²⁻	92
8.3.4. Le calcium Ca ²⁺ et le magnésium Mg ²⁺	94
8.3.5. Le sodium Na ⁺ et le potassium K ⁺	96
8.4. Equilibres chimiques et indices de saturation.....	96
8.4.1. Degré de saturation d'une solution vis-à-vis d'un minéral.....	96
8.4.2. Variation de l'indice de saturation des minéraux présents dans des eaux filtrées (Court terme 3ans).....	98
8.4.3. Variation de l'indice de saturation des minéraux présents dans des eaux filtrées (Moyen terme 5ans).....	99
8.4.4. Variation de l'indice de saturation des minéraux présents dans des eaux filtrées (Long terme 10ans).....	101
9. Conclusions.....	103
<i>Conclusion générale</i>	106
<i>Références bibliographiques</i>	107
<i>Annexes</i>	

Liste des Figures

N° Figure	Titre	Page
Chapitre II : Caractéristiques physico géographique et climatiques de la région d'étude		
Figure 1	Situation géographique de la zone d'étude.....	21
Figure 2	Position de la station de l'ONM : de Guemar sur le climagramme d'Emberger.....	25
Figure 3	Courbe Ombro-thermique d'El-Oued (1978/2016).....	27
Figure 4	Forme de l'agriculture nouvelle le mini-pivot de fabrication artisanale.....	28
Figure 5	Coupe hydrogéologique des aquifères du Sahara septentrionale (UNESCO 1972).....	29
Figure 6	Zone d'alimentation de la nappe phréatique et le sens d'écoulement de la nappe (Cote Marc, 2006)..	30
Figure 7	Extension des formations du système Aquifère du Sahara Septentrional (OSS, 2002.....	31
Figure 8	Carte piézométrique de référence du "CI" (OSS, 2003).....	33
Figure 9	Présentation des formations aquifères du complexe terminal à El Oued.....	33
Figure 10	Carte piézométrique de référence du "CT" (OSS, 2003).....	35
Figure 11	Répartition du nombre total de forages d'eau CT et CI par zones.....	35
Figure 12	Répartition du nombre total de forages d'eau CT et CI par usage.....	38
Figure 13	Répartition du nombre total de forages d'eau CT et CI par zones.....	39
Figure 14	Répartition de l'état total de forages d'eau CT et CI.....	39
Figure 15	Répartition de volume d'eau soutiré de CT pour les différents types des usages.....	41
Figure 16	Répartition de volume d'eau soutiré de CI pour les différents types des usages.....	41
Chapitre III : Etude expérimentale de salinisation des sols en termes agricoles		
Figure 1	Situation des stations d'étude dans La vallée d'Oued - Souf (Google Earth, 2019).....	49
Figure 2	Schéma général de la méthodologie de travail du premier volet.....	50
Figure 3	Histogramme représente les résultats de l'analyse granulométrique des sols prélevés (3 échantillons)	57
Figure 4	Diagramme de Wilcox des eaux d'irrigation de la zone d'étude.....	61
Figure 5	Diagramme de Riverside des eaux d'irrigation de la zone d'étude.....	61
Figure 6	Diagramme de Piper des eaux d'irrigation de la zone d'étude.....	62
Figure 7	Variation du pH sol dans les sites irrigués depuis 2 et 5 années à l'état initial.....	65
Figure 8	Variation du CE sol dans les sites irrigués depuis 2 et 5 années à l'état initial.....	66
Figure 9	Répartition de la concentration des ions de sol (Extrait 1/5) irrigués depuis 2 et 5 années à l'état initial dans la station d'Ourmes.....	68
Figure 10	Représentation sur le diagramme de piper des solutions d'extraits aqueux 1/5 irrigués pendant 2, 5 années et du sol nu (témoin) dans la station d'Ourmes.....	68
Figure 11	Répartition de la concentration des ions de sol (Extrait 1/5) irrigués depuis 2 et 5 années à l'état initial dans la station Reguiba.....	69
Figure 12	Représentation sur le diagramme de piper des solutions d'extraits aqueux 1/5 irrigués pendant 2, 5 années et du sol nu (témoin) dans la station Reguiba.....	69
Figure 13	Répartition de la concentration des ions de sol (Extrait 1/5) irrigués depuis 2 et 5 années à l'état initial dans la station Trifaoui.....	70
Figure 14	Répartition de la concentration des ions de sol (Extrait 1/5) irrigués depuis 2 et 5 années à l'état initial dans la station Trifaoui.....	70
Figure 15	Analyse en composantes principales des paramètres de salinité du sol nu (Non irrigué) dans les trois stations dans la couche arable des sols (0-30 cm).....	75
Figure 16	Analyse en composantes principales des paramètres de salinité du sol irrigués (depuis 2 Années) dans les trois stations dans la couche arable des sols (0-30 cm).....	75
Figure 17	Analyse en composantes principales des paramètres de salinité du sol irrigués (depuis 5 Années) dans les trois stations dans la couche arable des sols (0-30 cm).....	76
Figure 18	Schéma général de la méthodologie de travail du deuxième volet.....	81
Figure 19	Schéma explicatif des pilotes, du support filtrant, utilisés.....	83
Figure 20	Variation du pH depuis (3,5 et 10 années) à l'état initial.....	86
Figure 21	Variation de la CE ($\mu\text{S}/\text{m}$) depuis (3,5 et 10 années) à l'état initial.....	87
Figure 22	Variation de la Cl (mg/l) depuis (3,5 et 10 années) à l'état initial.....	89
Figure 23	Variation de la HCO_3^- (mg/l) depuis (3,5 et 10 années) à l'état initial.....	91
Figure 24	Variation de la SO_4^{2-} (mg/l) depuis (3,5 et 10 années) à l'état initial.....	92
Figure 25	Variation de la Ca^{2+} (mg/l) depuis (3,5 et 10 années) à l'état initial.....	94
Figure 26	Variation de la Mg^{2+} (mg/l) depuis (3,5 et 10 années) à l'état initial.....	94
Figure 27	Variation de la Na^+ (mg/l) depuis (3,5 et 10 années) à l'état initial.....	96
Figure 28	Variation de la K^+ (mg/l) depuis (3,5 et 10 années) à l'état initial.....	96
Figure 29	Variation de l'indice de saturation des minéraux présents dans des eaux filtrées (Court terme 3 ans)..	98
Figure 30	Variation de l'indice de saturation des minéraux présents dans des eaux filtrées (Moyen terme 5ans).	100
Figure 31	Variation de l'indice de saturation des minéraux présents dans des eaux filtrées (Long terme 10ans) .	101

Liste des Tableaux

N° Tableau	Titre	Page
Chapitre I : Problème de salinisation des termes agricole dans les régions arides et semi-aride		
Tableau 1	Classification des eaux d'irrigation proposée par (USDA).....	16
Chapitre II : Caractéristiques physico géographique et climatiques de la région d'étude		
Tableau 1	Répartition de la superficie et nombre d'habitant et la densité apparente par commune de La vallée d'Oued- Souf.....	22
Tableau 2	Coordonnées géographiques de la station météorologique.....	22
Tableau 3	Données climatiques moyenne de la région d'Oued Souf entre 1978 et 2016 (O.N.M. El-Oued Guemar,2020).....	23
Tableau 4	Les données des précipitations et des températures moyennes mensuelles (1978-2019).....	25
Tableau 5	Bilan hydrique de la station de Guemar (1978/ 2019) par la méthode de THORNTWAITE.....	26
Tableau 6	Répartition du nombre de forages enregistrés dans la zone des Chotts (Oum Etiour - Hamrayia - Still).....	32
Tableau 7	Répartition du nombre de forages enregistrés dans la zone de l'Oued Righ Nord.....	33
Tableau 8	Répartition du nombre de forages enregistrés dans la zone Frontalière.....	33
Tableau 9	Répartition du nombre de forages enregistrés dans la zone du Souf.....	33
Tableau 10	Récapitulatif des volumes d'eau soutirés de CT pour les différents types des usages.....	35
Tableau 11	Récapitulatif des volumes d'eau soutirés de CI pour les différents types des usages.....	36
Tableau 12	Répartition générales de la surface agronomique de la vallée d'Oued Souf.....	38
Tableau 13	Répartition des palmiers par espèce dans la wilaya d'Oued Souf.....	38
Tableau 14	Répartition de la Surface Agricole Utile (SAU) dans la wilaya d'Oued Souf.....	39
Tableau 15	Les principales zones productives de la pomme dans la région d'El Oued.....	41
Tableau 16	Evolution des superficies de la production et des rendements de la pomme de terre dans la région d'El Oued.....	43
Chapitre III : Etude expérimentale de salinisation des sols en termes agricoles		
Tableau 1	Les paramètres statistiques mesurés des eaux de la nappe phréatique (puits).....	59
Tableau 2	Matrice de Corrélation (Pearson) des différents paramètres mesurés.....	60
Tableau 3	Indice de Saturation (IS selon le modèle Phreeqc 3.0, Parkhurst et Appelo, 2013) des eaux de la nappe phréatique (puits).....	63
Tableau 4	Analyse statistique de l'Indice de Saturation (IS selon le modèle Phreeqc 3.0, Parkhurst et Appelo, 2013) des eaux de la nappe phréatique (puits).....	63
Tableau 5	La distribution de la masse des cations et anions dans les différentes spéciations dans les solutions extraites des sols de la station Ourmes.....	71
Tableau 6	La distribution de la masse des cations et anions dans les différentes spéciations dans les solutions extraites des sols de la station Trifaoui.....	72
Tableau 7	La distribution de la masse des cations et anions dans les différentes spéciations dans les solutions extraites des sols de la station Reguiba.....	73
Tableau 8	Matrice de corrélation des paramètres de salinité du sol nu (Témoin) dans les trois stations dans la couche arable des sols (0-30 cm).....	74
Tableau 9	Matrice de corrélation des paramètres de salinité du sol irrigués (depuis 2 Années) dans les trois stations dans la couche arable des sols (0-30 cm).....	74
Tableau 10	Matrice de corrélation des paramètres de salinité du sol irrigués (depuis 5 Années) dans les trois stations dans la couche arable des sols (0-30 cm).....	74
Tableau 11	La variation du pH de l'eau traitée en fonction du temps.....	85
Tableau 12	La variation de la conductivité électrique (CE) en fonction du temps.....	87
Tableau 13	Variation de la Cl^- (mg/l) en fonction de temps.....	89
Tableau 14	Variation de la HCO_3^- (mg/l) en fonction de temps.....	90
Tableau 15	Variation de la SO_4^{2-} (mg/l) en fonction de temps.....	91
Tableau 16	Variation de la Ca^{2+} et Mg^{2+} (mg/l) en fonction de temps.....	93
Tableau 17	Variation de la Na^+ et K^+ (mg/l) en fonction de temps.....	95
Tableau 18	Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans des eaux filtrées (Court terme 3annés).....	98
Tableau 19	Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans des eaux filtrées (Moyen terme 5 annés).....	99
Tableau 20	Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans des eaux filtrées (Moyen terme 10 annés).....	101

Liste des photos

N° Photo	Titre	Page
Chapitre II : Caractéristiques physico géographique et climatiques de la région d'étude		
Photo 1	Palmeraie ancienne tradition dans la wilaya d'Oued Souf (ZAIZ, 2020).....	39
Photo 2	Culture de la tomate est également préconisée aux alentours du périmètre (ZAIZ, 2020).....	40
Photo 3	Culture de l'olivier est également préconisée aux alentours du périmètre (ZAIZ, 2020).....	40
Photo 4	Cultures maraîchères de la pomme de terre irriguée par pivot (ZAIZ, 2020).....	42
Photo 5	Cultures maraîchères de la pomme de terre irriguée par goutte à goutte (ZAIZ, 2020).....	42
Chapitre III : Etude expérimentale de salinisation des sols en termes agricoles		
Photo 1	Les deux endroits (Choucha El-hamra) du 1 ^{er} Station (ZAIZ, 2020).....	51
Photo 2	Les deux endroits (Nadour) du 2 ^{ème} Station (ZAIZ, 2020).....	51
Photo 3	Les deux endroits (Kobna) du 3 ^{ème} Station (ZAIZ, 2020).....	52
Photo 4	Prélèvements d'échantillons de sol nu (Sol témoin non irrigué) (A) et prélèvements d'échantillons de sol irrigué par pivot (B) prélèvements d'échantillons d'eau d'irrigation (C) (ZAIZ, 2020).....	53
Photo 5	Appareil Photomètre de flamme.....	54
Photo 6	Appareil conductimètre.....	54
Photo 7	Appareil Spectrophotomètre.....	55
Photo 8	Détermination de la texture par la méthode de sédimentation (ZAIZ, 2020).....	56
Photo 9	Profil pédologique et forme de surface (ZAIZ, 2020).....	57
Photo 10	La dégradation du sol sableux par un dépôt de sels à la surface (un encroutement gypseux) après une irrigation à court et moyen terme (ZAIZ, 2020).....	64
Photo 11	Un filet filtrant pour éviter le passage de sable (ZAIZ, 2020).....	82
Photo 12	Dispositif expérimental des différents filtres (Photo original) (ZAIZ, 2020)....	82
Photo 13	Salinisation des sols dans les filtres causés par l'évaporation du sol (ZAIZ, 2020).....	88

INTRODUCTION GENERALE

Les régions sahariennes ont été caractérisées par de fortes contraintes du point de vue biotique et édaphique. Elles sont caractérisées par un climat désertique avec des températures élevées, une forte évaporation et une grande intensité des vents accompagnés le plus souvent de sable et par une faible pluviométrie. Toutes ces conditions négatives rendent impossible toute pratique des cultures sans irrigation KHADRAOUI, (2010).

La pédogenèse en dehors des zones endoréiques est limitée à une désagrégation physique où les processus chimiques et biologiques n'interviennent que très peu. Cela se traduit par une couverture pédologique constituée de sols minéraux bruts ou peu évolués de faibles fertilités : texture sableuse, pauvres en matière organique, sans structure construite, faible capacité de rétention en eau, faible réserve en éléments nutritifs et sujets à une forte érosion éolienne. Les zones endoréiques, sans exutoires naturels, représentées essentiellement par les Oasis, où les sols sont plus évolués par la suite des pratiques d'une agriculture irriguée intensive.

La rationalisation des écosystèmes existants aussi bien que la mise en valeur ne peuvent être réalisées que par la maîtrise du continuum eau-sol-climat. Or, les eaux d'irrigation indispensables pour le développement agricole dans ces régions entraînent une évolution des sols et un changement de leur qualité. Parmi les facteurs de cette évolution, il y a lieu de citer le contexte topographique des zones irriguées, les techniques d'irrigation et surtout les caractéristiques des sols et des eaux. Dans un tel environnement (milieu très évaporant, endoréismes, sols peu fertiles) les eaux d'irrigation, quoique de composition variable selon leur origine (type d'aquifères et eaux de surface) sont de qualité médiocre et influencent fortement la qualité des sols avec des conséquences sur la productivité et sa durabilité CRSTRA, (2016).

L'Algérie est classée parmi les pays les plus déficitaires en eaux, en raison de son appartenance à la zone géographique du « Middle- Est and North Africa (MENA). La quasi-totalité de son territoire (plus de 85 %) est classée en zone désertique et sa pluviométrie moyenne annuelle est estimée à 89 mm (y compris le sud algérien). De ce fait, l'Algérie est classée parmi les 13 pays africains qui souffrent le plus du manque d'eau MOUHOUCHE, (2008). En Algérie, les zones arides sont caractérisées par des précipitations faibles très irrégulières, une évapotranspiration très importante, une végétation très clairsemée, des sols

pauvres et dégradés, des dépôts géologiques salifères et des nappes phréatiques ou artésiennes salées HALITIM, (1985).

La wilaya d'El Oued, nommée au par avant la ville de mille coupoles ayant une architecture unie et un paysage monotone caractérisé par les ghouts. MADRP, (2017).

Cependant, ces dernières années, la région a connu une métamorphose agricole et un développement conséquent de nouvelles cultures, notamment, les cultures maraîchères et essentiellement la pomme de terre irriguée par des pivots artisanaux conçus localement.

La wilaya d'El Oued est classée première zone productrice en pomme de terre au niveau national où elle alimente le marché national à environ 40% MADRP, (2017).

Mais la production est instable d'une année sur l'autre et d'une saison à une autre. Ceci est lié La salinité des sols agricoles est considérée parmi les principaux facteurs limitant du rendement de cette plante, plus particulièrement dans les wilayas de sud où les rendements moyens restent faibles varier entre 160-370 Qx/ha. DSA EL Oued, (2019).

Un défi principal que doit relever les agriculteurs dans les régions arides consiste à trouver des solutions pour combattre les effets néfastes de la salinité des sols et des eaux a la pomme de terre.

L'objectif principal de cette étude est de suivre les modifications de la composition originelle des sols en sels. Il s'agit de mesurer et d'analyser les compositions en sels des sols avant et après irrigation, ainsi que de quantifier leur degré de salinisation en fonction de la composition des eaux utilisées ainsi que de leur évolution au cours du temps. Cette évaluation est renforcée par la modélisation thermodynamique.

Aussi, l'objectif majeur vise à étudier dans un premier le volet d'évolution temporelle de quelques propriétés des sols sableux de trois périmètres de mise en valeur de la vallée d'oued-Souf irrigué et cultivés en pomme de terre. Ces périmètres sont mis en culture depuis 5 ans .

A cet effet, on se propose d'étudier les sols et les eaux de ces trois zones et analyser les changements induits par la mise en valeur en irrigué sur ces milieux.

La première zone (Ourmes) est située à 18 km à nord-ouest de centre-ville, elle est occupée par le maraîchage sous serre ainsi que les plasticultures et la culture de la pomme de terre. La deuxième zone de Reguiba est située à 35 km au nord- ouest de la ville d'El Oued, elle est occupée par le maraîchage sous serre, les plasticultures et la culture de la pomme de terre. Concernant la troisième zone (Trifaoui), elle est situé à 10 km au nord- est de centre-ville, elle est caractérisée par les plasticultures et la culture de la pomme de terre.

En utilisant l'expérimentation, le deuxième volet vise à prévoir les effets de la salinité du sol irrigué par une eau saumâtre à court, moyen et long terme.

Le présent document est structuré en quatre chapitres. Le premier chapitre porte sur le problème de salinisation des terres agricoles dans les régions arides et semi-arides. Le deuxième chapitre porte sur les caractéristiques physico géographiques et climatiques de la région d'étude. Le troisième chapitre porte sur l'étude expérimentale de salinisation des sols en termes agricoles

Ce document se termine par une conclusion dans laquelle qui résume les principaux résultats et les perspectives de cette recherche.

Première Partie



SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE



Chapitre I



***PROBLÈME DE SALINISATION
DES SOLS AGRICOLS DANS LES
RÉGIONS ARIDES
ET SEMI-ARIDE***



PROBLÈME DE SALINISATION DES SOLS AGRICOLS DANS LES RÉGIONS ARIDES ET SEMI ARIDE

Introduction :

Les sels des sols et des eaux, ont été reconnus comme un problème depuis des milliers d'années, particulièrement dans les régions arides et semi-arides où il n'y a pas suffisamment de pluie pour lessiver les sels au-delà de la zone racinaire.

1. Définition de la salinisation :

Il y'a plusieurs définitions de la salinisation :

- ✓ La salinisation est défini par SERVANT (1975), comme étant l'ensemble des mécanismes suivant lesquels le sol s'enrichit en sels solubles et acquiert, à un degré plus ou moins fort, le caractère salé. CHERBUY (1991) a ajouté qu'il s'agit d'un processus résultant de la migration des sels à travers le profil du sol et de leur accumulation, par précipitation en profondeur.
- ✓ MERMOUD (2001) indique que ce phénomène d'accumulation des sels solubles (en particulier le sodium) à la surface du sol et dans la zone racinaire, occasionne des effets nocifs sur les végétaux qui vont induire une diminution des rendements et une stérilisation du sol.
- ✓ La salinisation est un processus d'accumulation des sels à la surface du sol et dans la zone racinaire qui occasionne des effets nocifs sur les végétaux et le sol, il s'en suit une diminution des rendements, et à terme, une stérilisation des sols MERMOUD, (2006).
- ✓ FRANÇOIS (2008) a actualisé la définition de la salinisation comme étant un phénomène par lequel un sol devient sur salé. La salinisation résulte le plus souvent de l'irrigation de sols mal drainés sous climat aride. La stagnation de l'eau dans les couches superficielles du sol par défaut de drainage se traduit par une accumulation de sels dans les horizons les plus superficiels, car les mouvements ascendants, liés à la forte évaporation due au climat chaud et aride, excèdent de beaucoup l'infiltration et donc le lessivage.

2. Définition de la salinité :

Plusieurs auteurs ont défini la salinité des sols comme étant la présence de concentration excessive de sels solubles, ou lorsque les concentrations en Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} sous formes de chlorures, carbonates, ou sulfates sont présentes en concentrations anormalement élevées.

Un sol salé indique la prédominance de NaCl ASLOUM., (1990). La salinité des sols et des eaux, constitue un obstacle majeur sur la croissance des végétaux, dans les régions arides et semi-arides.

3. Dégradation de la qualité des sols dans les zones arides :

Actuellement, plus de 2/3 de la superficie du continent africain est couverte de zones fortement dégradées ou désertiques DIA et NIANG, (2012) in MINDA et al., (2015). La surexploitation des eaux souterraines, couplée au phénomène de la sécheresse, conduit inévitablement à la dégradation des sols et des eaux, qui se traduisent par des problèmes de salinisation, de codification et de détérioration de la structure des sols ELOUMLOUKI,(2014). Cette salinisation est considérée comme une cause majeure de désertification et constitue donc une forme grave de dégradation des sols HELLER et al., (1998) in MINDA et al., (2015).

La matière organique du sol est un indicateur important de la dégradation de la qualité des sols en raison de sa contribution dans la stabilité du sol, l'augmentation de la capacité de rétention en eau du sol, la fixation des éléments minéraux, et le substrat pour les micro-organismes du sol. Le contenu en matière organique des sols est influencé en gros par les facteurs climatiques, la végétation, la texture du sol, les conditions topographiques, influençant le microclimat et le drainage et les pratiques culturelles DROUET, (2010).

La présence de sels à la surface du sol est utilisée comme marqueurs de caractéristiques hydropédologiques. Ces sels solubles se précipitent à la surface du sol à partir des nappes peu profondes pendant la longue saison sèche. La salinisation est le processus qui accroît la quantité de sels dans les sols lorsque celle-ci est trop élevée, la plupart subissent un stress qui ressemble à celui provoqué par une sécheresse. L'alcalinisation se produit lorsque le pH du sol augmente à des valeurs supérieures à 8,2. Elle est souvent accompagnée du processus de sodisation ; lorsque le sodium est l'élément majoritaire adsorbé sur les argiles, il produit un cortège d'effet physique et chimique préjudiciable pour le sol et la plante BOUALLA et al., (2012).

La dégradation des sols par salinisation ou alcalinisation apparaît comme toile de fond à tous les aménagements hydroagricoles en zone aride ou semi-aride. Dans ces régions, les eaux soumises à une forte évaporation ont tendance à se concentrer et à se saler IRD, (2008). Une salinisation trop importante est accompagnée parfois d'une alcalinisation du complexe absorbant des sols. Ce sont là les types de dégradation la plus fréquente et couverts liés à la désertification.

Plus l'aridité est forte, plus l'irrigation est incontournable à la culture et plus son usage est risqué BOUALLA et al, (2012).

La dégradation des sols salés est souvent chimique, en fait c'est très compliqué et en même temps intéressant. Les différents anions et cations pèsent dans le milieu (SO_4^{-2} , NO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , etc.) co-précipitent de différente manière. Le pH du sol va être déterminé par les plus réfractaires à la précipitation. Ce sont ceux qui sont spécialement abondants et, en plus, spécialement solubles. Suivant les cas, on obtient toutes sortes de sels différents : chlorure, sulfates, carbonates, nitrates. Lorsque le sodium est en abondance dans l'eau, le sol a tendance de se flocculer.

Par contre, quand le sodium est abondant surtout au niveau de l'argile, le sol a une tendance à se disperser LEGROS, (2009).

La dégradation de la qualité des sols et des eaux à la suite de l'irrigation constitue un danger sérieux pour la durabilité de ce système d'exploitation des terres. Il est bien connu que la mise en valeur agricole sous irrigation dans les zones arides conduit le plus souvent à la dégradation de la qualité des sols LARSON et PIERCE, (1992) ; BOUALLA et al., (2012).

4. Problèmes de l'agriculture dans les zones arides (aridoculture) :

Les régions sahariennes sont situées sous un climat hyper aride, avec de fortes contraintes du point de vue biotique et édaphique. La pédogenèse en dehors des zones endoréiques est limitée à une désagrégation physique où les processus chimiques et biologiques n'interviennent que très peu. Cela se traduit par une couverture pédologique constituée de sols minéraux bruts ou peu évolués de faibles fertilités : texture sableuse, pauvres en matière organique, sans structure construite, faible capacité de rétention en eau, faible réserve en éléments nutritifs et sujets à une forte érosion éolienne. Dans les zones endoréiques, sans exutoires naturels, représentées essentiellement par les Oasis, les sols sont plus évolués par la suite des pratiques d'une agriculture irriguée intensive. Ils sont plus riches, en matière organique, en éléments fins et en éléments nutritifs, avec des structures construites, mais sujettes à un fort hydromorphe et à une salinisation limitant leurs productivités CRSTRA, (2016).

L'aridoculture est le développement d'une agriculture qui prend en compte la faible quantité de précipitations, la nature fossile des eaux souterraines et la fragilité des écosystèmes généralement peu productifs dans des régions. Il faut être techniquement et économiquement performant pour répondre aux besoins de la société et être respectueux de l'environnement et durable. HALITIM, (2006).

Le travail agricole est difficile dans ces régions. Ils nécessitent des connaissances approfondies et des mesures de précaution importantes. En effet, de nombreuses pratiques agricoles se sont avérées inadaptées à l'environnement et à la durabilité de l'agriculture, notamment la désertification, l'érosion, la salinisation, l'hydromorphie, la montée des nappes superficielles, la pollution, la diminution de la biodiversité, la baisse de la fertilité des terres, la prolifération des maladies, entraînant ainsi une chute des rendements des cultures, ainsi que la non-maîtrise CRSTRA, (2016)

Dans les régions arides, la contrainte environnementale majeure qui limite la production agricole est la sécheresse et les températures élevées, d'où l'agriculture est exclusivement menée dans des périmètres irrigués où la plupart des sols sont des formations calcaires, gypseuses et des sols peu évolués d'apport éolien. Néanmoins, au vu du taux de salinité relativement élevé qui caractérise les eaux souterraines dans ces régions, les agriculteurs sont confrontés à un épineux problème de la remontée des sels qui accélère la baisse du rendement des terres mises en valeur. Ce qui à long terme risquerait l'exode des populations de ces régions MOSTEPHAOUI, (2014).

Selon DUBOST, (2002) et HALITIM, (2011), l'aridoculture est confortée aux contraintes climatiques :

- ✓ Des pluies insuffisantes (Inférieures à 400mm/an) et irrégulières (déficit hydrique) mal réparties dans le temps et dans l'espace. Elle tombe souvent sous forme d'orage (inondation ruissellement et érosion), et parfois même en grêle (accident météorologique sur les cultures) ;
- ✓ Des températures élevées avec de grandes amplitudes thermiques, ce qui augmenterait l'évapotranspiration qui provoquerait une salinisation suivie d'une dégradation de la matière organique... etc.);
- ✓ Des vents fréquents et violents, parfois chauds (érosion éolienne, désertification, formation du paysage dunaire, menace des agglomérations, infrastructure et zones agricoles).

Les contraintes hydriques les plus importantes dans ces zones, à la fois agronomiques et environnementales, sont les suivantes : Les ressources hydriques insuffisantes d'origine souterraine et souvent fossiles ont un coût d'exploitation élevé, sont généralement de qualité médiocre à saler, provoquent une dégradation de la qualité du sol (salinisation, sodisation, changement de faciès géochimique), les eaux ont une forte température pouvant atteindre 55 °C et nécessitent un équipement pour refroidir KHADRAOUI, (2006). Le développement d'une agriculture saharienne moderne et à grande échelle, pouvant contribuer de manière

significative à la réduction de la facture alimentaire, nécessite la mise en place d'une véritable politique nationale en la matière et la mobilisation de moyens financiers, matériels, techniques et scientifiques adéquats. Ce développement saharien passe impérativement par la maîtrise des intrants essentiels et fondamentaux qui sont l'eau et le sol KHADRAOUI, (2010).

5. Origine de la salinité et les mécanismes de la salinisation des sols :

L'accumulation des sels dans les sols s'est effectuée grâce à plusieurs fractions, dont les principaux sont :

5.1. Salinisation primaire ou naturelle :

Des roches parentales (des matériaux primitifs) plus ou moins salées, résultant du processus d'altération de ces roches J.H.DURAND, (1983) et la migration et le dépôt des sels dissous dans l'eau dépendent des caractéristiques du milieu naturel et des précipitations. Dans les régions arides ou semi-arides, le lessivage et le transport en profondeur des sels dissous n'existent plus et l'évapotranspiration importante favorise la concentration des sels dans le sol A.LALLEMAND BARRES, (1980).

5.2. Salinisation secondaire :

Elle résulte de divers facteurs dont l'irrigation avec :

- ✓ Les eaux d'irrigation ou les eaux superficielles et les nappes d'eau souterraines, en milieu mal drainé ;
- ✓ L'inondation par des eaux de la cuvette où elles stagnent et s'évaporent ;
- ✓ La très forte évaporation et la concentration des sels dans le temps ;
- ✓ La remontée d'une nappe phréatique (par capillarité) formée par des eaux salines ;

La salinisation et l'alcalinisation sont des processus de dégradation des sols en temps et en dynamique de l'espace qui réduisent l'étendue et la productivité des terres agricoles. Les résultats de la salinisation de la concentration et la précipitation des sels solubles dans l'eau tels que les chlorures, les sulfates et les carbonates de sodium, de magnésium ou de calcium sur la surface du sol, dans le sous-sol et les eaux souterraines. L'alcalinisation implique un enrichissement en ions sodium.

Trois types de sols affectés par le sel et sont généralement distingués sur la base de leurs caractéristiques chimiques et physiques: les sols salins, les sols salins-alcalins et alcalino-terreux ou les sols sodiques. Une distinction entre la salinisation primaire, en développement en raison de facteurs géologiques, climatiques, topographiques et hydrologiques sans intervention humaine, et par opposition la salinisation secondaire, elle résulte des activités humaines, dont principalement l'irrigation. G.METTERNICHT, (2001) ; M.DOSSO, (1980).

6. Classification des sols salés :

Selon Duchaufour (1983), deux sous classes de sols halomorphes sont distinguées:

6.1. Sols à complexe sodique ou sols alcalins (les solonetz) :

Caractérisés par une saturation marquée en Na et une accumulation des sels en profondeur. Ces sols se caractérisent par la présence d'une quantité importante de sodium qui dépasse les 15 % de la C.E.C (Capacité d'Échange Cationique). La conductivité électrique (C.E) ne dépasse pas 4 ds/m à 20°C, et le pH est supérieur à 8.5. La relative abondance de l'ion sodium, dans la garniture ionique absorbante, peut avoir deux origines soit provenir du sodium libéré par l'altération de certains minéraux alcalins ou un résultat d'une saturation progressive du complexe en sodium, aux dépens d'une solution saline DUCHAUFOUR, (1983). Ces sols ont un profil peu stable, en raison de la grande facilité de dispersion des argiles, ils sont asphyxiants plutôt que physiologiquement secs.

6.2. Sols salins à complexe calcique (Solontchaks) :

Caractérisés par une accumulation marquée des sels solubles en surface. Ces sols se rencontrent dans les zones à climat sec. Ils se caractérisent par un pH généralement inférieur à 8.5 et supérieur à 7 et le sodium n'y forme pas plus de 50% des cations en solution DAJOZ, (1982). La conductivité électrique de l'extrait aqueux à saturation, est supérieurs à 4.5 ds/m à 25°C, dans les horizons de surface (25 cm); 15 ds/m dans les horizons inférieurs (suivant la texture) DUCHAUFOUR, (1983); avec un taux de sodiuméchangeable (E.S.P) inférieur à 15% de la C.E.C du sol. Ces sols présentent une structure non dégradée, caractérisés par une richesse en sels solubles, tels qu'ils inhibent la croissance de la plupart des plantes cultivées AUBERT, (1978).

7. Extension et localisation de la salinité :

7.1. Terres irriguées en Algérie :

Les terres potentiellement irrigables s'élèvent à 1154000 ha (hors Sahara) dont 607000 ha facilement irrigables et 547000 ha irrigables, moyennant des travaux. Les superficies concernées par la grande hydraulique, essentiellement les périmètres irrigués varient entre 50 et 90000 ha, celles relatives à la moyenne et petite hydraulique vont de 230 à 260000 ha dont 3 % desservies par les retenues collinaires, 42 % par les puits, 20 % par les forages, 3 % par les sources et 8 % au fil de l'eau. Par ailleurs, sur un total de 512700 ha irrigués ANONYME, (1993), les quatre wilayas du Sud s'accaparent 30 % de la SAU irriguée. La wilaya de Biskra occupe la première place avec 13,24%, suivie de la Wilaya de M'sila avec 5,64% puis la Wilaya d'Adrar avec 5,54%, et celle d'El Oued avec 5,3%. Ce sont particulièrement ces zones d'irrigation qui nécessitent une rénovation de leur technique d'irrigation HALILAT, (2004).

7.2. Terres irriguées au Sahara algérien :

En 1998, l'agriculture irriguée dans tout le Sahara algérien aurait dépassé les 150.000 ha, réparties sur 60 000 ha de palmiers dattiers, 30 000 ha de maraîchage et 60 000 ha de céréales. La superficie actuellement irriguée dans la zone qui utilise les eaux du continental intercalaire (C.I) et du continental terminal (C.T) est d'environ 100.000 ha. L'évolution de la consommation en eau pour l'irrigation des périmètres irrigués n'a pas été linéaire du fait des changements de stratégies intervenues au cours des trente dernières années HALILAT, (2004).

8. Sels solubles :

8.1. Définition des sels solubles et la solubilité (S) :

Selon HALTIM (1978), les sels solubles comprennent tous les sels qui sont plus facilement solubles dans l'eau que le gypse. La conductivité électrique, qui représente la conductivité électrolytique, est généralement utilisée pour indiquer leur concentration globale.

La solubilité d'une espèce chimique, est la quantité maximale que l'on peut dissoudre dans 1 litre d'eau pure à la température considérable. Elle s'exprime en mol/L ou g/l. La solubilité est atteinte quand on ne peut pas dissoudre de solide, le solide coexiste avec ses ions en solution, la solution est dite saturée et le solide non dissous est appelé précipité.

Le produit de solubilité K_s est le produit des concentrations des espèces dissoutes à l'équilibre, portées à la puissance de leurs coefficients stoechiométriques respectifs. Plus le K_s est grand, plus le sel est soluble.

8.2. Principaux sels solubles dans le sol :

8.2.1. Sels chlorurés :

Avec les sulfates, ce sont les principaux responsables de la formation des sols salés .En général, ils ont une solubilité très élevée et donc une forte toxicité (HULIN, 1983).

- ✓ **NaCl** : est le plus commun et le plus répandu des sels. Sa solubilité est de l'ordre de 300 g/L, fait de lui un sel hautement toxique.
- ✓ **KCl** : proche du NaCl , mais peu répandu
- ✓ **MgCl₂** : est un sel relativement rare, sauf dans des cas de forte salinité. Sa solubilité, est de l'ordre de 350 g/L, fait de lui un sel de toxicité extrêmement élevée.
- ✓ **CaCl₂** : généralement, est un sel qui réagit avec Na_2SO_4 , et Na_2CO_3 pour former du CaSO_4 ou CaCO_3 peu solubles. Il n'est donc présent, en principe, que de manière éphémère ou si vraiment il y a une très forte salinité.

8.2.2. Sels sulfates :

Les sels de l'acide sulfurique se trouvent en quantités variables dans presque tous les sols. La conséquence de ces sels sur l'agriculture et la mise en valeur varie beaucoup avec leur composition chimique FAO-UNESCO, (1967).

- ✓ **Gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)** : est la forme la plus répandue, est un sel peu dangereux du fait de sa faible solubilité (1,9 g/l). Sa seule action néfaste pour une culture, pourrait plutôt être de type mécanique. Il est utilisé comme amendement pour l'amélioration de certains sols alcalins.

Dans certaines régions, caractérisées par un climat chaud (le Chili, le Sahara), le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) devient déshydraté et se transforme en une masse poudreuse.

- ✓ **MgSO_4** : est un composant typique des sols salés .on le trouve souvent présent dans les eaux souterraines.
- ✓ **Na_2SO_4** : Son action dépend de la saison. En effet, sa toxicité peut être légèrement limitée par la température qui influence assez fortement sa solubilité.
- ✓ **K_2SO_4** : est un sel très proche de Na_2SO_4 .

8.2.3. Sels carbonatés et bicarbonates :

Les sels de l'acide carbonique sont très répandus dans les sols. Le rôle de ces sels dépend très largement de la quantité des sels avec lesquels ils s'accumulent dans le sol, de leurs degrés de solubilité et de toxicité pour les plantes et leurs effets sur l'eau FAO-UNESCO, (1967).

- ✓ **CaCO_3** : sa solubilité est très faible, de l'ordre de 0.031 g/l. En présence de H_2CO_3 , il donne du $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ lequel est légèrement plus soluble (0.14 g/l).

Remarque : si l'on se base sur le manuel de IDDER, (2015) la solubilité se manifeste à partir de 10³ ml de solvant pour 1g de carbonate de calcium.

- ✓ **MgCO_3** : sa solubilité est plus élevée, il réagit avec H_2CO_3 pour former le $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ augmentant aussi sa solubilité.
- ✓ **Na_2CO_3** : est un sel très toxique à la fois par sa solubilité et par son alcalinité.
- ✓ **K_2CO_3** : mêmes propriétés que le Na_2CO_3 il est très rare dans la nature.

8.3. Propriétés des sels solubles :

8.3.1. Paramètres influençant la solubilité :

La solubilité d'un sel est fonction de nombreux paramètres entre autres, on peut citer :

- ✓ **Température** : La solubilité de certains sels augmente rapidement avec la température, tandis qu'elle varie peu pour d'autres.

- ✓ **Force ionique** : La solubilité d'un sel donné augmente avec la racine carrée de la force ionique.
- ✓ **pH** : l'acidité pourra être un facteur de solubilité. Ainsi, dans un milieu acide, on pourra assister à une augmentation de la solubilité du gypse pour la formation d'ions HSO_4 (POUGET, 1968).
- ✓ **Présence d'autres sels** : PASCAL (1962) et HALITIM (1985) a montré que la dissolution du sulfate de calcium augmente avec la concentration de Na Cl dans la solution jusqu'à une certaine limite. Inversement, la solubilité d'un électrolyte diminue lorsqu'on introduit dans sa solution des ions de même espèces. Cette règle n'est infirmée que si l'un des ions initialement présent dans la solution se combine avec les ions que l'on introduit pour former des ions complexes (GLINKA, 1981).

A ce sujet, BERRAFA (1984), a également montré que la solubilité du gypse augmente plus fortement en présence du bivalent (Mg^{2+}) que du monovalent (Na^+). Si l'anion accompagnateur est le chlorure, cependant, sous l'effet d'ion commun (sulfate), la réduction de la solubilité est plus marquée en présence d'un bivalent (Mg^{2+}) que d'un monovalent (Na^+).

9. Les problèmes de la salinité:

9.1. L'action des sels sur les propriétés du sol:

L'effet de la salinisation sur les végétaux est semblable à celui de la sécheresse: à mesure que la concentration des sels dissous augmente, la capacité des racines d'absorber à la fois l'eau et les éléments nutritifs diminue. À des concentrations élevées de sels, la croissance normale des plantes cultivées est limitée et le rendement des cultures est réduit. Par exemple, une salinité modérée à élevée peut réduire d'au moins 50% le rendement de la plupart des céréales et des oléagineux. Dans des cas isolés, selon le type de sels présents, la toxicité peut être attribuable au bore, au sodium ou au chlorure.

9.1.1. Les effets des sels sur les propriétés physiques du sol:

SIGALA et al. (1988), ont constaté que le sodium échangeable influe sur le taux de dispersion des argiles, donc la présence des sels transforme profondément l'évolution du sol, elle influence en particulier:

- ✓ Les rapports sol- eau ;
- ✓ Les propriétés physiques du sol, structure, porosité, perméabilité donc circulation des solutions ;
- ✓ L'état physique de certains éléments - en solution - pseudo - solution ou dispersion et par conséquent les possibilités de leurs migration.

Les différentes recherches menées jusqu'à présent concernant les effets des sels sur les propriétés des sols ont concerné principalement la perméabilité et la stabilité structurale.

9.1.2. Les effets des sels sur la stabilité structurale:

La dégradation de la structure du sol par la salinisation modifie la circulation de l'eau de pluie ou d'irrigation ou de ses solutions.

La stabilité d'un sol dépend des cations mis en jeu pour la saturation du complexe et le taux d'agrégats stables est décroissant suivant les cations fixés sur le complexe absorbant $Ca^{2+} < Mg^{2+} < K^+ < Na^+$. La stabilité structurale décroît dans les sols dès que, le taux de sodium échangeable atteint 12 à 15% DUTHIL, (1973). Le Na^+ par son pouvoir gonflant et dispersant d'argiles réduit la macro porosité. HENIN et al, (1969) n'ont constaté que l'ion Na^+ conféré à un sol enrichi en solution une plus grande capacité que sur un sol environnant et l'enrichissement en ion K^+ modifie relativement par la structure.

Le taux d'agrégats stables est lié ainsi à la garniture ionique et au type d'argile dont la stabilité est liée au potentiel électrique.

En outre, DAOUD (1978) et MARIH (1990), interprète cette liaison de la façon suivante :

- ✓ Si le potentiel électrique est élevé, les particules se repoussent en se dispersant et le taux d'agrégats stable est très faible (complexe à faible teneur en Na^+) ;
- ✓ Si le potentiel électrique demeure bas, les particules s'attirent, s'agglomèrent en formant des flocons, c'est le phénomène de floculation qui donne naissance à des agglomérats stables (complexe saturé avec le Ca^{2+}).

Une eau pure n'est bonne pour irriguer que si le sol est dépourvu de sels ou est à la rigueur salin. S'il est sodique et argileux, qu'il peut s'imperméabiliser.

Dans ce cas, une eau fortement minéralisée, par exemple l'eau de mer, peut être utilisée pour éliminer l'essentiel du sodium de la CEC. Après quoi, sur le long terme, on passe l'irrigation avec une eau qui idéalement, est légèrement saline et riche en calcium.

Il vaut mieux éliminer le sodium de la capacité d'échange en plusieurs fois, c'est plus efficace et il faut moins d'eau car, entre deux irrigations lessivant, l'équilibre avec la solution du sol se rétablit, ce qui veut dire désorption du sodium. Alors cet ion en solution peut être éliminé plus facilement par l'apport d'eau suivant JEAN- PAUL LEGROS, (2007)

9.1.3. L'effet des sels sur la perméabilité:

La conductivité hydraulique est l'une des propriétés physiques indispensable en agriculture irriguée, cette propriété dépend des conditions chimiques de la solution du sol. La circulation de l'eau dans les sols salins dépend surtout en saison sèche essentiellement de leur texture et

de leur structure, elle devient difficile dès que, le sol est saturé, elle se fait très lentement par diffusion.

La réduction de la perméabilité des sols salés est une conséquence directe de la dispersion des colloïdes par le sodium échangeable.

La diminution de la perméabilité est fonction de l'ion accompagnateur du sodium, elle diminue dans le sens suivant :

$\text{CO}_3^{2-} > \text{HCO}_3^{2-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ SERVANT (1971) signalait que le sodium réduit la percolation alors que le K^+ l'augmente. Par contre les sols saturés par le Ca^{2+} ont une meilleure perméabilité que ceux saturés par le Na^+ et K^+ .

Selon RICHARDS (1954), deux facteurs jouent ou régissent la diminution de la perméabilité :

- Le gonflement des particules d'argiles, causant la diminution de la taille des pores larges dans le système ;
- La dispersion des argiles provoque ainsi l'obstruction des pores et des canaux dans le sol.

9.1.4. L'action des sels sur la rétention de l'eau:

Possédant des éléments hygroscopiques, les sols salés peuvent rester humides même en saison sèche, mais selon HALITIM (1973), en raison du potentiel osmotique de la solution du sol, cette réserve hydrique n'est pas toujours disponible.

9.2. Influences des sols salés sur les plantes:

La Salinisation est définie par la FAO (2001), comme un enrichissement en sels solubles de la surface et de la tranche supérieure du sol lorsque la salinité dans les 20 cm sommitaux dépasse 1 à 2% (20g de sel par Kg de sol).

Les conséquences d'un stress salin peuvent résulter de trois types d'effets que le sel provoque chez les plantes :

- ✓ Le stress hydrique : une forte concentration saline dans le sol est tout d'abord perçue par la plante comme une forte diminution de la disponibilité en eau. Cela nécessite un ajustement osmotique.
- ✓ Le stress ionique : en dépit d'un ajustement osmotique correct, la toxicité ionique survient lorsque l'accumulation de sels dans les tissus perturbe l'activité métabolique.
- ✓ Le stress nutritionnel : des concentrations salines trop fortes dans le milieu provoquent une altération de la nutrition minérale. En particulier, vis-à-vis des transporteurs ioniques cellulaires, le Sodium entre en compétition avec le Potassium et le Calcium, les chlorures avec le nitrate, le phosphate et le sulfate.

La salinité du sol ou de l'eau est causée par la présence d'une quantité excessive de sels. Généralement un taux élevé de Na^+ et Cl^- cause le stress salin. Le stress salin a un triple effet: il réduit le potentiel hydrique, cause un déséquilibre ionique ou des perturbations en homéostasie ionique et provoque une toxicité ionique. Cet état hydrique altéré conduit à une croissance réduite et limitation de la productivité végétale. Depuis que le stress salin implique aussi bien le stress osmotique qu'ionique, l'arrêt de la croissance est directement relié à la concentration des sels solubles ou au potentiel osmotique de l'eau du sol.

La salinité est un facteur environnemental très important qui limite la croissance et la productivité.

Durant le début et le développement du stress salin à l'intérieur de la plante, tous les processus majeurs tels que : la photosynthèse, la synthèse des protéines, le métabolisme énergétiques... sont affectés. La première réponse est la réduction de la vitesse d'extension de la surface foliaire, suivi par l'arrêt de l'extension avec l'intensification du stress. (PARIDA et Das, 2005)

10. Tolérance des plantes aux sels:

La tolérance aux sels est un phénomène complexe qui varié avec les espèces, les variétés et le stade de développement des plantes. Les plantes les plus tolérantes sont appelées halophytes. Ces dernières ont une aptitude à développer des pressions osmotiques suffisamment élevées pour compenser la pression osmotique de la solution du milieu extérieur (BOUGENDRE, 1973). Par contre de nombreuses plantes sont sensibles aux sels et leur croissance est affectée par le niveau de salinité du sol (Annexe 1). Il est à noter que la tolérance au sel est habituellement déterminée en termes de décroissance ou de rendement (MAAS et al, 1977 ; SHANNON, 1984 in ZAMAN ALLAH et al, 2009)

11. Salinité de l'eau d'irrigation:

L'eau d'irrigation contient un mélange de sels dont la présence est naturelle. Les sols irrigués avec cette eau contiendront un mélange semblable caractérisé par une concentration en sel plus élevée.

11.1 Les critères d'évaluation d'une qualité d'eau d'irrigation:

Souvent, on évalue la qualité d'une eau d'irrigation en se basant sur deux critères essentiels : la salinité exprimée par la conductivité électrique (CE_i) et le SAR.

11.1.1. La salinité:

Un excès de sel augmente la pression osmotique de l'eau du sol et provoque des conditions qui empêchent les racines d'absorber l'eau, ce qui rend la salinité un critère important. La sécheresse physiologique est causée par ces conditions. Même si le sol semble humide, les plantes flétrissent

parce que les racines n'absorbent pas suffisamment d'eau pour remplacer l'eau perdue par l'évapotranspiration.

Les sels de calcium (Ca^{2+}), de magnésium (Mg^{2+}), de sodium (Na^+), de potassium (K^+), les chlorures (Cl^-), les sulfates (SO_4^{2-}) et les bicarbonates (HCO_3^-) sont les principaux sels responsables de la salinité de l'eau. La salinité élevée signifie une grande quantité d'ions en solution, ce qui rend plus difficile pour la plante d'absorber l'eau et les minéraux.

La salinité d'une eau d'irrigation peut être mesurée de deux manières : soit par le total des sels dissous dans l'eau (TDS), qui est exprimé en g/L, soit, plus couramment, par la Conductivité électrique (CEi), qui est exprimée en déci-siemens/mètre (dS/m). La classification des eaux d'irrigation suggérée par l'United States Department of Agriculture (USDA) (Harivandi, 1999).

Tableau 1. Classification des eaux d'irrigation proposée par (USDA)

Nomination	Classe	Interpretations
Classe 1 (C1)	< 0,25 dS/m	Risque faible
Classe 2 (C2)	0,25 dS/m à 0,75 dS/m	Risque moyen
Classe 3 (C3)	0,75 S/m à 2,25 dS/m	Risque élevé
Classe 4 (C4)	2,250 dS/m à 5 dS/m	Risque très élevé
Classe 5 (C5)	>5 dS/m	Non utilisable en irrigation

Source : Harivandi, 1999

11.1.2. Le SAR ou la teneur en sodium:

Parmi les sels dissous dans l'eau, le sodium (Na^+) requiert plus d'attention. De fortes concentrations en sodium peuvent être dommageables pour la plante en place en modifiant les conditions physiques du sol (Glover, 1996). Par ailleurs, dans la littérature on ne parle pas de concentration en sodium, mais plutôt d'une valeur qui tient compte des effets mutuels du sodium, du calcium et du magnésium. Il s'agit du ratio d'adsorption du sodium par le sol, le SAR (Sodium Adsorption Ratio). Le SAR est calculé selon la formule proposée par Gapon (1933) rapporté par Richard (1954).

$$SAR = \left[\frac{(\text{Na}^+)}{\sqrt{\frac{(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})}{2}}} \right]$$

Ca^{2+} , Mg^{2+} et Na^+ sont exprimés en meq/l.

Le sodium agit au niveau de la défloculation du sol argileux, ce qui entraîne une diminution de la macroporosité (air) et du taux d'infiltration de l'eau. À l'aide du SAR, on divise les eaux d'irrigation en quatre classes. La classification est basée principalement sur l'effet du sodium sur les paramètres physiques du sol (Tableau 2) (Richards, 1954).

12. Méthodes d'irrigation et salinité :

Le choix de la méthode d'irrigation avec l'eau salée dépend :

- ✓ La distribution des sels et l'eau dans le sol
- ✓ La sensibilité des plantes au mouillage foliaire
- ✓ La fréquence d'irrigation

Le mauvais choix de la méthode d'irrigation non seulement aggrave la salinisation du sol mais aussi peut créer des problèmes de drainage (HAMDY, 2001b)

12.1. L'irrigation de surface :

Les sels s'accumulent généralement au-dessous de la zone racinaire, mais cela dépend des conditions de lessivage. En utilisant des cuvettes ou des planches d'irrigation, la teneur en salinité augmente dans la couche supérieure entre deux irrigations et diminue tout au long de l'irrigation. En irriguant à la raie, les sels se rassemblent au centre du billon, en particulier dans la partie supérieure, ce qui nécessite une attention particulière au lit de semences.

12.2. L'irrigation par aspersion :

Cependant, lorsque l'eau salée est utilisée, le problème de l'aspersion est le risque de brûlure des feuilles, mais les cultures ne sont pas toutes aussi sensibles.

Lorsque la quantité de Na et de Cl dans l'eau dépasse 3 meq/l, l'arboriculture et les ornements sont vulnérables à l'aspersion. En revanche, les cultures annuelles sont plus vulnérables à 15 à 20 ou 30 meq/l (AYERS, 1976 ; AYERS et WESTCOT, 1985).

Selon ABDELJAOUAD (1996), il est déconseillé d'utiliser l'aspersion si l'eau utilisée contient plus de 20 meq/l de Na et de Cl. En ce qui concerne son impact sur le sol, il a également tendance à causer une importante salure des couches superficielles (BOUGENDRE, 1973).

Au Sahara algérien, l'utilisation d'eau salée sous pivot a entraîné une salinisation des sols, en particulier dans la couche superficielle (DAOUD et HALITIM, 1994). Selon MOUHOUCHE (2000), les sols sous pivot du Sahara ont une CE de 6 ds/m au début de la campagne à plus de 24 ds/m à la fin de la campagne.

12.3. L'irrigation goutte à goutte :

La micro-irrigation a le potentiel de réduire les coûts de la ressource en eau, de l'énergie utilisée pour le pompage et de la fertilisation (ZELLA et KETTAB, 2003). L'introduction de l'irrigation goutte à goutte a donné un grand avantage à l'utilisation de l'eau salée (AYERS, 1976 ; HAMDY, 2001b ; HAMDY et RAJAB, 2001). En effet, les feuilles ne sont pas mouillées et la zone du sol sous les racines est toujours humide, ce qui empêche la concentration et l'accumulation des sels.

Cependant, entre les goutteurs et le front d'humectation, des sels s'accumulent sur la surface (YARON et al., 1973 in HAMDY, 2001b ; AYERS, 1976 ; HAMMOUDI, 1999).

Les racines des plantes tendent à se concentrer dans la zone lessivée à proximité des goutteurs, évitant ainsi les sels accumulés au front d'humectation (HAMDY, 2001a). Par rapport aux autres méthodes d'irrigation, une salinité élevée de l'eau d'irrigation peut être tolérée en irrigation goutte à goutte (HAMDY, 2001b). En effet, l'irrigation fréquente maintient l'eau du sol à 50 % de l'eau utile, ce qui réduit l'impact du potentiel osmotique (YAZAR et al, 2003). Dans le cas où l'eau doit être salée, l'irrigation goutte à goutte peut également donner des récoltes meilleures que les autres types d'irrigation (AYERS, 1976). L'irrigation goutte à goutte a donné les rendements les plus élevés et un calibre de tomate amélioré en conditions salines par rapport à l'irrigation à la raie (CHELOUFI et al, 2001 ; FLAWRES et al, 2003) . MASMOUDI (2000) a découvert que les cultures maraîchères irriguées au goutte à goutte avaient un rendement plus élevé de 3 à 36 % par rapport aux cultures irriguées à la raie en fonction de la salinité de l'eau, qui était de 2 à 6 ds/cm. Par conséquent, l'irrigation goutte à goutte (HAMDY et al., 1995) a produit une production nettement supérieure que l'irrigation de surface avec une eau de CE9 ds/m. En comparaison avec l'aspersion avec de l'eau salée, des résultats similaires ont été obtenus (CTGREF, 1979). Le besoin d'enlever les sels accumulés sur la surface et le front d'humectation est le principal problème de l'irrigation à goutte à goutte (HAMDY, 2001a). Les nouvelles cultures peuvent être menacées par les sels accumulés s'ils ne sont pas préalablement lessivés (AYERS et WESTCOT, 1985). Ainsi, l'accumulation progressive des sels d'une campagne à une autre sans lessivage peut entraîner une salinisation importante du sol. Selon (HACHICHA et HALLAIRE, 2002), les effets des méthodes d'irrigation localisée sont peu étudiés, en particulier dans les eaux abondantes en sels.

13. Salinisation causée par l'irrigation:

En générant un apport d'eau supplémentaire, l'irrigation altère le bilan hydrique du sol et cet apport est toujours associé à un apport de sels. En effet, même la meilleure eau douce contient des sels dissous. Même si la quantité de sels apportée par cette eau peut sembler minime, les quantités d'eau apportées au fil du temps peuvent entraîner un dépôt cumulé de sels dans les sols qui peut être considérable (IPTRID, 2006 ; FORGES, 1972). L'eau pure est évaporée, mais les sels restent et s'accumulent. Dans les zones arides, l'impact est plus évident car les eaux de surface et les eaux souterraines sont relativement riches en sels car l'eau s'est infiltrée dans des sols contenant généralement des minéraux facilement altérables. De plus, le climat sec entraîne une

demande évaporative élevée, ce qui nécessite de grandes quantités d'eau pour l'irrigation des cultures (LAABOUDI, 2001).

Près de 50% des terres irriguées salinisées se trouvent dans la zone aride. Environ 10% de la salinisation causée par les humains représente la salinisation des terres irriguées salinisées, ce qui représente 20% des terres salinisées (IPTRID, 2006).

14. Conclusion:

L'extension de la salinité des sols prend des proportions alarmantes et conduit à la diminution de la production agricole et à long terme à la stérilité des sols. La gestion rationnelle des ressources en eau et en sols à grande échelle est nécessaire pour préserver la fertilité des sols et prévenir le phénomène de salinisation. La maîtrise du couple irrigation - drainage, l'introduction de techniques d'irrigation appropriées au contexte saharien avec un choix judicieux des plantes résistantes à la salinité est primordiale pour une gestion rationnelle des ressources hydriques et édaphiques. Ce qui permet ainsi d'assurer la durabilité des systèmes de production agricole.

Deuxième Partie



MÉTHODOLOGIE ET RÉSULTATS



Chapitre II



CARACTÉRISTIQUES PHYSICO GÉOGRAPHIQUE ET CLIMATIQUES DE LA RÉGION D'ÉTUDE



CARACTÉRISTIQUES PHYSICO GÉOGRAPHIQUES ET CLIMATIQUES DE LA RÉGION D'ÉTUDE

Introduction

La wilaya d'El Oued est située au Sud-Est du pays au centre d'une grande cuvette synclinale. Elle est située à environ 700 Km au Sud-est d'Alger et à 350 Km à l'Ouest de Gabes (Tunisie). Elle devint une commune depuis 1957, une wilaya depuis janvier 1984 ce découpage a pour but de faciliter les conditions de vie sociale.

Le Souf vient du nom berbère désignant rivière ou Oued. A l'origine de l'activité principale des habitants de la région était l'agriculture. Les cuvettes (Ghouts) sont creusés par les agriculteurs et dans lesquelles sont plantés leurs palmiers, permettaient à ces derniers de puiser l'eau dont il avait besoin pour leur développement à partir de la nappe phréatique qui était tout proche.

Cette méthode facilitait la tâche à l'agriculteur, elle lui évitait donc l'irrigation des palmiers.

1. Cadre géographique :

1.1. Situation géographique de la région d'Oued Souf :

La zone d'étude est située dans la wilaya d'El Oued, l'une de principales oasis du Sahara septentrional algérien. Elle est située au sud-est de l'Algérie, à une distance de 650 km de la capitale, au nord-est du Sahara septentrional. Elle occupe une superficie de 44.586 km², et est limitée par les wilayas de Biskra, Khenchela et Tebessa au nord, au nord-est par la wilaya de Djelfa, au sud et sud-est par la wilaya d'Ouargla, et à l'est par la frontière tunisienne. Traditionnellement, les limites des oasis du Souf sont l'erg oriental jusqu'aux abords du Chott Melghir, où s'étire une masse de palmeraies limitée à l'Est par la frontière tunisienne et à l'ouest par l'immense oasis de l'Oued Righ. Les limites de cette oasis atteignent la frontière libyenne au sud (VOISIN,2004).

Cette région se trouve à une altitude moyenne de 80 m, accusant ainsi une diminution notable du sud au nord pour être à 25 m au-dessous du niveau de la mer dans le chott Melghir qui occupe le fond de l'immense bassin du Bas Sahara. Elle possède des dunes qui dépassent parfois les 100 m de hauteur (A.N.R.H., 2009).

La région d'étude s'étend sur 18 communes (El Oued, Bayadha, Robbah, Kouinine, Guemar, Taghzout, Hassani Abdelkrim, Debila, Sidi Aoun, Hassi Khelifa, Reguiba, Mihouensa, Oued Alenda, Oglia, Nakhla, Magrene, Ourmes et Trifaoui), avec une superficie d'environ 3500

Km². Elle est limitée par les coordonnées géographiques suivantes : Longitudes 05°30'' et 07°00'' Est et Latitudes 35°30'' et 37°00'' Nord (Figure 1). Elle tire son originalité de son architecture typique, caractérisée par les coupoles et par ses palmeraies plantées dans les Ghouts.

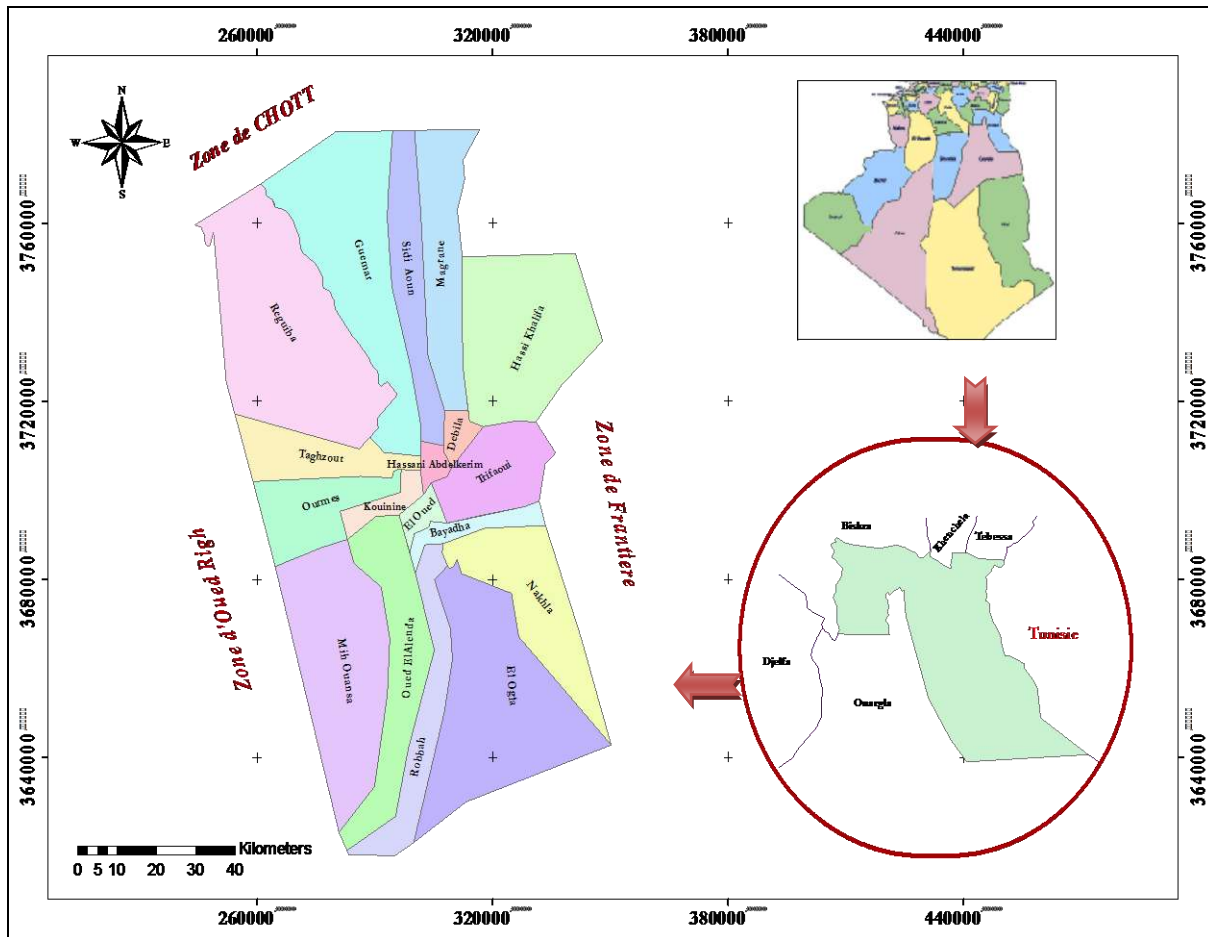


Figure 1. Situation géographique de la zone d'étude.

1.2. Les peuplements de la région d'Oued Souf :

Comme tout le Sahara, le Souf a été habité de temps immémorial. Il est certain que les cantonnements de populations se sont déplacés d'ici et là à travers les âges. La région du Souf est composée de 18 communes, avec une population totale de 566245 personnes (DPS, 2016), réparties sur une superficie de 11738,4 km².

Le tableau 1 présente la distribution des populations dans la région du Souf, indiquant que la commune d'El-Oued (Chef-lieu) compte 163555 habitants, avec une densité de population de 2077 habitants/km². La commune de Reguiba compte 50460 habitants, avec une densité de population de 486 habitants/km². En revanche, la commune d'El-Ogla a la plus faible densité de population de 6 habitants/km².

Tableau 1. Répartition de la superficie et nombre d'habitant et la densité apparente par commune de La vallée d'Oued- Souf

N°	Commune	Population (hab)	Superficie (km ²)	Densité hab/km ²
01	Hassi Khalifa	38235	1112.0	35
02	El-Ogla	7465	1352.0	6
03	Mih Ouansa	20650	1111.2	19
04	El Oued	163555	77.2	2119
05	Robbah	26570	499.2	53
06	Oued Allenda	7720	712.0	11
07	Bayadha	38990	138.8	281
08	Nakhla	15845	700.0	23
09	Guemar	49325	1264.4	39
10	Sidi Aoun	14315	480.0	30
11	Trifaoui	10120	474.0	21
12	Magrane	28780	618.0	47
13	Ourmes	6655	442.8	15
14	Kouinine	12610	116.0	109
15	Reguiba	50460	1965.6	26
16	Taghzout	16600	539.2	31
17	Debila	30015	78.0	385
18	H-Abdelkerim	28335	58.0	489
TOTAL		566245	11738.4	

Source: D.P.S.B, 2020

2. Contexte climatique :

En général, le Sahara est caractérisée par un déficit hydrique dû à la faiblesse des précipitations, à l'évaporation intense, aux fortes températures et à la grande luminosité (TOUTAIN, 1979).

Le climat d'Oued Souf est désertique, avec des hivers froids et des étés chauds. L'aridité s'exprime non seulement par des températures élevées et des précipitations faibles en été, mais surtout par une importante évaporation due à la sécheresse de l'air. Cela contraste avec l'humidité du sol en saison froide. (NADJAH, 1971).

L'analyse des paramètres climatiques se fait sur la base des données de la station météorologique de l'aéroport d'El-Oued située dans la daïra de Guemar au nord de la ville. Cette station est exploitée par l'ONM, ayant les caractéristiques géographiques suivantes

Tableau 2. Coordonnées géographiques de la station météorologique

Station	Code A.N.R.H	Altitude (m)	Longitude	Latitude
Guemar	13 04 09	6	6°47'E	33°30'N

La station nous a permis d'exploiter une série de 41 ans (1978-2019) pour l'ensemble des paramètres mesurés.

2.1. Les paramètres climatiques :

Tableau 3. Données climatiques moyenne de la région d'Oued Souf entre 1978 et 2019

(O.N.M. El-Oued Guemar, 2020)

Mois	Paramètres climatiques							
	Température (°C)			Humidité (%)	Vents (m/s)	Précipitations (mm)	Evaporation (mm)	Insolation (heure)
	T moy	T max	T min					
Janvier	15,31	20,76	9,62	63,95	2.11	14,67	76,47	236,37
Février	18,08	24,41	11,51	54,76	2.72	5,29	99,55	247,08
Mars	22,76	29,52	15,69	48,68	3.18	7,99	148,93	278,39
Avril	27,02	34,26	19,49	42,84	3.78	7,43	197,68	281,92
Mai	31,76	38,85	24,37	38,21	3.88	4,44	252,37	308,20
Juin	36,16	43,52	28,52	34,03	3.81	1,36	278,76	342,09
Juillet	37,77	45,31	30,03	31,34	3.32	0,26	316,13	352,59
Août	37,67	44,98	30,18	34,39	2.95	1,84	278,88	329,06
Septembre	33,85	40,67	26,79	44,87	3.00	5,72	200,08	271,82
Octobre	28,53	34,89	21,89	52,66	2.12	6,75	149,64	259,20
Novembre	21,38	27,10	15,87	59,39	1.95	7,24	99,68	238,52
Décembre	15,76	20,98	10,32	65,95	1.98	6,21	76,00	225,92
Moyenne	27,17	33,77	20,36	47,59	2.90	69,18*	2174,16*	280,93

* Cumulé annuel

(O.N.M. El Oued Guemar, 2020)

2.1.1. Températures

D'après le tableau 3, la région d'Oued Souf est caractérisée par des températures très élevées. La température moyenne annuelle est de 27.17 °C par mois. Les données des températures mensuelles relevées sous abri montrent que le mois le plus chaud est juillet avec une température moyenne de 37.77 °C, un maxima de 45.31 °C et un minima de 9.62 °C

La période qui s'étale du mois de novembre au mois d'avril correspond à la période froide avec un minimum durant le mois de janvier de (9.62 °C), alors que la période chaude commence à partir du mois de mai et s'étale jusqu'au mois de septembre.

2.1.2. Précipitations :

D'après Dubief (1963) les origines des précipitations dans les régions sahariennes sont différentes et c'est selon les saisons :

Durant l'été, elles sont dues aux dépressions de mousson, et en hiver, leur provenance est des eaux dépressions accompagnant la migration vers le sud des fronts polaires, alors que pendant la période intermédiaire, ces précipitations sont dues aux dépressions Soudano Sahariennes traversant notre Sahara du sud vers le Nord.

Le tableau 3 ci-dessous et la figure donne les précipitations moyennes mensuelles observées durant (1978-2019). On remarque que la pluviométrie maximale est de l'ordre de 14,67 mm

enregistré pendant le mois de Janvier, et le minimum est de l'ordre de 0,26 mm enregistré pendant le mois de juillet.

2.1.3. Vents :

Selon le tableau 3, nous remarquons que les vents sont fréquents durant toute l'année. Les vitesses les plus élevées sont enregistrées durant la période allant de mars jusqu'à août, avec un maximum de 3.88 m/s durant le mois d'Mai.

Les vents chargés de sable sont généralement les plus forts au printemps, avec des vitesses de 1.95 à 3.88 m/s. Ces vents violents peuvent causer des dommages aux cultures locales et provoquer une dynamique érosive éolienne intense.

2.1.4. Evaporation :

L'évaporation est importante, pouvant atteindre à Oued - Souf une ampleur considérable, car ce phénomène physique rencontre ici les conditions nécessaires optimales : la moyenne annuelle est de 2174.16 mm, le maximum est atteint au mois de juillet, avec une moyenne de 316.13 mm, avec des minima enregistrés durant mois de décembre avec une valeur de 76.00 mm tableau 3.

L'évaporation est favorisée par les fortes températures et les vents desséchants fréquents. Elle correspond à plus de 29 fois la pluviométrie annuelle. Cette situation traduit un écart très important entre l'évaporation et les précipitations, ce qui engendre un déficit hydrique considérable, justifiant les forts besoins en eau des cultures.

2.1.5. Humidité de l'air :

L'humidité de l'air est faible dans la région du Souf. La moyenne annuelle est de l'ordre de 47.59 % Tableau 3. Elle varie sensiblement en fonction des saisons de l'année.

En effet, pendant l'été, elle chute jusqu'à 31.34 % (au mois de juillet), sous l'action d'une forte évaporation et des vents chauds; alors qu'en hiver, elle s'élève et atteint une moyenne maximale de 65.95 % (au mois de décembre) Tableau 3.

On remarque que l'évapotranspiration est beaucoup plus importante que l'humidité de l'air dans la région d'étude, comme indiqué précédemment. Cela se traduit par des besoins en eau des cultures croissants.

2.1.6. Insolation :

A cause de la faible nébulosité de l'atmosphère, la quantité de lumière solaire est relativement forte, ce qui a un effet desséchant, tout en augmentant la température (OZENDA, 1983). Les durées d'insolation sont évidemment très importantes au Sahara et varient assez notablement d'une année à l'autre, et même suivant les périodes de l'année envisagées (DUBIEF, 1963).

Selon le Tableau 3, la durée moyenne d'insolation est d'environ 280.93 heures, avec un maximum de 352,59 heures en juillet, et un minimum de 225,92 heures en décembre. En effet, les fortes insolation dans la région d'Oued- Souf contribuent à l'augmentation considérable de l'évapotranspiration, justifiant des besoins en eau importants des cultures, qui doivent être comblés par l'irrigation.

2.2. Diagramme ombrothermique de GAUSSEN :

Suivant Gausсен et Bagnols (in Rkiouak, 1996), un mois est dit sec lorsque $P < 2T$ avec P la précipitation et T la température. La variation de ces deux paramètres au cours d'une année hydrologique moyenne est figurée sur le diagramme Ombro-thermique (Figure 2). D'après la figure nous remarquons que la station d'El Oued présente une seule période sèche qui s'étale sur toute l'année sauf le mois de Janvier où les précipitations dépassent le double de température ($P > 2T$).

Tableau 4. Les données des précipitations et des températures moyennes mensuelles (1978-2019)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
P (mm)	5.72	6.75	7.24	6.21	14.67	5.29	7.99	7.43	4.44	1.36	0.26	1.84
T (°C)	33.90	28.50	21.40	15.80	15.30	18.10	22.80	27.00	31.80	36.20	37.80	37.70

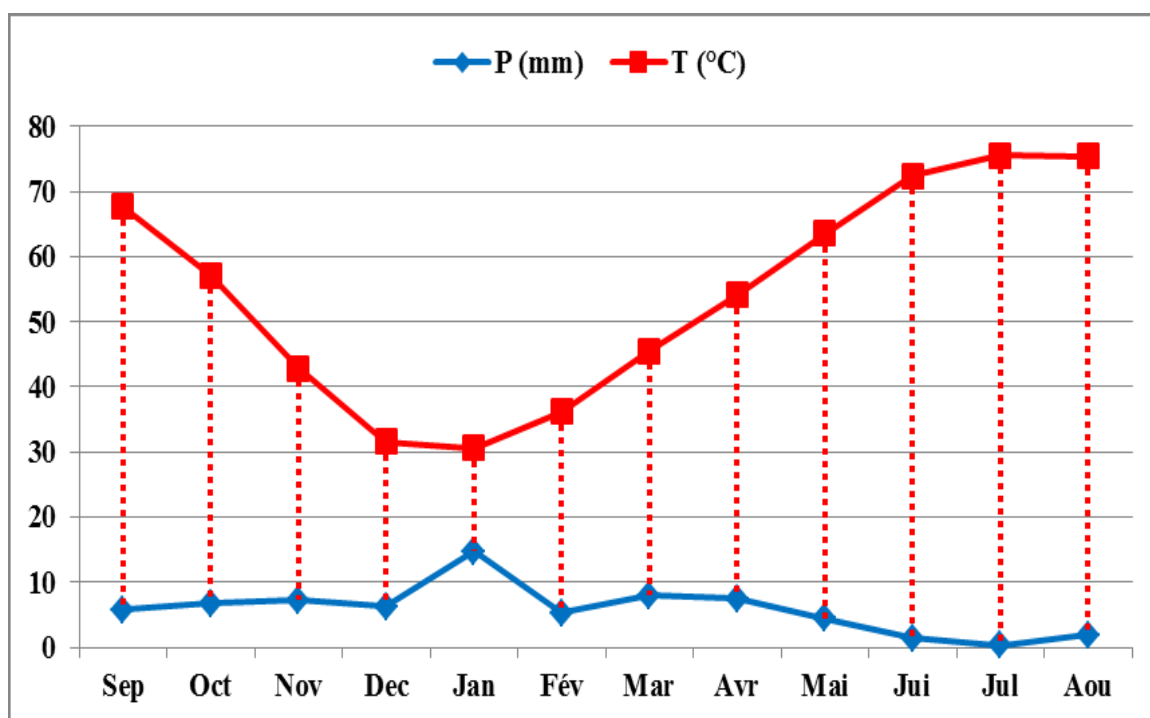


Figure 2 . Courbe Ombro-thermique d'El-Oued (1978/2019)

2.3. Bilan hydrologique

Selon Thornthwaite, le calcul du bilan se résume à la relation suivante :

$$P = ETR + R + I$$

P : précipitations moyennes mensuelles ;

ETR : évapotranspiration réelle calculée par les différentes méthodes ;

R : ruissellement ;

I : infiltration.

Tableau 5: Bilan hydrique de la station de Guemar (1978/ 2019) par la méthode de THORNTWAITE.

	T	ETP	P	RFU	ETR	Def	Exc
Sep	33.90	162.00	5.72	0.00	5.70	156.30	0.00
Oct	28.50	90.20	6.75	0.00	6.80	83.40	0.00
Nov	21.40	32.90	7.24	0.00	7.20	25.70	0.00
Déc	15.80	12.10	6.21	0.00	6.20	5.90	0.00
Jan	15.30	11.90	14.67	2.80	11.90	0.00	0.00
Fév	18.10	19.40	5.29	0.00	8.00	11.40	0.00
Mar	22.80	47.80	7.99	0.00	8.00	39.80	0.00
Avr	27.00	86.50	7.43	0.00	7.40	79.10	0.00
Mai	31.80	156.40	4.44	0.00	4.40	152.00	0.00
Juin	36.20	235.10	1.36	0.00	1.40	233.70	0.00
Juil	37.80	273.20	0.26	0.00	0.30	273.00	0.00
Août	37.70	253.10	1.84	0.00	0.80	251.70	0.00
Annuel	27.19	1380.60	69.20		68.10	1312.00	0.00

Le bilan hydrique d'El-Oued (Tableau 5), dans la période (1978/2019) suivant la méthode de Thornthwaite est déficitaire, le déficit annuel est de l'ordre de 1312 mm (1978-2019) et atteint son maximum au mois de Juillet avec 273 mm (Tableau 5).

La quantité d'eau précipitée sera vite évaporée parce que évapotranspiration potentiel (ETP) est plus importante que les précipitations, sauf au mois de janvier, le réserve facilement utilisable est nulle pendant les onze mois de l'année. Cet indice est l'expression d'une approximation des besoins en eau d'irrigation des cultures, étant donné que la formule de Thornthwaite a tendance à sous-estimer les fortes ETP, particulièrement en zone aride et semi-aride, où elle ne tient pas compte de l'accentuation de l'ETP due aux phénomènes adventifs.

Le bilan hydrique de la région d'El-Oued montre que la recharge par la pluie efficace est négligeable, la recharge de la nappe est faite par les eaux de la ré-infiltration due à l'irrigation et les eaux urbaines (les eaux usées domestiques).

3. Ressources en eau dans le Sahara

Le système aquifère du Sahara septentrional (SASS) est partagé entre trois pays : l'Algérie, la Tunisie et la Libye. Il recouvre une étendue de plus d'un million de Km², dont 70 % se trouvent en Algérie, 6 % en Tunisie, et 24 % en Libye. Le SASS est la superposition de deux principales couches aquifères; la formation du Continental Intercalaire, CI, la plus profonde et celle du Complexe Terminal, CT (Figure 4).

Le bassin sédimentaire du Sahara septentrional (BG, 2002) couvre une superficie de 780 000 km². Ce bassin possède une envergure de 1800 km E-W et de 900 km N-S (OSS, 2002). Il est limitée au Nord-ouest par les piémonts du versant Sud de l'Atlas saharien, au Nord par l'accident sud atlasique au Nord des Chotts, relayé vers le golf de Gabès par la faille d'El Hamma - Médenine. A l'Ouest, la limite se situe au niveau de l'Oued Saoura-Reggane, au Sud par un alignement Est-ouest, de plateaux (Hammadadas) du Tinrhert et du Tademaït.

Enfin, la limite Nord-est se situe un peu après les reliefs du Dahart et celle du Sud-est parcourt la région de Syrte et va jusqu'à la ville de Hun en Libye (Castany, 1982). Ce bassin, constitue une importante dépression topographique, laquelle est sous-tendue par une cuvette structurale en forme de synclinal dissymétrique. La série sédimentaire est marquée, au centre de la fosse, par d'importants accidents tectoniques subverticaux. Les pendages des bancs sont en général faibles, à l'exception de la zone bordière située au nord-est du bassin (Busson.G, 1970 ; Fabre.J, 1976 ; SASS 2002). Celui-ci comporte, à sa base, des formations paléozoïques marines surmontées en discordance par les formations continentales du Secondaire et du Tertiaire épaisses de plusieurs milliers de mètres.

Le Quaternaire y succède. Il est constitué essentiellement de sables dunaires dont l'épaisseur peut atteindre quelques centaines de mètres. Seule la série supérieure présente un intérêt hydrogéologique. Le système aquifère d'El-Oued est constitué de trois aquifères (UNESCO, 1972 ; OSS, 2003 ; Guendouz et Al, 2006; Saibi et Al, 2009; Khechana, 2014), un aquifère libre, et deux aquifères captifs; (le Complexe Terminal (CT) et le Continentale Intercalaire (CI)).

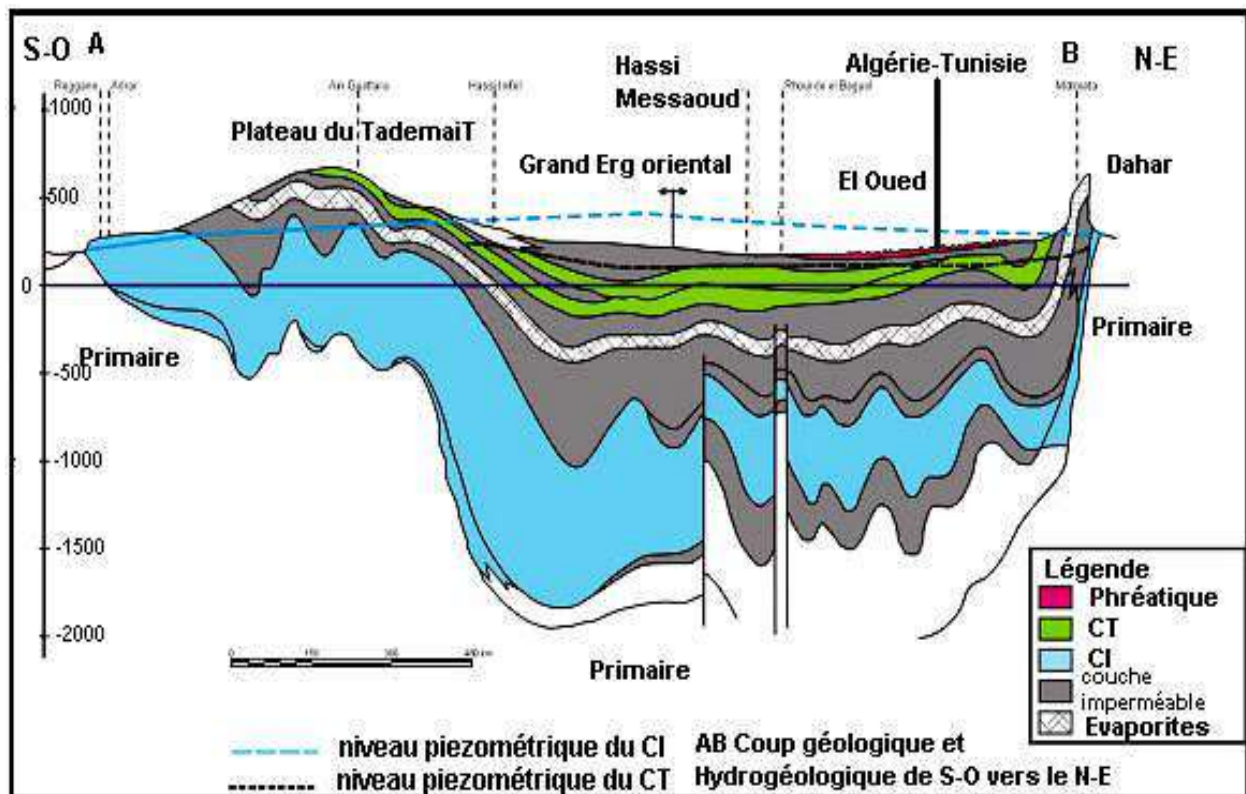


Figure 3. Coupe hydrogéologique des aquifères du Sahara septentrionale (UNESCO 1972)

3.1. La nappe phréatique

L'eau de la nappe phréatique existe dans la majorité de territoire de Souf. Elle repose sur le plancher argilo-gypseux du Pontien supérieur. La zone d'aération qui sépare la surface de cette eau de la surface du sol, ne dépasse pas une distance moyenne verticale de plus de 40 m de sable non aquifère (D.S.A, 2005.).

L'alimentation de cette nappe, assurée par les eaux de drainage de l'irrigation et par les eaux résiduaires urbaines, les eaux des sources, les précipitations, etc. Le sens de l'écoulement des eaux de la nappe phréatique suit celui de la nappe du Complexe Terminal, c'est-à-dire du Sud vers le Nord (Guendouz, Reghis et Moulla, 1992).

L'épaisseur de la nappe phréatique contenue dans les sables dunaires quaternaires est de l'ordre de 60 m à El Oued, est variable selon les lieux et la saison. Dans le Souf, cette nappe est exploitée par environ 35000 puits, équipés de groupes motopompes (Khezzani et Bouchemal, 2018). C'est une source capitale pour l'irrigation dans les palmeraies et les cultures maraichères (Rouvillois-Brigol, 1975). Les eaux des nappes phréatiques sont très salées avec plus de 4 à 5 g/l de résidus secs et parfois plus (Dubost et Moguedet, 2002).

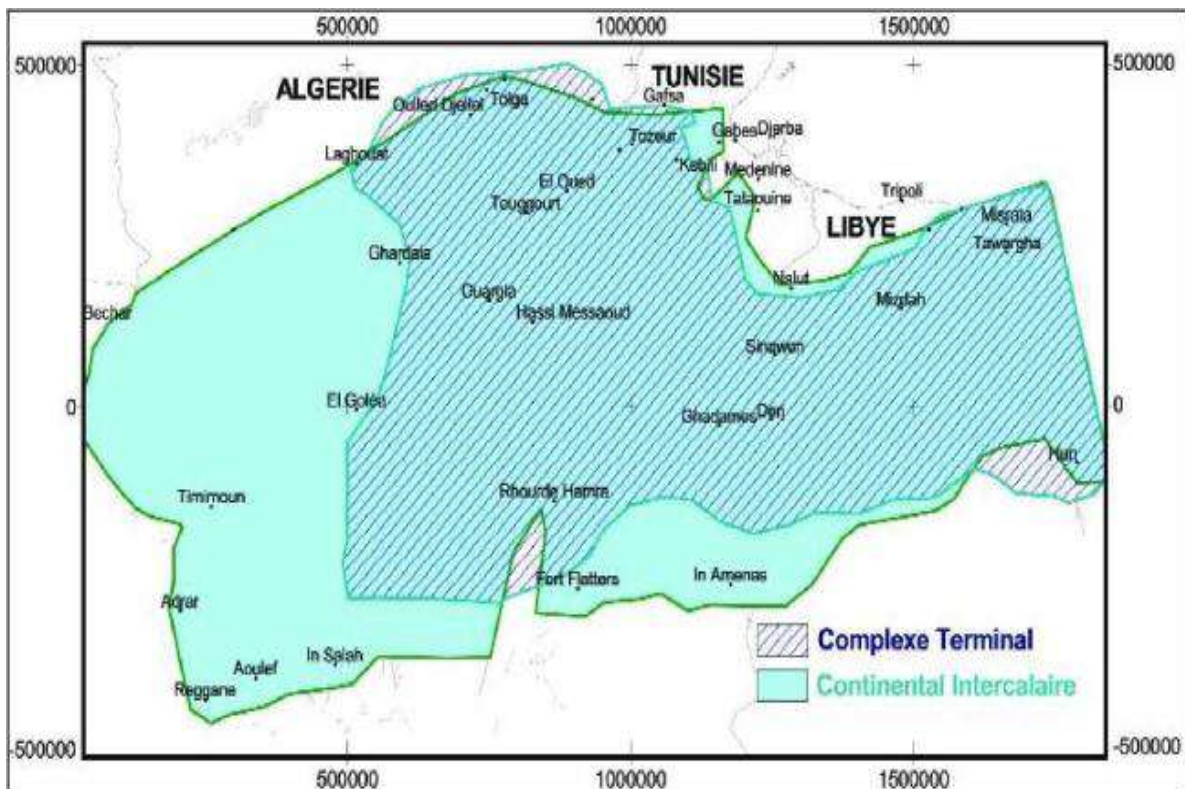


Figure 4. Extension des formations du système Aquifère du Sahara Septentrional(OSS, 2002)

3.2. La nappe du Continental Intercalaire

Le terme du Continental Intercalaire, correspond ainsi aux formations continentales du Crétacé inférieur, qui ne peut être que la période continentale intercalée entre deux cycles sédimentaires; la régression marine suivie d'une transgression du Crétacé supérieur. Le Continental Intercalaire (C.I) occupe l'intervalle stratigraphique compris entre la base du Trias et le sommet de l'Albien. Le réservoir aquifère du continental intercalaire est considérable, il représente le plus important aquifère dans le Sahara septentrional, du à son extension (plus de 600 000 Km²) et à son épaisseur moyenne de plusieurs centaines de mètres. L'intérêt majeur de ce système aquifère réside dans la grande quantité d'eau stockée au cours des périodes pluvieuses du Quaternaire et peut être maintenant exploitée, il reçoit encore de nos jours une alimentation naturelle par les eaux météoriques et présente donc un fonctionnement hydraulique caractérisé par une alimentation, un écoulement et une série d'exutoires. Le réservoir est constitué par des sables et des grés d'âge crétacé inférieur.

La nappe est confinée entre un toit, constitué par une épaisse couche d'argiles et de marnes d'âge Cénomaniens, alors que le mur est constitué des argiles d'âge néocomien. L'épaisseur totale du réservoir dépasse 250 m dans les plus grandes parties du Sahara Septentrional. Elle atteint 1000 m au Nord-Ouest.

L'écoulement de la nappe du CI (Figure 5) se produit du piedmont de l'Atlas vers les zones des Foggaras au sud, du Tinhert et du Djebel Hassaouna vers le golfe de Syrte et vers l'exutoire tunisien du golfe de Gabès. Les exutoires naturels du CI sont formés par les bordures occidentales et méridionales du Tademaït où se trouvent les foggaras du Gourara, du Touat et du Tidikelt et les remontées dans la zone du Chott Fedjaj.

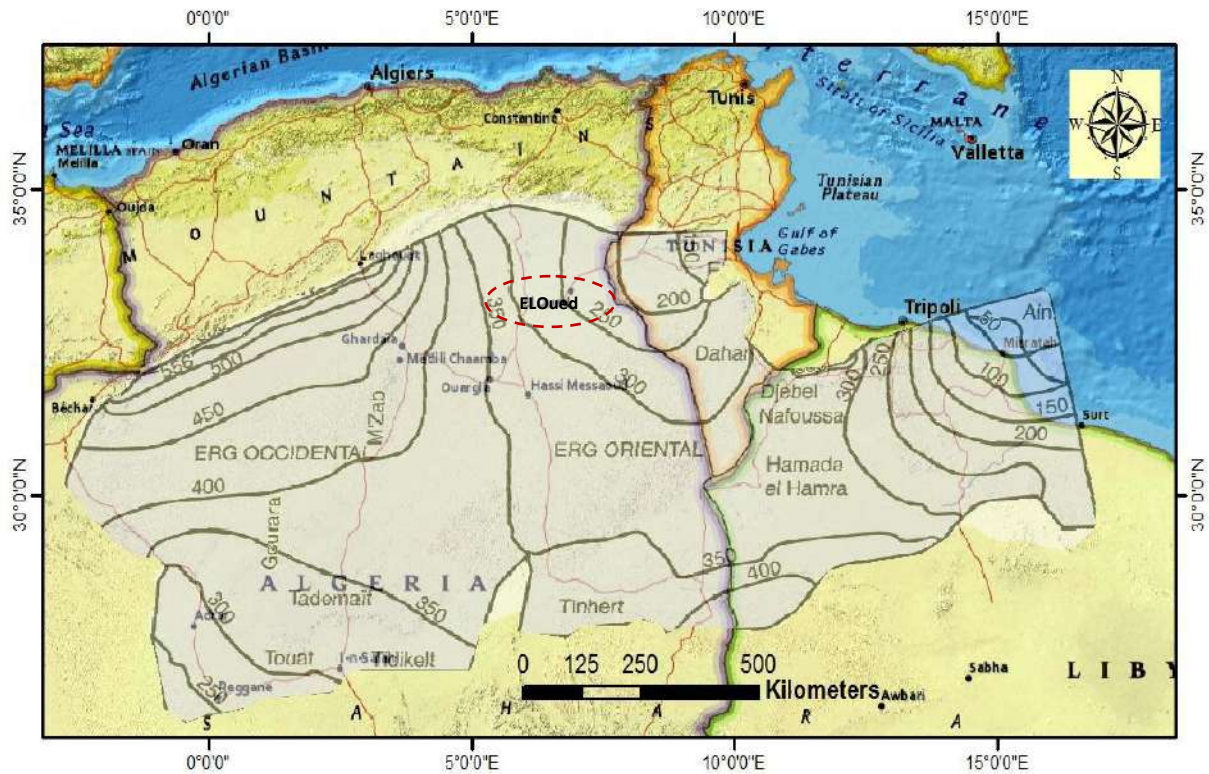


Figure 5 . Limite et piézométrie du Continental Intercalaire (Baba SY et al., 2006). Modifier

3.3. La nappe du Complexe Terminal

Le terme de complexe terminal regroupe sous une même dénomination un ensemble de nappes aquifères qui sont situées dans des formations géologiques différentes allant du Sénonien supérieur (carbonaté) au Mio-Pliocène (détritique). Dans le bassin oriental, la nappe du complexe terminal s'étale sur près de 350 000 Km², et limitée à l'Ouest par la dorsale du M'zab, au Nord par l'accident majeur de l'Atlas saharien, à l'Est par le Dahar, au Sud par la ligne passant au Nord de l'axe d'In Salah-Zarzaïtine sous l'Erg oriental. D'après (D.H.W, 2005), nous rappelons l'existence de 3 nappes dont les deux premières correspondent respectivement aux nappes des sables d'âge mio-pliocène et pontien (Figure 4), alors que la dernière correspond à la nappe des calcaires d'âge sénonien à éocène supérieur.

L'écoulement des eaux de la nappe du CT (Figure 6) s'oriente vers les chotts du Sahara Oriental ; Melghir et Merouane en Algérie, Rharsa et Djerid en Tunisie. Alors que dans le

bassin occidental les eaux de la nappe se mélangent avec celles du Continental Intercalaire (OSS 2003 ; Guendouz et al 1992-1995).

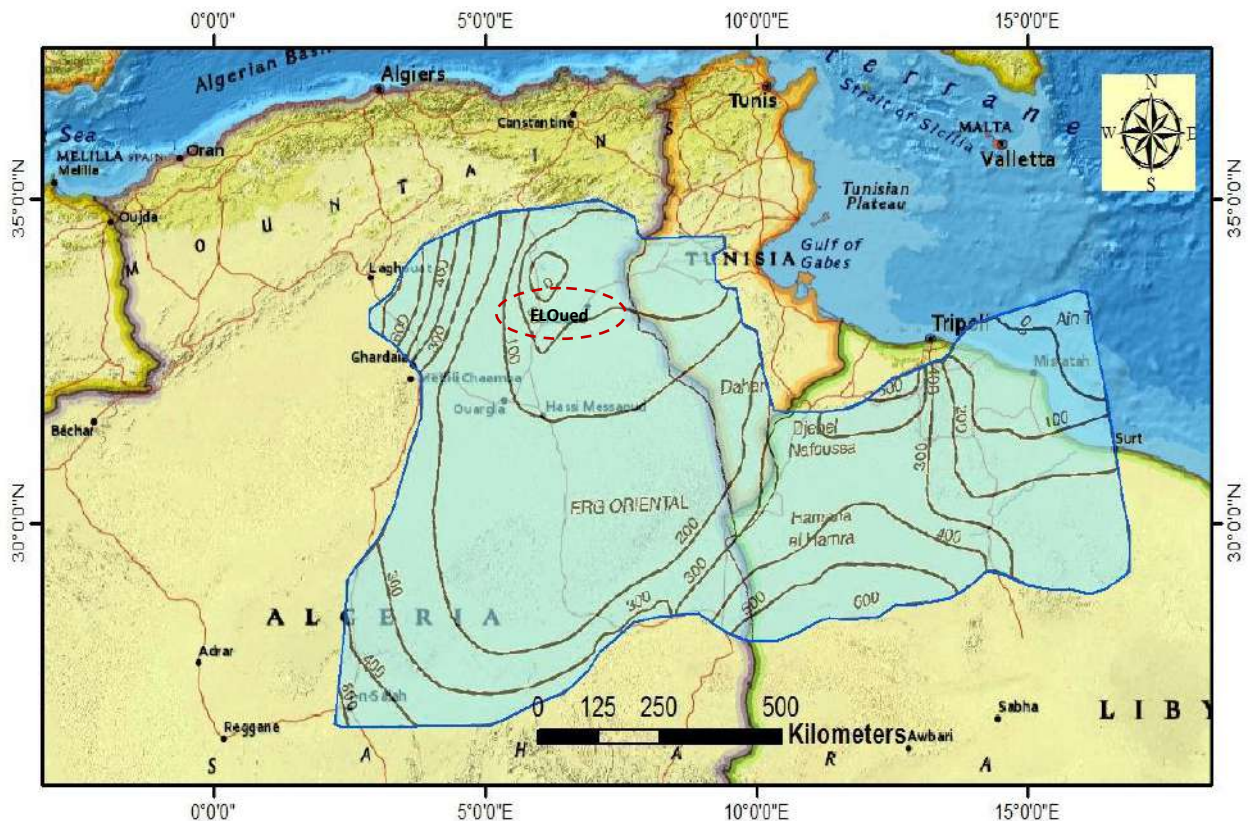


Figure 6 . Limite et piézométrie du du Complexe Terminal (OSS, 2003b). Modifier

4. Les potentialités souterraines totales reconnues et leurs répartitions :

Trois nappes sont présentes dans la région d'étude : la nappe intercalaire continentale, la nappe terminale et la nappe superficielle. En raison de la complexité du milieu, les nappes profondes sont considérées comme fossiles et contiennent des réserves importantes mais difficiles à déterminer. Cependant, grâce à un jaugeage, les réserves régulatrices du système peuvent être calculées en utilisant les débits des sources et ceux des forages artésiens. Les ressources potentielles des nappes souterraines dans la région d'Oued-Souf sont estimées à 500 Hm³/an.

4.1. Répartition du nombre des forages par zones :

La majorité du potentiel hydrique souterrain est extraite par pompage à partir d'une batterie de forages implantée dans la région d'El-Oued. Au mois de décembre 2017, on a dénombré 951 forages (bon et mauvais état) (Figure 7), répartis sur les zones suivants :

- ✓ La vallée du Souf (202 Forages d'eau)
- ✓ La Zone Frontalière (92 Forages d'eau)
- ✓ Oued Righ Nord (566 Forages d'eau)
- ✓ La Zone nord des Chotts (91 Forages d'eau)

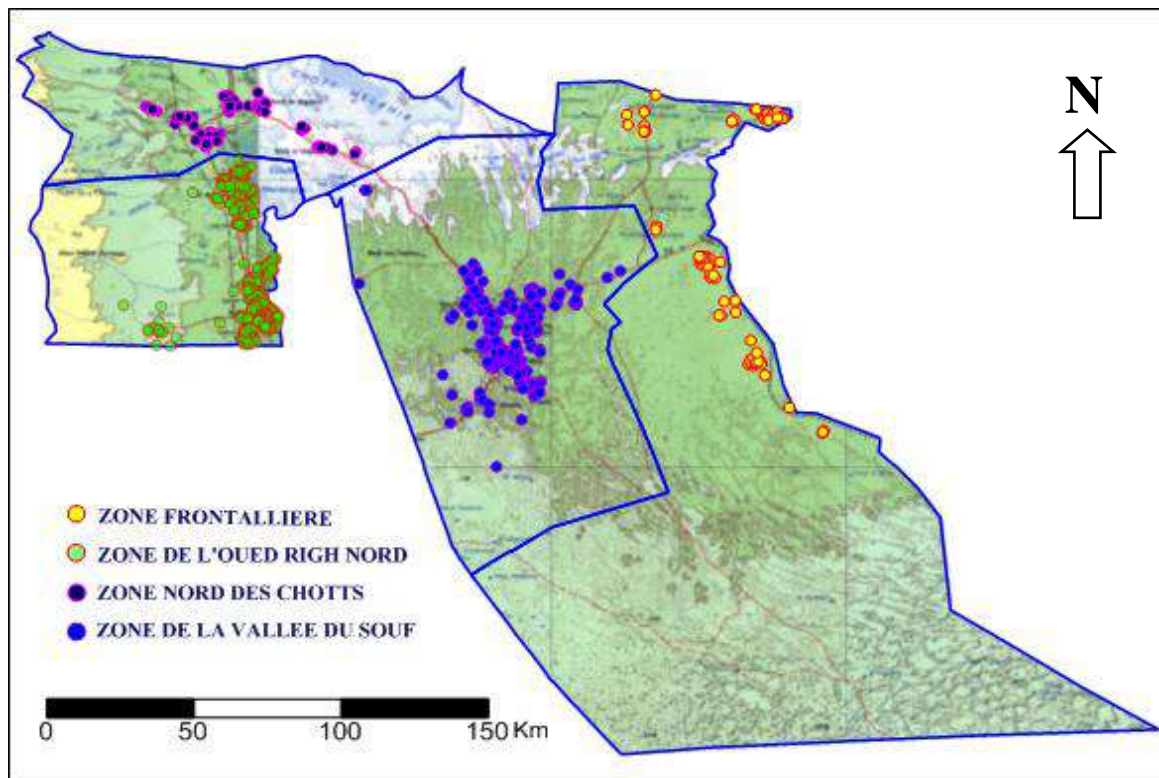


Figure 7 . Répartition du nombre total de forages d'eau CT et CI par zones

Selon le rapport de la direction des ressources en eau D.R.E d'EL Oued 2020, le nombre total des forages recensés dans la région d'Oued-Souf de l'ordre de 951 forages (732 en service), dont 176 sont destinés à l'AEP, 556 pour l'irrigation et le reste (217) sont abandonnés ou à l'arrêt ou piézomètre (Figure 7).

4.2. Répartition du nombre de forages par nappe et par usages :

4.2.1. Zone des Chotts (Oum Etiour – Hamrayia – Still).

Tableau 6. Répartition du nombre de forages enregistrés dans la zone des Chotts (Oum Etiour - Hamrayia – Still)

Nappe	CT		CI		Piézomètre
	AEP	IRR	AEP	IRR	
Nombre des forages en Service	18	38	/	/	5
Total des forages	87 dont (23 Arrêt - 08 Abd.)		/		
Total des forages en Service	56 (Vol = 8.20 Hm ³ /an)		/		
Totaux	92 Forages dont 56 en Service pour un Volume Total = 8.20 Hm ³ /an				

Source : D.R.E d'EL Oued 2020

4.2.2. Zone de l'Oued Righ Nord (La vallée Nord de l'Oued Righ).

Tableau 7 . Répartition du nombre de forages enregistrés dans la zone de l'Oued Righ Nord

Nappe	CT		CI		Piézomètre
Usage	AEP	IRR	AEP	IRR	
Nombre des forages en Service	14	419	4	13	7
Total des forages	537 dont (49 Arrêt – 56 Abd)		22 dont (05 Arrêt)		
Volume des forages en Service	433 (Vol =286,04 Hm ³ /an)		17 (Vol = 61,64 Hm ³ /an)		
Totaux	566 Forages dont 450 en Service pour un Volume Total = 347,68 Hm ³ /an				

Source : D.R.E d'EL Oued 2020

4.2.3. Zone Frontalière (Taleb El Arbi – Douar El Maâ – Benguecha).

Tableau 8 . Répartition du nombre de forages enregistrés dans la zone Frontalière

Nappe	CT		CI		Piézomètre
Usage	AEP	IRR	AEP	IRR	
Nombre des forages en Service	127	28	4	/	7
Total des forages	187 dont (14 Arrêt - 18 Abd)		05 dont (01 Arrêt)		
Total des forages en Service	155 (Vol = 88.16 Hm ³ /an)		04 (Vol = 17.34 Hm ³ /an)		
Totaux	202 Forages dont 159 en Service pour un Volume Total = 105.50 Hm ³ /an				

Source : D.R.E d'EL Oued 2020

4.2.4. Zone du Souf (La vallée du Souf – Mih Ouensa – Oued Allenda) .

Tableau 9 . Répartition du nombre de forages enregistrés dans la zone du Souf

Nappe	CT		CI		Piézomètre
Usage	AEP	IRR	AEP	IRR	
Nombre des forages en Service	9	57	/	1	7
Total des forages	87 dont (17 Arrêt – 04 Abd.)		1		
Total des forages en Service	66 (Vol = 38,33 Hm ³ /an)		01 (Vol =0, 95 Hm ³ /an)		
Totaux	91 Forages dont 67 en Service pour un Vol. Total = 39,28 Hm ³ /an				

Source : D.R.E d'EL Oued 2020

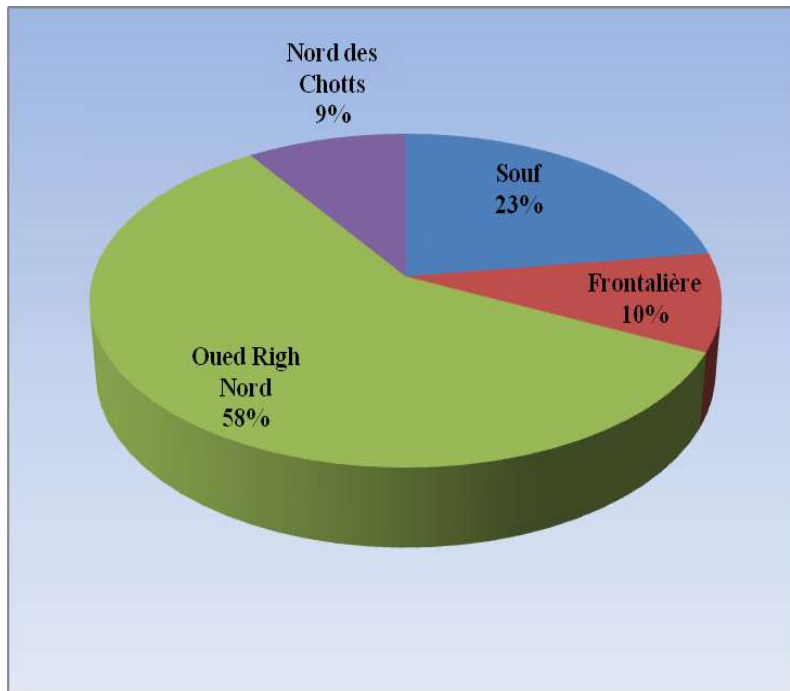


Figure 8 . Répartition du nombre total de forages d'eau CT et CI par zones

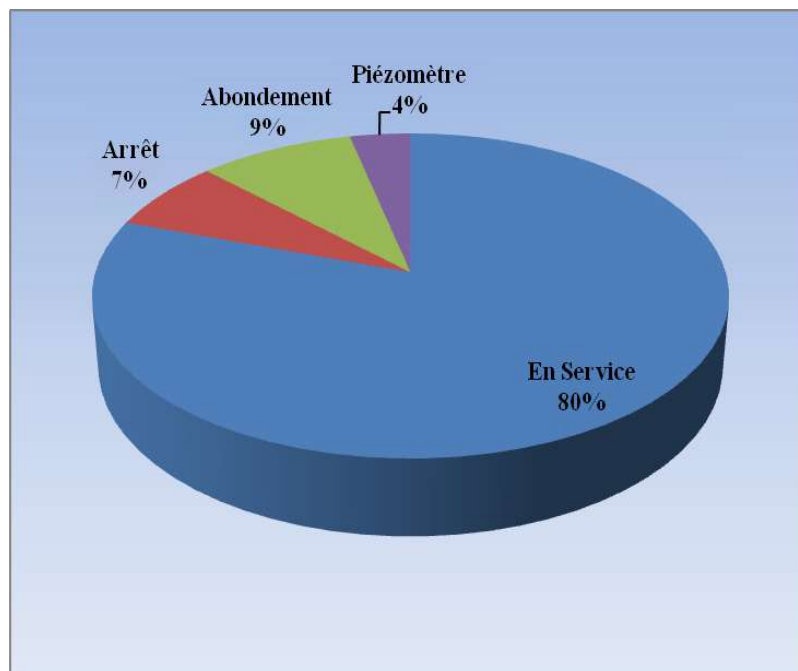


Figure 9 . Répartition de l'état total de forages d'eau CT et CI

Parmi les 951 forages recensés seulement 734 forages (CT, CI) sont exploités, et 219 forages (CT, CI) non exploités.

Les 734 forages en service mobilisent un volume total de 500.67 Mm³/an, dont 412 Mm³/an pour nappe du CT et le reste 88.67 Mm³/an pour nappe du CI sont destinée à la satisfaction des besoins agricole (utilisation pour l'irrigation) et distribués pour l'approvisionnement en eau potable (AEP) des diverses communes de la wilaya (D.R.E d'EL Oued 2020).

4.3. Evaluation des volumes soutirés des ressources en eau par zones, par usage :

Concernant l'affectation des ressources en eau dans la wilaya d'El-Oued, la partie la plus importante des eaux mobilisées est destinée à la satisfaction des besoins agricole (utilisation pour l'irrigation), avec un volume de 379 Hm³/ an.

Toutefois, cette dominance est due aux besoins d'irrigation qui ne cessent à croître. Les besoins domestiques tiennent une place prépondérante dans les prélèvements d'eau dans le bassin, un volume de 121 Hm³/ an des ressources mobilisées (D.R.E d'EL Oued 2020).

4.3.1. Exploitation la nappe du Complexe Terminal (C.T) :

Le premier forage profond artésien de prospection a été effectué à Sif El Menadi (90 km N.O d'El Oued) en 1953. Il a été foré à une profondeur de 435 mètres et a débité environ 4 mètres cubes par minute, ce qui a permis la première plantation de palmiers irrigués (Najah A, 1970).

Depuis le printemps 1956, l'eau jaillit dans la région du Souf d'un forage à El-Oued, à près de 300 mètres de profondeur. Le débit est assez faible (3,3 litres/seconde) et la pression au sol est assez basse (+2,4 mètres).

De 1957 à 1969, un nouveau forage a été effectué chaque année dans le Complexe Terminal, et de 1970 à 1980, environ 2 forages par an ont été effectués.

Entre 1980 et 1997, une centaine de nouveaux forages sont réalisés dans le Complexe Terminal.

Tableau 10. Récapitulatif des volumes d'eau soutirés de CT pour les différents types des usages

Zones	V. AEP (Hm3/an)	V. IRR (Hm3/an)	Total (Hm3/an)
Souf	70,53	17,62	88,15
Frontalière	4,77	3,44	8,21
Nord des Chotts	6,98	31,35	39,28
Oued Righ Nord	11,41	274,63	286,04
Volume T. Extrait	93,7	327,05	420,75

Source: D.R.E d'El-Oued 2020

4.3.2. Exploitation la nappe du Continental Intercalaire (C.I) :

Trois forages profonds ont été effectués au Continental Intercalaire (CI) en 1986 et 1987. Deux d'entre eux ont été utilisés pour l'AEP d'El Oued, tandis que le troisième a été effectué pour Hassi-Khalifa pour l'agriculture. Ils sont considérablement artésiens et de 5 à 10 fois plus importants que les forages CT (Khechana ; 2014).

Tableau 11. Récapitulatif des volumes d'eau soutirés de CI pour les différents types des usages

Zones	V. AEP (Hm3/an)	V. IRR (Hm3/an)	Total (Hm3/an)
Souf	17,34	/	17,34
Frontalière	/	/	/
Nord des Chotts	/	0,95	0,95
Oued Righ Nord	10,40	51,24	61,64
Volume T. Extrait	27,74	52,19	79,93

Source: D.R.E d'El-Oued 2020

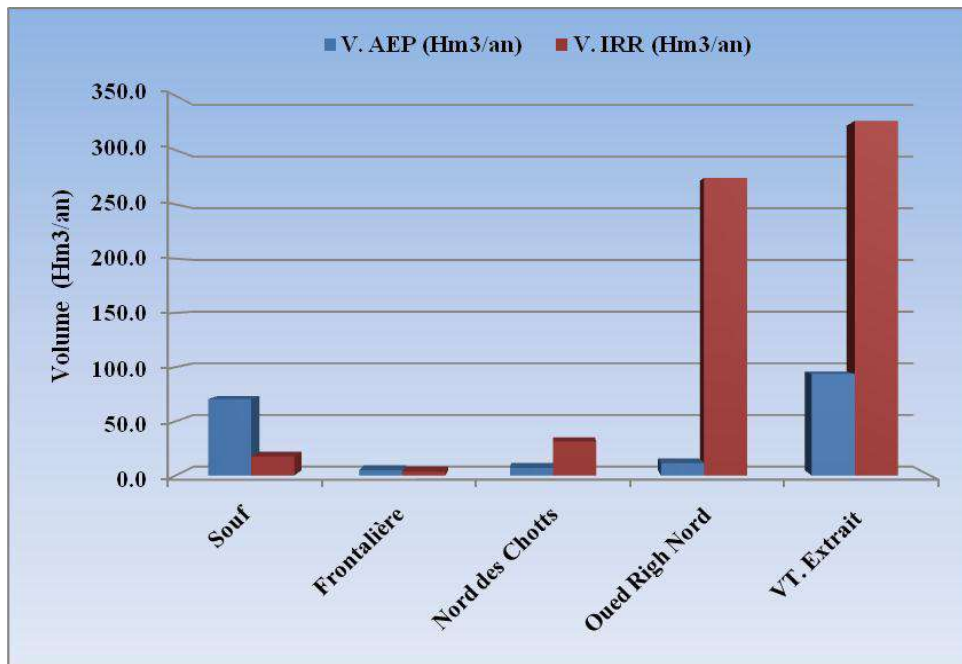


Figure 10. Répartition de volume d'eau soutiré de CT pour les différents types des usages

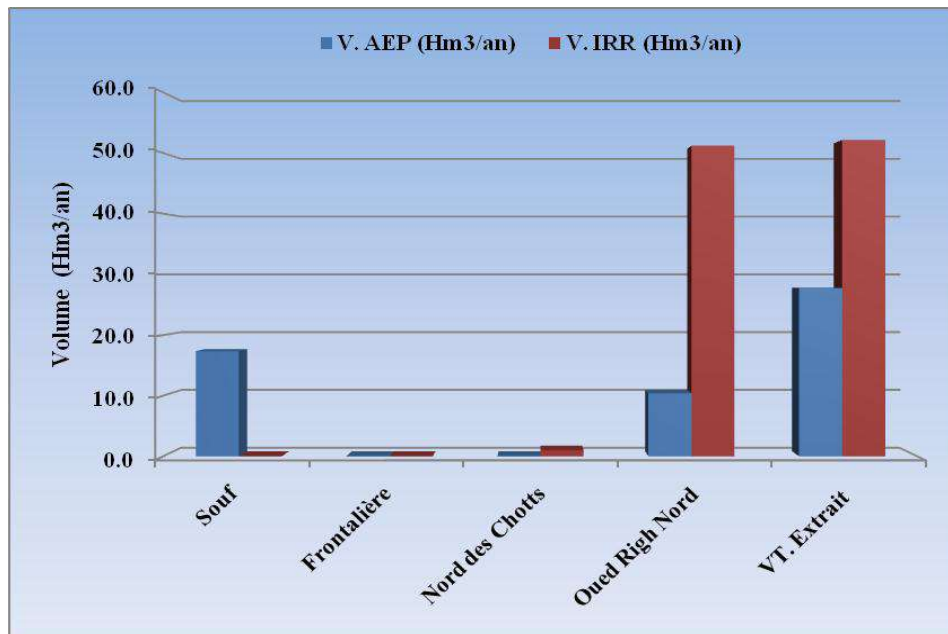


Figure 11. Répartition de volume d'eau soutiré de CI pour les différents types des usages

4.3.3. Exploitation de la nappe phréatique :

Les réserves en eau de la nappe phréatique sont suffisantes allant de 10 000 à 60 000 m³/an dans toute la région du Souf facilement exploitables et à la portée des agriculteurs (DSA, 2018).

5. L'agriculture dans la région du Souf :

L'activité principale dans cette région a longtemps été basée sur l'agriculture, et notamment l'exploitation du palmier dattier, en utilisant une méthode originale : les Ghouts, sortes de cratères creusés et perpétuellement entretenus à main d'hommes, dont la profondeur était telle que les racines des palmiers qu'on y plantait trouvaient l'eau de la nappe phréatique à la profondeur optimale. D'où ce paysage caractéristique de la vallée du Souf.

L'espace agricole oasien est caractérisé par deux types de systèmes ; un ancien et un nouveau, qui se différencient par les moyens et les techniques de production mises en œuvre. (LEGHRISSE, 2007).

5.1. L'ancien système agricole du Souf :

Selon le travail de (LEGHRISSE, 2007), La palmeraie traditionnelle du Souf est un ensemble de micropropriétés ou petites exploitations, sous forme d'entonnoirs (Ghouts), et dont les superficies sont réduites. Ce sont généralement des exploitations familiales, ayant pour objectif principal l'autosubsistance.

Actuellement, la plupart de ces exploitations sont mal entretenues, envahies de mauvaises herbes, inondées suite au phénomène de la remontée de la nappe phréatique.

Ce phénomène a réduit une grande partie de la superficie agricole, utilisée à l'état Ghout, et qui progresse sans cesse.

5.2. Le nouveau système agricole du Souf :

Face aux contraintes de ce système, « colonisation » de nouveaux espaces dans le cadre de la mise en valeur agricole a donné naissance à une nouvelle forme d'organisation, caractérisée par une spécialisation parfois monoculturale ; céréalière, fourragère ou maraîchère et/ou donc le palmier dattier ne constitue plus la culture principale (BOUAMMAR, 2000).

Cette agriculture dite nouvelle est fondée essentiellement suite à la loi 18/83 de l'accession à la propriété foncière agricole. Cette loi touche les rapports entre l'homme et l'objet de travail qui est la terre.

5.3. Situation actuelle sur la production au niveau de la wilaya d'El Oued:

5.3.1. Superficie des terres utilisées par l'agriculture:

Les documents du service statistiques et les enquêtes agricoles de la Direction des Services Agricoles de la wilaya d'Oued Souf ont été utilisés pour déterminer l'importance des terres agricoles (DSA, 2020).

Le tableau 12 donne une première indication de l'importance des terres cultivables. Les terres agricoles couvrent 1 719 600 ha, soit 38.56 % de la superficie totale. La superficie agricole utilisée est faible, représentant environ 5.52 % de la Superficie Agricole Totale (S.A.T). Les terres restantes sont partagées entre pacages et parcours.

Tableau 12. Répartition générales de la surface agronomique de la vallée d'Oued Souf

Répartition des Terrés			Superficie (Ha)
Superficie Agricole Utile	Terres labourées	Cultures herbacees	47 207
		Jachères	6 566
	Terres de cultures permanentes	Vignobles	220
		Plantation d'arbres fruitiers	812
		Agrumes	25
		Oliviers	3 100
		Phoeniciculture	37 070
Superficie Agricole Utile (S.A.U)			95 000
Pacages et Parcours			1 410 000
Terres agricoles improductives			214 600
Total des terres agricoles			1 719 600
Terres improductives non affectées à l'agriculture			2 738 666
Superficie Totale de la Wilaya			4 458 680

Source: DSA, 2020

5.3.2. Les principales cultures et leurs superficies agricoles:

Le palmier dattier est la culture dominante dans la wilaya d'Oued Souf, comme le montre le tableau 13. Environ 2562268 palmiers y vivent sur 21 85745 ha, dont 2024923 sont productifs et produisent 125216300 Qtx de dattes. Avec une superficie de 42666 ha et une production de 14 100 000 Qtx, les cultures maraichères occupent la deuxième place. (DSA, 2020).

Tableau 13. Répartition des palmiers par espèce dans la wilaya d'Oued Souf

Variété des Dattes	Nbr. Palmiers	Production (Qx)	Rendement (kg/Palm.)
Deglet-Nour	2 397 600	1 678 330	0,70
Ghars	699 200	461 470	0,66
Degla-Beida et Autres	607 500	393 300	0,65
Total	3 704 300	2 533 100	0,68

Tableau 14. Répartition de la Surface Agricole Utile (SAU) dans la wilaya d'Oued Souf

Spéculation	Superficies (Ha)	Production (Qx)	Rendement (Qx/Ha)
Cultures Maraîchères			
Tomate	2 063	1 023 000	495,88
Fève verte	180	16 200	90,00
Pomme de terre	37 000	12140000	328,00
Piment	587	154 000	262,35
Oignon / Ail	1 740	438 000	251,72
Carotte / Navet	770	192 500	250,00
Melon /	2 005	805 160	401,62
Petit Pois	166	14 940	90,00
Concombre	44	16 000	363,64
Aubergine	183	37 800	206,56
Chou-fleur	5	500	100,00
Haricot vert	33,2	2 680	80,72
Courgette	130	43 900	337,69
Autres	1760	465 320	264,39
T o t a l	42 666	14 100 000	330,47
Dont plasticulture			
Tomate	63	63 000	1000
Piment	122	61 000	500
Courgette	7	7 000	1 000
Concombre	4	4 000	1 000
Autres	8	7 000	875
T o t a l	204	142 000	696,08

Source: DSA, 2020



Photo 1. Palmeraie ancienne tradition dans la wilaya d'Oued Souf (ZAIZ, 2020)



Photo 2. Culture de la tomate est également préconisée aux alentours du périmètre (ZAIZ, 2020).



Photo 3. Culture de l'olivier est également préconisée aux alentours du périmètre (ZAIZ, 2020).

5.3.3. Situation actuelle de la filière pomme de terre dans la région d'El Oued

La filière pomme de terre est marquée par une dynamique de croissance remarquable dans la wilaya d'El Oued. Au cours de la campagne 2017-2018, la production de la pomme de terre a atteint 11,3 à 11.5 millions de tonnes en 2017 et de 11 millions de tonnes en 2016 contre 6.2 millions de tonnes en 2010.

Les principales zones de production de la pomme de terre dans la région d'El Oued sont Reguiba, Trifaoui et Ourmès Le tableau 15 représente la répartition des superficies cultivées et la production de pomme de terre dans la région du Souf durant la campagne agricole (2018/2019) (DSA, 2020).

Tableau15. Les principales zones de production de la pomme de terre dans la région d'El Oued

Communes	Superficie totale		Production totale		Nombre de producteurs
	(ha)	Pourcentage %	(qx)	Pourcentage %	
Hassi Khalifa	7135	19	2347250	19	2177
Ourmes	5550	15	1825500	15	1600
Reguiba	5127	14	1682820	14	1100
Trifaoui	5091	14	1676850	14	1526
Autres	14097	38	4607580	38	700
Total wilaya	37000	100	12140000	100	10000

Source: DSA, 2020

Selon le tableau 15, la production de la pomme de terre de la wilaya d'El Oued, sur une superficie totale de 37 000 ha en 2019 et une production d'environ 12.1 millions de tonnes annuels intéresserait environ 10 000 producteurs.

La commune de Hassi Khelifa s'est classée en première position avec 19 % de la superficie totale de la wilaya et est première concernant la production, suivie par les communes de Ourmes, Reguiba, Trifaoui, et autres régions qui occupant respectivement 15%, 14%, 14% et 38% de la superficie totale .



Photo 4. Cultures maraîchères de la pomme de terre irriguée par pivot (ZAIZ, 2020).



Photo 5. Cultures maraîchères de la pomme de terre irriguée par goutte à goutte (ZAIZ, 2020)

5.3.4. Évolution de la production de la pomme de terre dans la région d'El Oued

La production de la pomme de terre dans la wilaya d'El Oued, connaît une évolution rapide ces dix dernières années (Tableau 16).

Tableau 16. Evolution des superficies de la production et des rendements de la pomme de terre dans la région d'El Oued

Année	Superficie (ha)	Production (qx)	Rendement (qx/ha)
1999	628	111220	177
2000	822	131308	160
2001	722	210060	291
2002	1687	360580	214
2003	2563	568880	222
2004	4433	1164900	263
2005	6749	1550705	230
2006	7392	1818366	246
2007	7217	1791893	249
2008	11415	2708890	237
2009	14200	3588962	253
2010	18800	6206320	300
2011	24000	7221700	300
2012	30200	11176000	370
2013	35000	11725000	335
2014	33000	10890000	330
2015	33000	10890000	330
2016	34000	11180000	329
2017	35000	11530000	330
2018	36200	11360000	314
2019	37 000	12 140 000	328

Source: DSA, 2020

D'après le tableau 16, la tendance générale des trois grandeurs (superficies, production, et rendements) est à la hausse .

La production et les superficies suivent la même tendance, une augmentation en continue jusqu'à 2013 puis une certaine stabilité s'installe jusqu'en 2019, la corrélation entre ces deux grandeurs est logique. Plus les superficies augmentent, plus la production augmente aussi. Les rendements présentent des fluctuations plus fréquentes

5.3.5. Evolution de la superficie cultivée de la pomme de terre

Durant la période 1995-2006, les superficies productives de la pomme de terre ont connu une augmentation progressive et remarquable (DSA, 2020).

De 2007 à 2013, la diffusion de la culture de pomme de terre a connu une rapidité et continuité fortes et régulières au sein des systèmes de culture en région du Souf. A partir de 2013 la progression est plus lente et avoisine le 37000 ha pour l'année 2019 (Figure 12).

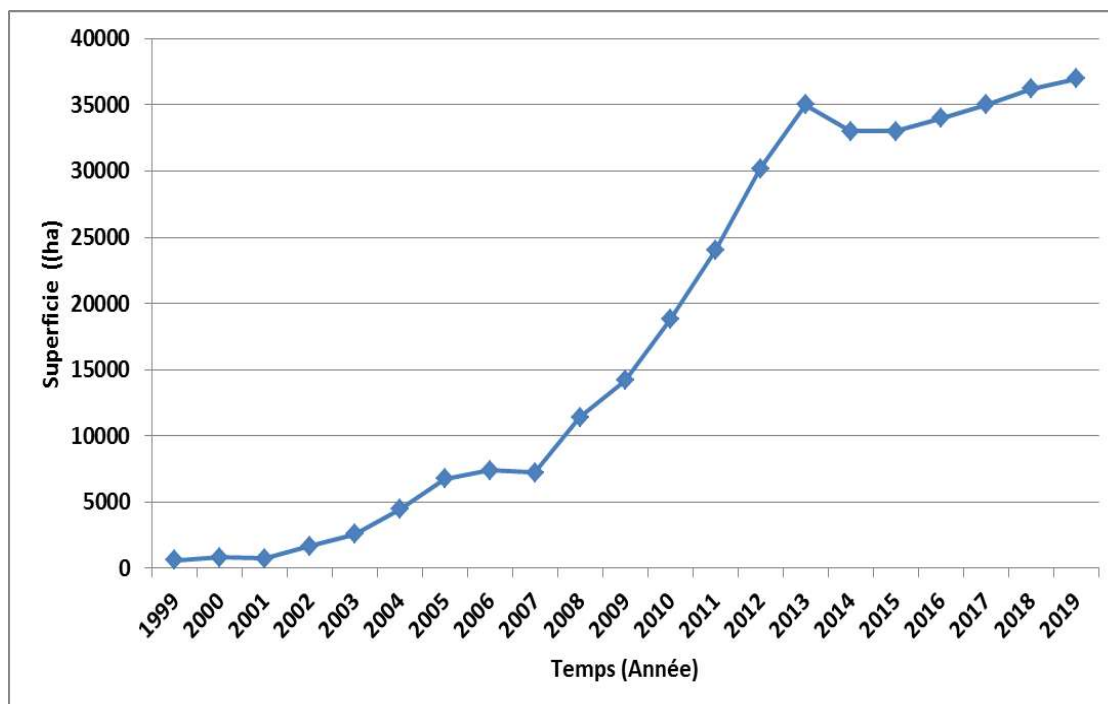


Figure 12. Evolution de la superficie de la pomme de terre dans la région d'El Oued (1999-2019)

5.3.6. Évolution de la production

Dans la région d'El Oued, la pomme de terre est cultivée deux fois par an : pomme de terre d'arrière-saison (plantation entre août et septembre) et pomme de terre de pleine-saison (plantation entre janvier et mars) (DSA, 2020).

La production est instable d'une année sur l'autre et d'une saison à une autre. Ceci est lié aux aléas climatiques, à la non maîtrise de l'itinéraire technique (fertilisation et irrigation), au travail du sol inapproprié, aux maladies et en particulier au choix inadéquat de la semence. La production de pomme de terre a augmenté progressivement pour atteindre environ 12 140 000 qx en 2019 (Figure 13).

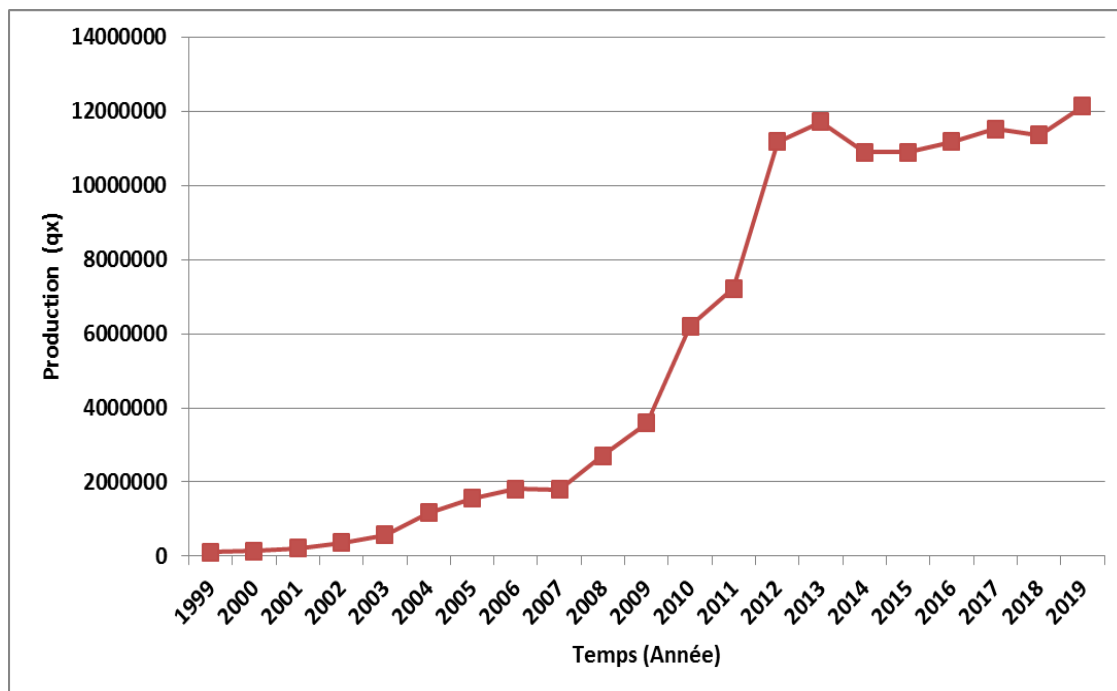


Figure 13. Evolution de la production de la pomme de terre (1999-2019)

5.3.7. Evolution du rendement

Le rendement est le rapport entre la production et la superficie, selon la figure 14, on observe: Une élévation du rendement entre les années 2000 et 2018, liée à l'augmentation en parallèle de la production cultivée de la pomme de terre. Le rendement reste plus ou moins stable entre 2001 et 2011 avec une légère augmentation en 2010 qui atteint 300 qx/ha.

La progression du rendement est plus remarquable entre 2010 et 2018, le rendement moyen varie entre 160-370 Qx/ha.

D'après l'enquête établie auprès des producteurs, ces fluctuations sont dues en général la méthode et quantité d'irrigation et des épisodes d'accidents climatiques (périodes de gel) mais aussi quelques fois à l'arrivée de semences de mauvaise qualité. Ce sont les variantes qui influencent le plus les rendements, à noter aussi que l'année 2008 représente l'année du début de l'utilisation des pesticides à El Oued d'où l'augmentation des rendements (Figure 14).

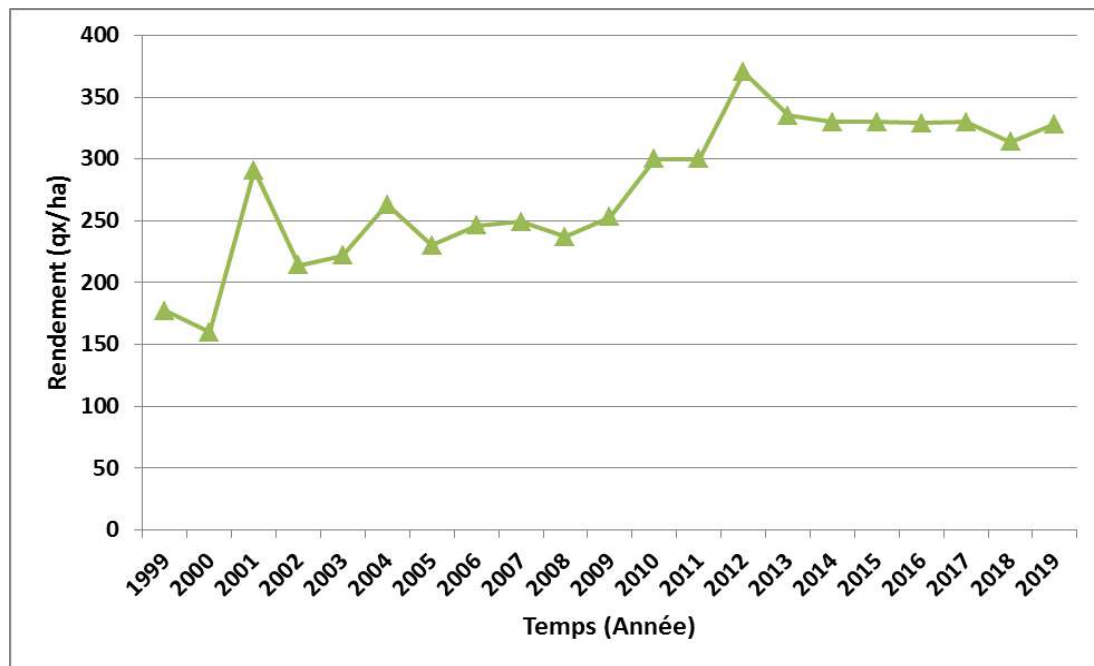


Figure 14. Evolution du rendement de la pomme de terre dans la région d'El Oued (1999-2019)

6. Conclusion

La vallée d'Oued-Souf est caractérisée par un climat aride, caractérisé par une faible et irrégularité des précipitations, ainsi que par des amplitudes thermiques et des températures trop élevées. La forte évaporation, l'un des principaux facteurs climatiques actuels de la région, est responsable de cette aridité.

Selon la synthèse des données climatiques, le climat de la région est hyper-aride, avec une irrégularité pluviométrique annuelle et interannuelle. L'existence de deux périodes distinctes dans ce climat est caractérisée par l'existence de deux périodes distinctes : l'une sèche et chaude, qui se déroule de mars à novembre, et l'autre humide et froide, qui se déroule le reste de l'année.

Le mois le plus humide est décembre, il est caractérisé par une forte humidité (environ 65.95 %) et d'un faible rayonnement solaire (environ 225,92 heures). Le mois le plus sec est juillet, il est caractérisé par une faible humidité (31.34 % environ). La brillance du soleil est très élevée avec 352,59 heures, ce qui traduit un pouvoir évaporant excessif.

Les conditions climatiques de la vallée d'Oued-Souf et les pratiques culturales influent directement sur le sol et sur la production elle-même, donc le maitrise du système devient très difficile (la méthode et quantité d'irrigation, la monoculture, la fertilisation et la température), et peut provoquer des dégâts des fois irréversibles. La dégradation des sols dans les zones sahariennes est conditionnée par deux facteurs : les conditions écologiques extrêmes et les activités agricoles qui aggravent l'état de dégradation de ces sols. La production de

maraichage occupe une place importante dans la région surtout la pomme de terre, elle devient une culture stratégique dans la Wilaya d'El oued, suite à la production très élevée enregistrée ces dernières années.

Le nombre des forages exploités dans La région d'Oued-Souf est actuellement de l'ordre de 734 forages en service mobilisent un volume total de 500.67 Mm³/an, dont 412 Mm³/an pour nappe du CT et le reste 88.67 Mm³/an pour nappe du CI.

La partie la plus importante des eaux mobilisées est destinée à la satisfaction des besoins agricole (utilisation pour l'irrigation), avec un volume de 379 Hm³/an.

Toutefois, cette dominance est due aux besoins d'irrigation qui ne cessent à croître. Les besoins domestiques tiennent une place prépondérante dans les prélèvements d'eau dans le bassin, un volume de 121 Hm³/ an des ressources mobilisées a parti la plus importante des eaux mobilisées est destinée à la satisfaction des besoins agricole (utilisation pour l'irrigation), avec un volume de 379 Hm³/an.

Chapitre III



ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE LA SALINISATION DES SOLS EN TERMES AGRICOLES



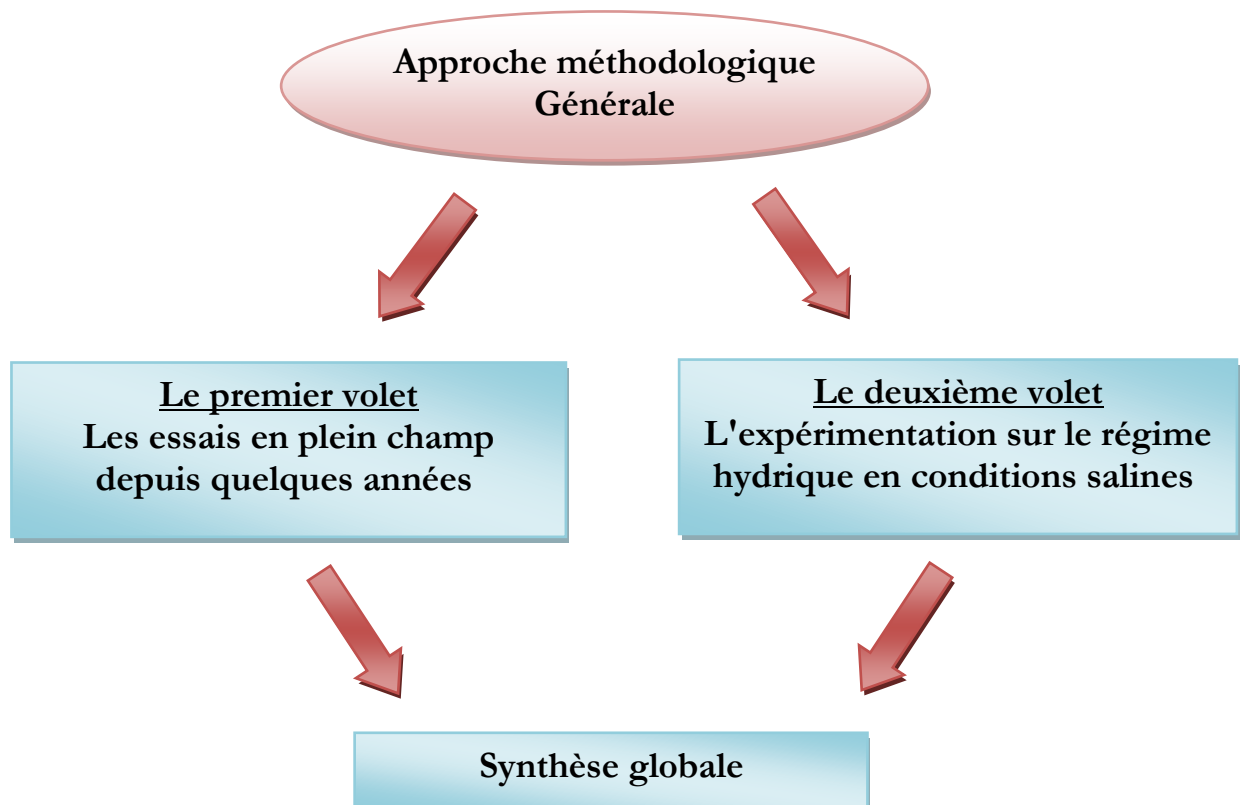
ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE SALINISATION DES SOLS EN TERMES AGRICOLES

1. Méthodologie générale

La salinisation secondaire est généralement associée à l'irrigation dans les régions arides. L'accumulation des sels dans le sol et la dégradation des rendements des cultures dans les zones irriguées sont principalement causées par une charge saline de l'eau et une mauvaise gestion de l'irrigation.

Le travail de recherche a été divisé en deux volets, le premier volet concerne les études sur terrain et la mise en évidence de la salinisation des sols dans la région qui est liée à l'effet de l'irrigation par pivots sur les propriétés des sols en fonction du temps. Le deuxième volet concerne l'expérimentation qui vise à apporter une contribution à la détermination de l'effet de la salinité du sol par une irrigation à court, moyen et long terme à travers une expérimentation

L'approche méthodologique est résumée dans ce qui suit :



2. Matériels d'étude:

2.1 Choix du site expérimental:

La vallée d'Oued - Souf est connue par sa production abondante de pomme de terre, selon les données statistiques des services agricoles de la wilaya, elle couvre plus de 26% des besoins du marché national, c'est la première zone productrice au niveau nationale (DSA, 2019). La pomme de terre est cultivée selon deux types ; la saison et l'arrière-saison. Les rendements les plus élevés sont ceux de la saison, ils oscillent entre 250 à 350 qx/ha. Les communes les plus productrices sont : Hassi Khalifa, Reguiba, Ourmes, Trifaoui, et Taghzout avec une production totale de 7631550 qx et une superficie cultivée 24337 ha (DSA, 2019).

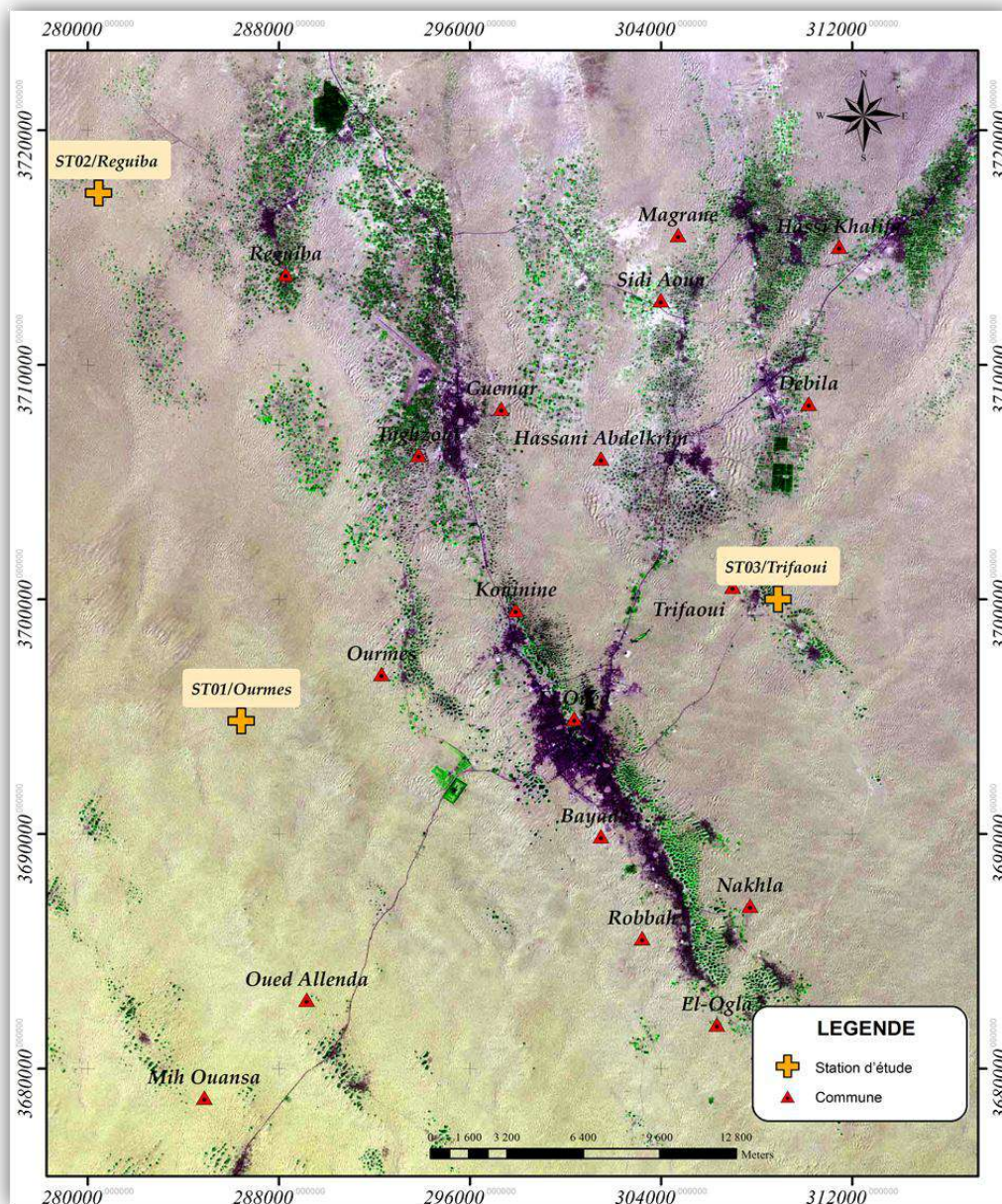


Figure 1. Situation des stations d'étude dans La vallée d'Oued - Souf (Google Earth, 2019)

Les différentes étapes de la méthodologie de travail sont schématisées comme suit :

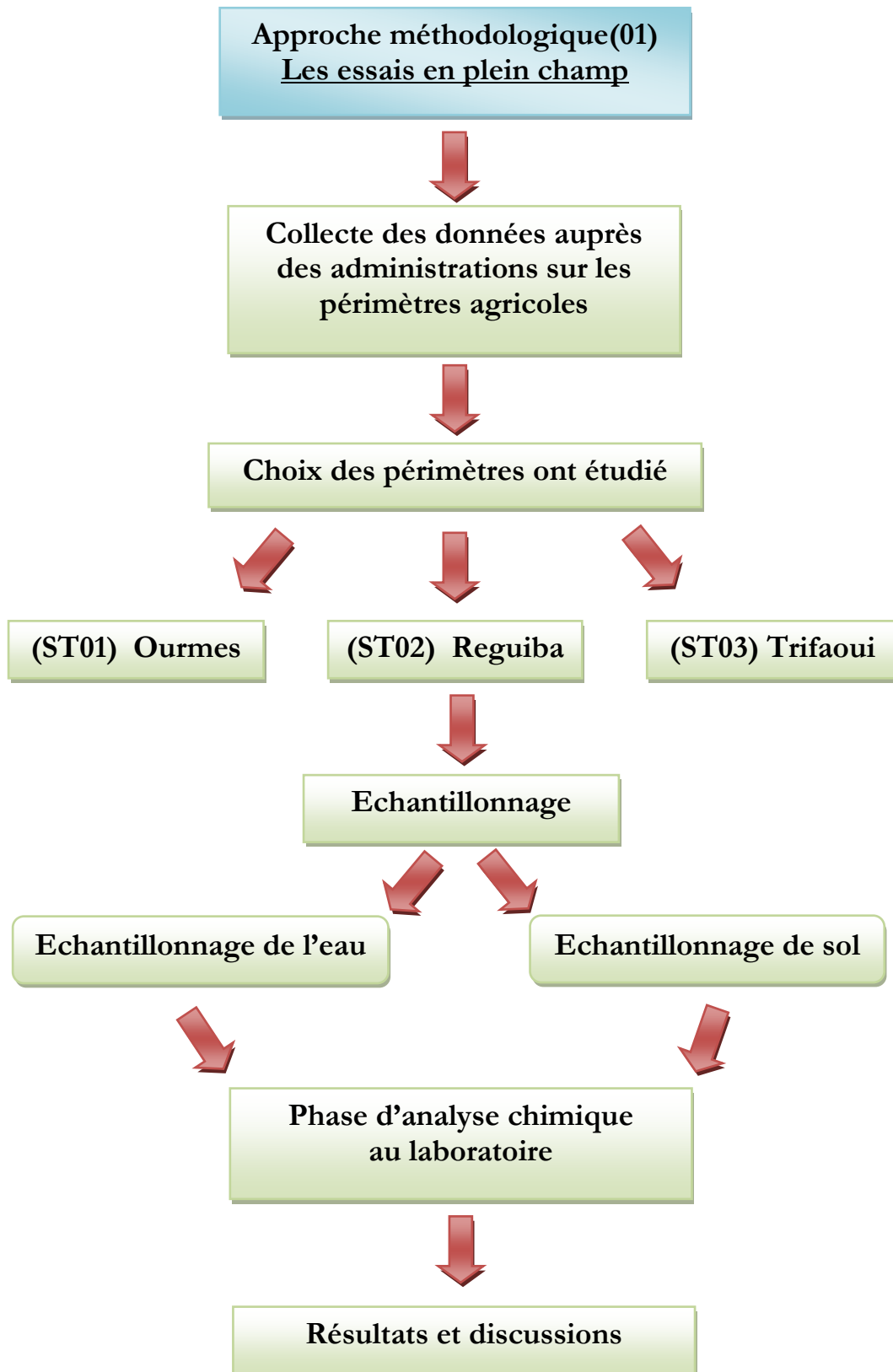


Figure 2. Schéma général de la méthodologie de travail du premier volet

2.2. Présentation de la station expérimentale:

2.2.1. Station d'Ourmes (ST01):

La station d'Ourmes est située à 18 km à nord-ouest de centre-ville, dont ses coordonnées spatiales sont $33^{\circ} 24' 19''$ N ; $06^{\circ} 46' 23''$ E. Elle est caractérisée par les plasticultures et la culture de la pomme de terre avec une superficie de 5529 hectares. (DSA, 2019).

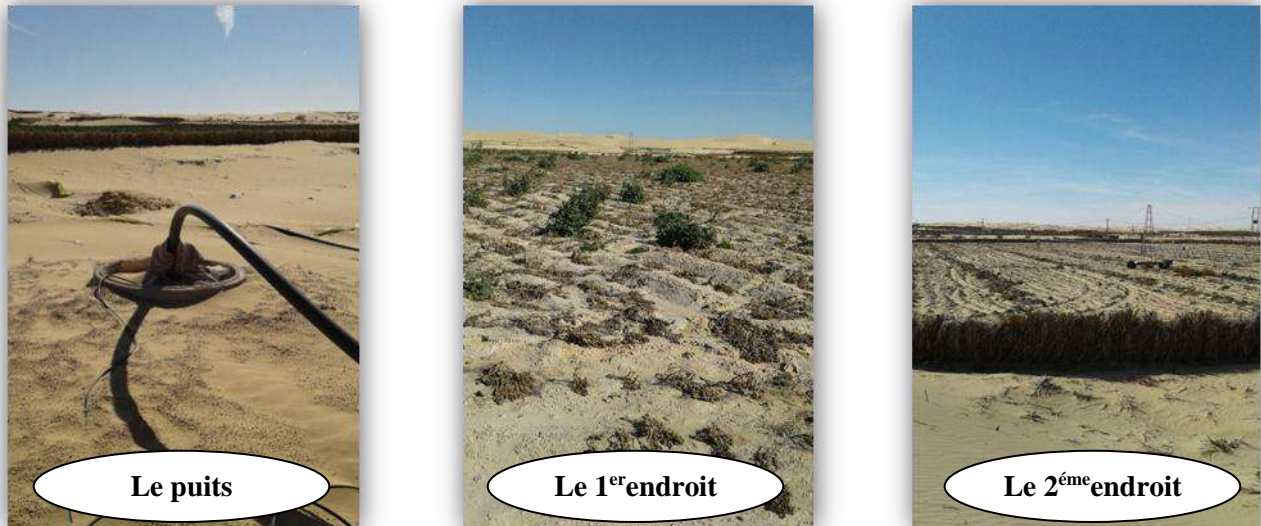
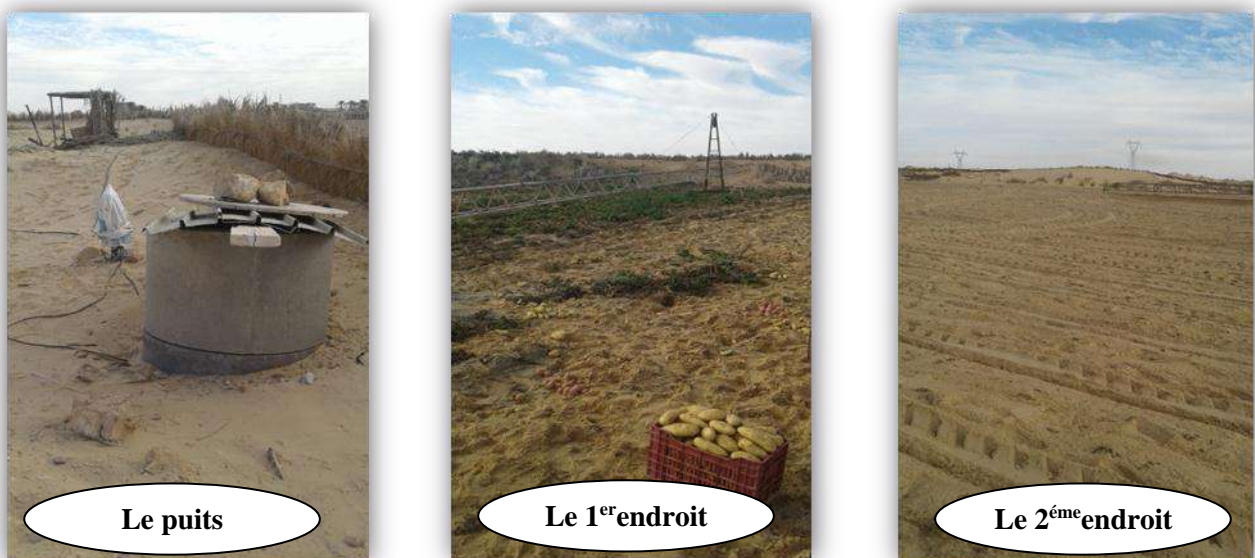


Photo 1. Les deux endroits (Choucha El-hamra) du 1^{er} Station (ZAIZ, 2020)

2.2.2. Station de Reguiba (ST02):

Cette station est situé à 35 km au nord- ouest de la ville d'El Oued, dont ses coordonnées spatiales sont $33^{\circ} 34' 14''$ N ; $06^{\circ} 43' 6''$ E. Elle est caractérisée par la phoeniciculture et la culture de la pomme de terre dont la superficie est de 5500 hectares (DSA, 2019).



.Photo 2. Les deux endroits (Nadour) du 2^{ème} Station (ZAIZ, 2020)

2.2.3. Station de Trifaoui (ST03):

La station de Trifaoui est située à 10 km au nord-est de centre-ville, dont ses coordonnées spatiales sont 33° 25' 24" N ; 06° 56' 09" E. Elle est caractérisée par les plasticultures et la culture de la pomme de terre avec une superficie de 4578 hectares. (DSA, 2019).



Photo 3. Les deux endroits (Kobna) du 3^{ème} Station (ZAIZ, 2020)

2.3. Matériel végétal utilisé

La pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.) appartient à la famille des Solanacées, genre *Solanum* (Quezel et Santa, 1963), comprend 1000 espèces dont plus de 200 sont tubéreuses, on pensait autrefois que la pomme de terre était issue d'une plante sauvage unique, l'espèce *Solanum tuberosum*, dès 1929, les botanistes avaient montré que cette origine était plus complexe et que l'on retrouvait parmi les ancêtres des espèces de pomme de terre cultivées, des plantes sauvages différentes.

3. Stratégie d'échantillonnage :

3.1. Pour le sol :

Neuf (09) échantillons de sol ont été collectés dans les trois stations de la zone d'Oued-Souf à partir de l'horizon supérieur (0-30 cm) (Annexe 02) au cours de juillet 2020.

La méthode d'échantillonnage consiste essentiellement à creuser un trou à l'aide de pelle ou de truelle à des profondeurs allant de 25 à 30 cm et à prélever le volume de sol désiré.

Le trou doit avoir une bonne surface avec des parois stables afin d'éviter que les sols de surface ne retombent dans le fond et qu'ils soient prélevés. L'échantillon doit alors être prélevé de préférence sur les parois, à une profondeur bien définie.

Dans chaque station agricole il y a trois parcelles irriguées par aspersion (centre pivot).

Le choix de ces 3 parcelles est justifié par le nombre d'année de leur mise en culture, la parcelle N°1 est cultivée et irriguée par aspersion (centre pivot) pendant 2 années (court terme), la parcelle 2, cultivée et irriguée par aspersion (centre pivot) pendant 5 années (moyen terme) et comparés au sol témoin (sol non cultivé, non irrigué) cultivée en pomme de terre et irriguée avec l'eau de la nappe phréatique (Photo 4).

3.2. Pour l'eau:

L'analyse a porté sur 3 échantillons d'eau prélevés en juillet 2020 dans les puits des stations. Les stations d'étude sont irriguées par un puits traditionnel captant l'eau de la nappe phréatique sur une profondeur de 60 m et un débit de 5 l/s.

Dans les trois stations étudiées, l'aspersion (pivot) est le moyen le plus utilisé pour irriguer les parcelles cultivées en pomme de terre avec un pourcentage de 96 % tandis que l'irrigation localisée (goutte à goutte) ne représente que 4 % des parcelles irriguées de la pomme de terre.

À proximité du chaque périmètre, on a effectué un échantillonnage au niveau d'un puits traditionnel exploité dans la nappe phréatique pour l'irrigation.

Les prélèvements des échantillons d'eau sont effectués au même temps que les échantillons des sols. Les prélèvements des échantillons d'eau sont recueillies dans des bouteilles en plastique étiquetées qui porte ; la date, et le numéro du site (Photo 4).



Photo 4.Prélèvements d'échantillons de sol nu (Sol témoin non irrigué) (A) et prélèvements d'échantillons de sol irrigué par pivot(B)prélèvements d'échantillons d'eau d'irrigation (C)(ZAIZ, 2020)

4. Méthodes d'analyse:

Nous allons présenter dans cette partie les différentes méthodes d'analyses effectuées sur les eaux et les sols par extraits aqueux : terre /solution eau 1/5.

4.1. Méthodes d'analyse des eaux

Les analyses des eaux ont été effectuées dans le laboratoire de l'Algérienne des eaux ADE de la wilaya d'El Oued. Les méthodes d'analyse utilisées au cours de notre expérimentation sont basées sur la méthodologie de Rodier (RODIER et al., 2005):

a). Degré de salinité: Permet de mesurer la conductivité (C.E) à 25°C. Il a été déterminé selon les protocoles de l'AFNOR (° NF T 90- 008 et NF EN 27888) en utilisant un conductimètre (HANNA INSTRUMENT HI 8733) (Photo 6)..

b). pH : Mesuré au pH mètre (HANNA 8424) (Annexe I) (AFNOR, 1999).

c). Charge saline: Elle est estimée par la détermination du résidu sec (R.S.) qui représente le poids de sels solubles par litre d'eau, séché à 110° C. (DURAND, 1958) ;

4.1.1. Le bilan cationique: pour Mg^{2+} et Ca^{2+} , on a utilisé la méthode de titrage molaire des ions de calcium et de magnésium avec une solution de sel désodique de l'acide éthylène diamine tétra acétique (EDTA) à PH10. Le noir ériochrome, qui donne une couleur rouge foncée ou violette en présence des ions calcium et magnésium, est utilisé comme indicateur. Pour les cations (Na^+ , K^+) : les dosages sont réalisés par spectrophotomètre d'émission atomique (photomètre à flamme) (Photo 5).



Photo 5. Appareil Photomètre de flamme
(ZAIZ, 2020)



Photo 6. Appareil conductimètre
(ZAIZ, 2020)

4.1.2. Le bilan anionique :

4.1.2.1. Dosage du chlorure: La méthode magnétométrique de MOHR est représentée ci-dessous : le chlore est dosé par titrimétrie, il est précipité par du nitrate d'argent en présence de chromate de potassium K_2CrO_4 qui a été ajouté comme indicateur. La fin de la réaction est indiquée par l'apparition d'un précipité rouge de chromate d'argent. (AFNOR, 1999).

4.1.2.2. Dosage des carbonates et bicarbonates: Détermination des volumes successifs d'acide fort en solution diluée nécessaire pour neutraliser, aux niveaux de pH = 8.3 et 4.3, le volume d'eau à analyser. La première détermination sert à calculer le titre alcalimétrique (TA), la seconde à calculer le titre alcalimétrique complet (TAC). En présence d'indicateurs, la fin de la réaction est indiquée par un changement de couleur, soit un virage.

4.1.2.3. Dosage des sulfates : Les sulfates sont dosés par méthode gravimétrique au $BaCl_2$ qui consiste à précipiter les ions SO_4^- sous forme de sulfate de Baryum ($BaSO_4$) en présence de $BaCl_2$ à 10% (AFNOR, 1999) (Photo 7).



Photo 7. Appareil Spectrophotomètre (ZAIZ, 2020)

5. Résultats et discussion

5.1. Analyse granulométriques du sol :

L'objectif de l'analyse granulométrique consiste donc à différencier par la taille les éléments minéraux du sol et à quantifier leur répartition pondérale. Dans les classes de diamètres prédéfinis, ces analyses sont effectuées au laboratoire à partir d'échantillons de sol. Leur principe repose sur la séparation des particules selon leur dimension ; généralement par la méthode utilisée « Pipette de Robinson » est basée sur la loi de STOCKES (Aubert, 1978 ; Mathieu et Pieltain, 1998) Différents traitements chimiques préalables servent à obtenir une bonne dispersion des particules élémentaires. Un premier traitement assure la destruction de la

matière organique par l'eau oxygénée, un deuxième assure la destruction du calcaire par HCl, ensuite une longue agitation dans l'eau suffit en présence d'un sel dispersant (Hexamétophosphate de sodium). Après une sédimentation libre sous l'action de la gravité, les particules tombent avec des vitesses constantes, d'autant plus grandes qu'elles sont plus grosses. Ainsi la fraction fine (argile : 0-2 μm et les limons fins : 2-20 μm) a été prélevée par la pipette de ROBINSON et la fraction grossière (sable grossier : 200-2000 μm , sable fins : 50-200 μm , limons grossiers : 20-50 μm) a été obtenus par tamisages successifs.

D'après les résultats obtenus de l'analyse granulométrique (Figure 3) (Photo 8), nous constatons que la texture du sol est dominée par les sables. En effet, la région de la vallée d'Oued-Souf entourée de dunes de sables dont l'effet du vent provoque l'accumulation de sable depuis plusieurs années, ce qui explique la forte dominance de la texture sableuse.



Photo 8. Détermination de la texture par la méthode de sédimentation (ZAIZ, 2020).

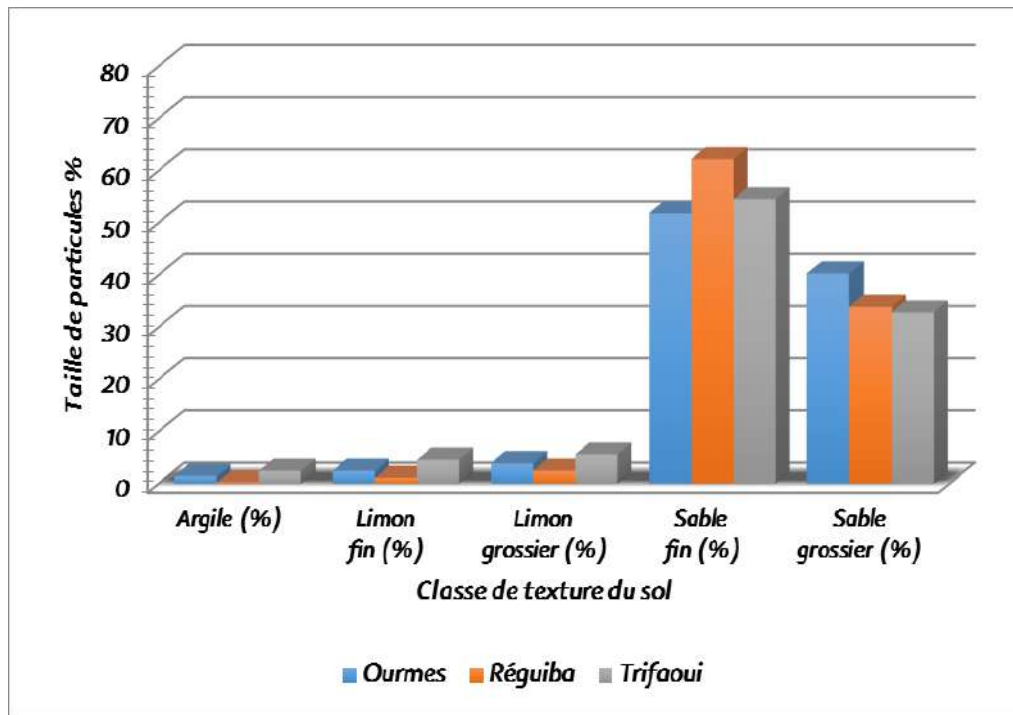


Figure 3. Résultats de l'analyse granulométrique des sols prélevés (3 échantillons)

5.2. Caractérisations morphologiques des stations agricoles :

Des visites scientifiques sur trois stations agricoles au 07/03/2020, 07/04/2020 et 11/04/2020 permis d'effectuer d'une part, des profils pédologiques verticaux du sol à trois points jusqu'à 100 cm (Photo 9), et de connaître les caractéristiques de chaque profondeur à chaque point de l'autre.



Photo 9. Profil pédologique et forme de surface pour les trois stations (ZAIZ, 2020).

5.2.1 Description morphologique (Station-1- d'Ourmes) :

- ✓ Date de description : Mars 2020
- ✓ Géomorphologie : Dunes
- ✓ Aspect de surface : Charge caillouteuse nulle
- ✓ Exposition : Nord –Ouest
- ✓ Lithologie : Sable
- ✓ Occupation du sol : Terre nu (non cultivé)
- ✓ Végétation : Pomme de terre (Espèce dominante)
- ✓ Coordonnées : X= 33° 11' 53''N Y= 06° 53' 03''E

5.2.1.1 Description morphologique du profil n° 01 (non cultivé):

H1 : 0 - 65 cm : sec, couleur 10YR 7/4, texture sableuse, structure meuble, présence de nombreuses racines, activité biologique non marquée, matière organique non décelable, effervescence à Hcl faible, transition nette.

H2 : 65 - 100 cm : sec, couleur 10YR 7/4, texture sableuse, structure polyédrique très fine, très friable, quelque racines, activité biologique non marquée, matière organique nulle, effervescence à Hcl moyenne.

5.2.2. Description morphologique (Station-2- de Reguiba):

- ✓ Date de description : Mars 2020
- ✓ Géomorphologie : Dunes
- ✓ Aspect de surface : Charge caillouteuse nulle
- ✓ Exposition : Nord –Ouest
- ✓ Lithologie : Sable
- ✓ Occupation du sol : Terre nu (non cultivé)
- ✓ Végétation : Pomme de terre (Espèce dominante)
- ✓ Coordonnées : X= 33° 11' 53''N Y= 06° 53' 03''E

5.2.2.1 Description morphologique du profil n° 02 (non cultivé):

H1 : 0 - 65cm : sec, couleur 10YR 7/4, texture sableuse, structure meuble avec présence de paillettes de gypse brillantes, nombreuses racines, activité biologique marquée, matière organique non décelable, effervescence à Hcl moyenne, transition nette.

H2 :65 - 100cm : sec, couleur 10YR 8/3, texture sableuse avec présence de gypse, structure polyédrique fine, très friable, nombreuses racines, activité biologique non marquée, matière organique nulle, porosité faible, effervescence à Hcl faible.

5.2.3. Description morphologique (Station-3- Trifaoui):

- ✓ Date de description : Mars 2020
- ✓ Géomorphologie : Dunes
- ✓ Aspect de surface : Charge caillouteuse nulle
- ✓ Exposition : Nord –Ouest
- ✓ Lithologie : Sable
- ✓ Occupation du sol : Terre nu (non cultivé)
- ✓ Végétation : Pomme de terre (Espèce dominante)
- ✓ Coordonnées : X= 33° 11' 53''N Y= 06° 53' 03''E

5.2.3.1. Description morphologique du profil n° 03 (non cultivé):

H1 : 0 - 65 cm : sec, couleur 10YR 7/4, texture sableuse, structure meuble, présence de nombreuses racines, activité biologique non marquée, matière organique non décelable, effervescence à Hcl faible, transition nette.

H2 : 65 - 100 cm : sec, couleur 10YR 7/4, texture sableuse, structure polyédrique très fine, très friable, quelque racines, activité biologique non marquée, matière organique nulle, effervescence à Hcl moyenne.

5.3. Caractérisation physicochimique des eaux d'irrigation:

Les données statistiques des analyses physico-chimiques des eaux de la nappe phréatique exploitées dans la présente étude sont présentées dans le tableau 1 et leur matrice de corrélation dans le tableau 2.

Tableau 1. Les paramètres statistiques mesurés des eaux de la nappe phréatique (Puits)

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	CV
CE (dS·m ⁻¹)	3,66000	5,55000	4,41000	1,0000	0,2283
Ca ²⁺ (méq/l)	20,2000	28,0000	24,6667	4,0216	0,1630
Mg ²⁺ (méq/l)	4,4000	20,7800	12,7900	8,1973	0,6409
Na ⁺ (méq/l)	3,8200	27,6800	15,1700	11,9722	0,7892
K ⁺ (méq/l)	0,3700	0,7700	0,5200	0,2179	0,4191
HCO ₃ ⁻ (méq/l)	1,0400	2,5200	1,7467	0,7422	0,4250
NO ₃ ⁻ (méq/l)	1,2900	2,3100	1,8433	0,5155	0,2797
Cl ⁻ (méq/l)	11,0000	26,6000	18,4667	7,8213	0,4235
SO ₄ ²⁻ (méq/l)	16,6700	45,3900	31,5133	14,3844	0,4565
PH	7,8700	7,9500	7,9033	0,0416	0,0053
SAR	0,8439	6,2691	3,5313	2,7129	0,7683

Tableau 2. Matrice de Corrélation (Pearson) des différents paramètres mesurés.

	CE	PH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	SAR
CE	1										
PH	-0,1049	1									
Ca ²⁺	0,4100	0,8640	1								
Mg ²⁺	-0,1334	-0,9716	-0,9586	1							
Na ⁺	0,9654	0,1581	0,6337	-0,3873	1						
K ⁺	0,9983	-0,1630	0,3559	-0,0751	0,9484	1					
HCO ₃ ⁻	0,9637	0,1642	0,6385	-0,3930	1,0000	0,9465	1				
NO ₃ ⁻	0,8806	0,3789	0,7933	-0,5872	0,9737	0,8513	0,9751	1			
Cl ⁻	-0,2473	-0,9377	-0,9851	0,9933	-0,4914	-0,1901	-0,4968	-0,6769	1		
SO ₄ ²⁻	0,9187	0,2964	0,7369	-0,5140	0,9899	0,8940	0,9908	0,9962	-0,6098	1	
SAR	0,9455	0,6846	-0,4486	0,9977	0,9239	0,9981	0,9869	-0,5492	0,9972	0,2245	1

Les résultats de l'analyse des paramètres physico-chimiques de l'eau de la nappe phréatique montrent une conductivité électrique moins élevée à élevée (3.65 à 5.55 mS/cm). Elle est principalement liée à la forte présence de Sodium Na⁺, de chlorures Cl⁻, de calcium Ca²⁺, de magnésium Mg²⁺ et de sulfates SO₄²⁻. La forte liaison entre les éléments évaporitiques (Na⁺, Cl⁻, Ca²⁺ et SO₄²⁻) dans les eaux est principalement due aux matériaux qui provoquent leur salinisation. Ces eaux ont une teneur en chlore supérieure à 10 meq/l, qui est le seuil maximum autorisé pour les plantes, ce qui explique leur toxicité par les chlorures (Ayers et Westcot, 1988).

Le pH de l'eau indique l'acidité ou l'alcalinité de l'eau. Sa détermination préalable permet d'éviter les risques d'alcalinité et de précipitation des éléments chimiques, en particulier pour le colmatage (carbonate). La forme et la disponibilité des éléments nutritifs dans l'eau d'irrigation sont influencées par le pH. L'absence d'une relation significative entre ces deux paramètres pH-HCO₃ confirme que le pH est neutre à légèrement basique en raison de la faible présence de bicarbonates. Il oscille entre 7.87 et 7.97, avec une moyenne de 7.90. En règle générale, il correspond à l'eau des puits. Selon Aubert (1983), ce pH est autorisé à être utilisé pour l'irrigation des cultures.

Le SAR a une relation significative avec la CE, avec la forte présence du sodium, du calcium et du sulfate. Il varie 0.84 à 6.26 avec une moyenne de 3.53 ; ces valeurs donnent 2 classes de SAR, Selon le diagramme de Riverside : S1 pour le puits du ST1 (0<S1<4), S2 pour 2 le puits du ST2 et pour ST3 (4<S2<8) ; traduisant une absence à faiblement présence du risque de sodisation. La qualité de l'eau d'irrigation est appréciée en utilisant le diagramme de classification des eaux de l'U.S.S.L (1954) modifié (Durand, 1958). Le report des échantillons sur ce diagramme de Riverside (fig.50) indique que la salinité, représentée par la conductivité électrique CE, est forte (C4) et la sodicité, illustrée par le SAR (Sodium Adsorption Ratio), selon Servant et Servat,

(1966), et selon le degré d'alcalinisation appartient à la classe 1 où ce risque est nul ($0 < S1 < 4$) pour un 1 échantillon et à la classe faible S2 ($4 < S2 < 8$) pour les 2 échantillons.

De ce fait, en se basant sur le diagramme de détermination de la qualité de l'eau d'irrigation (Riverside) relative à CE et le SAR, les résultats de classement des puits révèlent l'existence des classes suivantes : C_4S_1 , C_4S_2 , expriment une qualité médiocre à mauvaise (Figure 5) ; traduisant une mauvaise qualité chimique de ces eaux. Par conséquent, les eaux principalement de la classe C_4 ne peuvent être utilisées en irrigation que dans le cas des sols très drainants (sables et graviers) riches en calcium soluble (Dubost, 1994).

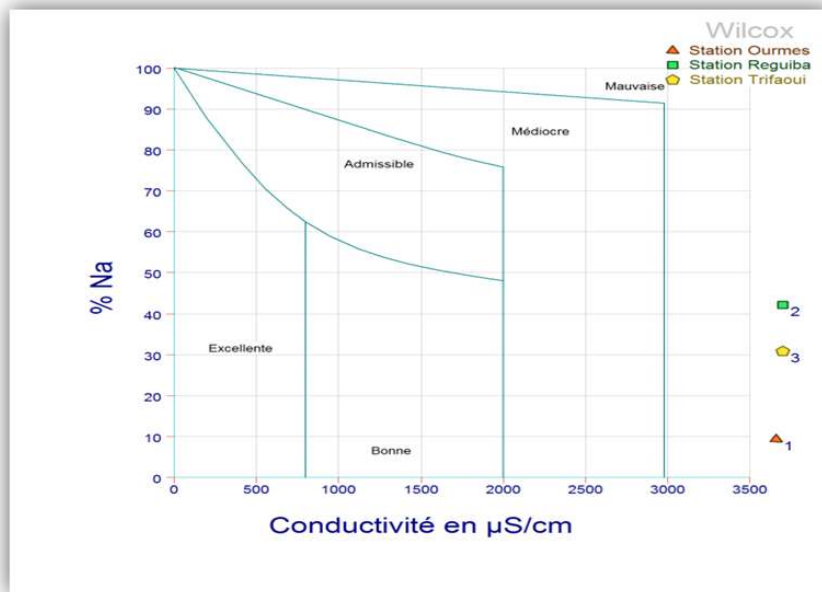


Figure 4. Diagramme de Wilcox des eaux d'irrigation de la zone d'étude

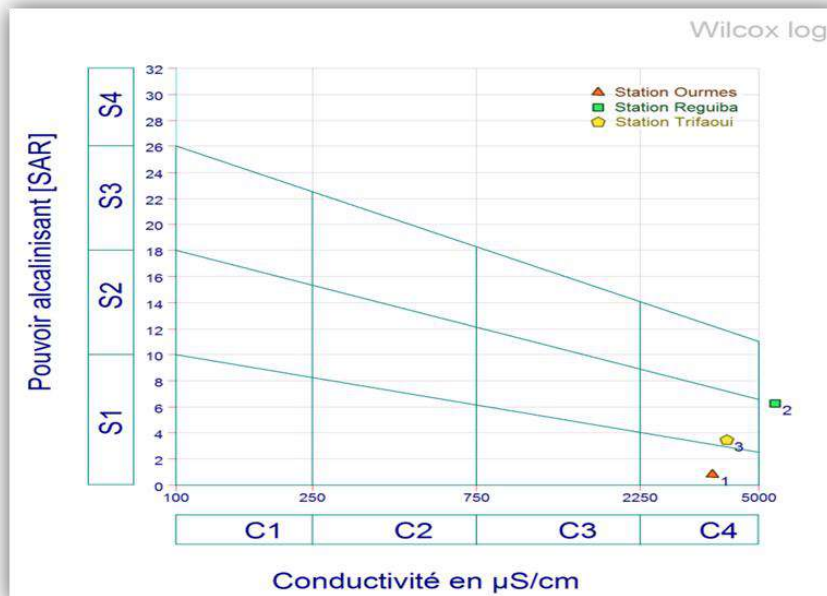


Figure 5. Diagramme de Riverside des eaux d'irrigation de la zone d'étude

5.3.1. Faciès chimique des eaux d'irrigation:

Pour bien identifier les faciès chimiques et donner des indications sur les aspects qualitatifs des eaux souterraines, la représentation graphique des résultats de l'analyse révèle un outil incontournable. Pour atteindre cet objectif, les données hydrochimiques recueillies sont projetées sur le diagramme de Piper (Piper, 1944) en utilisant le logiciel DIAGRAMME V 6.5 (Smiler, 2009). Ce diagramme a la particularité de représenter plusieurs échantillons sur le même plan. Il est composé de deux triangles, et permet de déterminer les faciès cationiques et le faciès anioniques. Le faciès global est obtenu par l'intersection sur un losange synthétisant le faciès chimique d'échantillonnage considéré.

En utilisant le diagramme de Piper, le bilan ionique est calculé pour déterminer le faciès de salinisation de l'eau. De plus, cela permet d'évaluer les risques de toxicité associés à certains sels. Il s'agit des anions HCO_3^- , SO_4^{2-} et Cl^- ainsi que des cations Na^+ , K^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+} . Les milliéquivalents par litre sont utilisés pour représenter ces concentrations en ions.

La dominance du calcium et du magnésium par rapport aux autres cations dans l'eau d'irrigation est marquée par le bilan cationique $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$. Cependant, le bilan anionique est marqué par la majorité des sulfates dans tous les puits examinés, suivis des chlorures et des bicarbonates, avec des teneurs de HCO_3^- faibles par rapport aux autres anions $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^-$. Selon le diagramme de Piper (Figure 6), les eaux des puits appartiennent à une seule famille d'eau principale : le faciès sulfaté calcique et magnésien pour tous les échantillons.

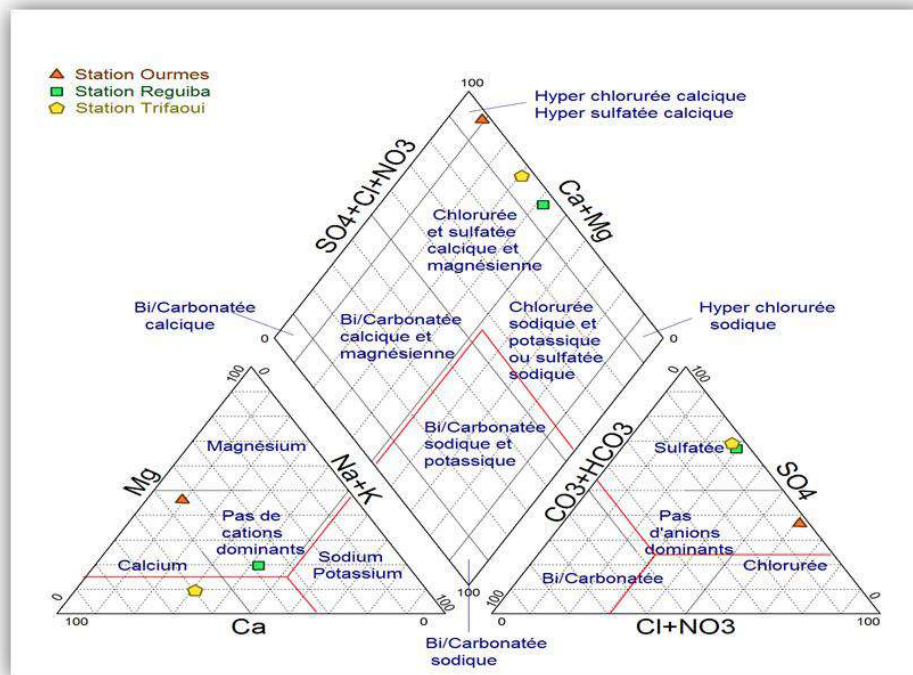


Figure 6. Diagramme de Piper des eaux d'irrigation de la zone d'étude

5.4. Géochimie et l'Indice de saturation (SI) des minéraux des eaux d'irrigation :

La simulation à l'évaporation naturelle des eaux de la nappe de calcaire a été effectuée à l'aide logiciel thermodynamique «IS selon le modèle Phreeqc 3.0, Parkhurst et Appelo, 2013, en termes d'équilibres sels/solution. Elle montre que les solutions sont déjà sursaturées (précipitation) selon les cas Dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), Calcite (CaCO_3), Aragonite (CaCO_3).

L'indice de saturation de ces minéraux carbonatés est positif et varie entre 0.47 et +1.84. Pour les minéraux évaporitiques, ils se trouvent tous en état de sous saturation (état de dissolution) pour l'anhydrite (CaSO_4), le gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) ainsi que l'halite (NaCl) se présente largement sous saturé ($-6.15 < \text{IS} < -5.10$), ce qui lui permet de se dissoudre davantage dans les eaux contribuant à une augmentation de la minéralisation (Tableau 3).

Selon l'analyse statistique de l'indice de saturation des minéraux présents dans l'eau d'irrigation provient des puits alimentés par la nappe de calcaire, toutes les eaux sont sous saturées par rapport aux minéraux évaporitiques notamment le gypse, l'anhydrite et la calcite, par contre elles sont sur saturés en minéraux carbonatés (aragonite, calcite et dolomite) qui se précipitent largement. Cette simulation confirme l'influence des roches évaporitiques sur la salinité des eaux analysées et l'importance de l'halite dans le chimisme. Les minéraux carbonatés se trouvent dans l'eau à l'état de sursaturation et précipitent sous forme de calcite, d'aragonite et de dolomite.

Tableau 3. Indice de Saturation (IS selon le modèle Phreeqc 3.0, Parkhurst et Appelo, 2013) des eaux de la nappe phréatique (puits).

Les points d'eaux	Minéraux carbonatés			Minéraux évaporitiques		
	IS aragonite	IS calcite	IS dolomite	IS gypsum	IS halite	IS anhydrite
P01	0,47	0,61	1,41	-0,52	-5,76	-0,77
P02	0,85	0,99	1,84	-0,09	-5,10	-0,34
P03	0,73	0,87	1,30	-0,20	-6,15	-0,45

Tableau 4. Analyse statistique de l'Indice de Saturation (IS selon le modèle Phreeqc 3.0, Parkhurst et Appelo, 2013) des eaux de la nappe phréatique (puits).

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
IS aragonite	0,4700	0,8500	0,6833	0,1943
IS calcite	0,6100	0,9900	0,8233	0,1943
IS dolomite	1,3000	1,8400	1,5167	0,2854
IS gypsum	-0,5200	-0,0900	-0,2700	0,2234
IS halite	-6,1500	-5,1000	-5,6700	0,5308
IS anhydrite	-0,7700	-0,3400	-0,5200	0,2234

5.5. Caractéristiques physico-chimiques du sol :

5.5.1. Variation de la Conductivité électrique (C.E) du sol :

Les résultats de l'analyse du CE représentés dans la (Figure 8), montrent une augmentation significative de CE dans la couche arable des sols (0-30 cm), il est comparable à celui du témoin (non irrigué). Pour les trois stations cultivés pendant 2 (Court terme) et 5 (moyen terme) années les valeurs oscillent entre 0,81 à 8,63 mS/cm cela déduit l'effet de l'activité agricole par l'utilisation des engrais et l'irrigation.

D'après AUBERT (1978) (Annexe 3), pour les 2 années d'irrigation (court terme) des trois stations, la CE d'extraits aqueux (1/5) varie entre 0.40 et 1.45 dS/m, elle correspond aux classes salée. Lors des 5 années des trois stations (moyen terme), la CE varie de 1.13 à 1.90 dS/m, elle correspond aux classes fortement salé .La comparaison de cet état de salinité avec le témoin (non irrigué).qui est varié entre 0.19 et 0.58 dS/m elle correspond aux classes non salée donne une différence significative de CE.

L'irrigation des sols cultivés pour 2 et 5 années (court et moyen terme) provoque une salinité importante ; les valeurs de la CE obtenues sont comparables à celles du témoin (non irrigué).

La salinité du sol pour les trois stations augmente avec l'augmentation de la température. Cette augmentation de la salinité est attribuée aux effets conjugués de la qualité de l'eau d'irrigation préalablement salée, aux conditions climatiques très arides produisant une forte évapotranspiration qui concentre la solution du sol (Cheverry et Robert, 1998), sol ou des dépôts de sels à la surface du sol (un encroustement gypseux). (Photo 9)



Photo 10. La dégradation du sol sableux par un dépôt de sels à la surface (un encroustement gypseux) après une irrigation à court et moyen terme (ZAIZ, 2020).

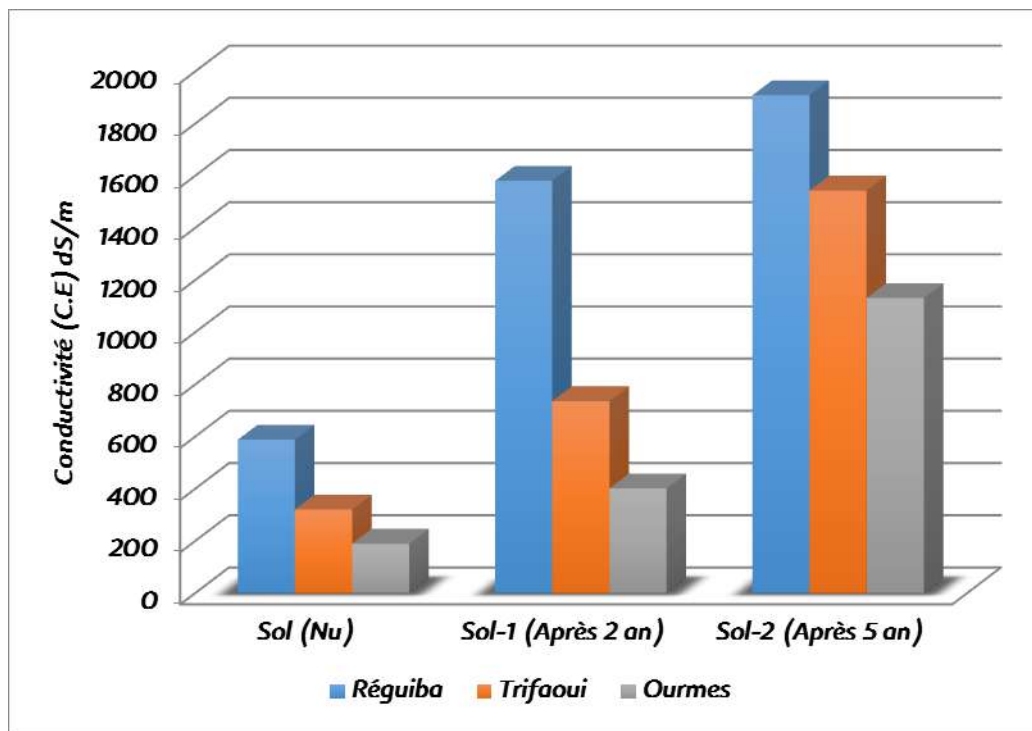


Figure 7. Variation du CE sol dans les sites irrigués pendant 2 et 5 années.

5.5.2. Variation du PH des sols :

Le pH est un paramètre important de la dynamique du sol, c'est une clé en agronomie, car le degré d'acidité ou de basicité joue un rôle très important sur l'assimilation des éléments nutritifs par la plante, il a une influence sur trois composantes importantes de la fertilité d'un sol : la biodisponibilité des nutriments, l'activité biologique et la stabilité structurale.

La variation du pH dépend des variations saisonnières et du pouvoir tampon du sol (le nombre d'ions en réserve sur le complexe argilo-humique), l'état hydrique du sol, sa température et la présence, ou non d'une culture en période de croissance active (Dinon E., Gerstmans, ,2008).

Les résultats de l'analyse du pH sont représentés dans la (Figure 7), montrant que Selon Morand (2001) (Annexe 06) la majorité des sols étudiés, ont des pH moyennement basique à tendance alcaline. Ils varient de 7.04 à 8.20 Les valeurs de pH semblent être en accord avec le niveau d'alcalinité rencontré dans les sols étudiés qui est généralement faible. Les sols salés ont un pH qui ne s'élève pas au-dessus de 8.2. L'accumulation des sels solubles, réduit le pH des sols salés, Cette faible variation du pH est due à l'effet tampon exercé par les ions calciques et magnésiens qui saturent le complexe adsorbant et la phase liquide des sols de ces régions (Gupta et Abrol.1990).

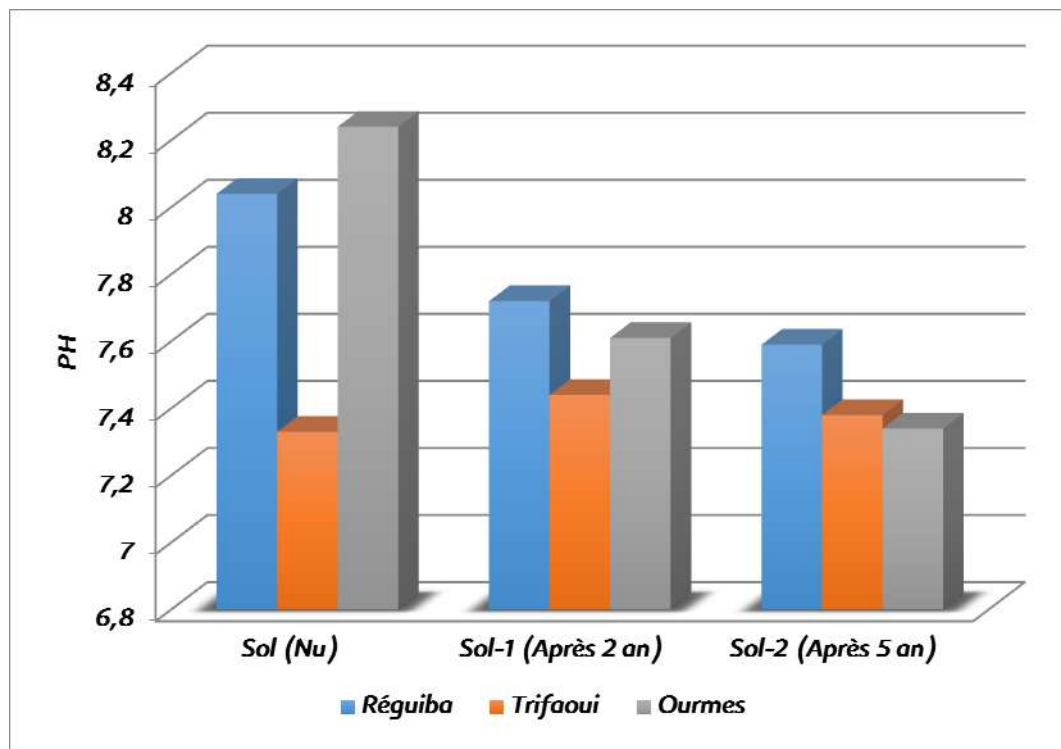


Figure 8. Variation du pH sol dans les sites irrigués pendant 2 et 5 années

5.5.3. Evolution du faciès chimiques de la solution du sol :

➤ La 1^{ère} station d'Ourmes montre que :

Le cation dominant dans la solution aqueuse (1/5) est le Ca^{2+} avec 77.77 % c'est après 5 années d'irrigation ; viennent ensuite les ions Mg^{2+} avec 17,14 %, le Na^+ 3,81 % et enfin le K^+ avec 1,27 % au classement selon l'ordre suivant ($\text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$).

Pour les anions cette solution contient une quantité très importante de SO_4^{2-} environ de 88.58 % c'est après 5 années d'irrigation, cependant les Cl^- qui sont quantitativement moins présents que les sulfates avec un taux de 6,76 %. Les HCO_3^{3-} sont enfin, représentés par une valeur (4,65 %) au classement selon l'ordre suivant ($\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^{3-}$).

Le faciès chimique est de type sulfaté - calcique dans l'ensemble du type de sols (Figure 22).

➤ La 2^{ème} station Reguiba montre que :

Le cation dominant dans la solution aqueuse (1/5) est le Ca^{2+} avec 87.97 % c'est après 5 années d'irrigation ; viennent ensuite les ions Mg^{2+} avec 10.76 %, le Na^+ 4.31 % et enfin le K^+ avec 1,09 % au classement selon l'ordre suivant ($\text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$).

Pour les anions cette solution contient une quantité très importante de SO_4^{2-} environ de 91,82% c'est après 5 années d'irrigation, cependant les Cl^- qui sont quantitativement moins présents que les sulfates avec un taux de 6.22 %. Les HCO_3^{3-} sont enfin, représentés par une valeur négligeable (1.96%) au classement selon l'ordre suivant ($\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^{3-}$).

Le faciès chimique est de type sulfaté - calcique dans l'ensemble du type de sols (Figure 22).

➤ La 3^{ème} station Trifaoui montre que :

Le cation dominant dans la solution aqueuse (1/5) est le Ca^{2+} avec 92.21 % c'est après 5 années d'irrigation ; viennent ensuite les ions Mg^{2+} avec 3.28 %, le Na^+ 3.08 % et enfin le K^+ avec 1,43 % au classement selon l'ordre suivant ($\text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$).

Pour les anions cette solution contient une quantité très importante de SO_4^{2-} environ de 81.72 % c'est après 5 années d'irrigation, cependant les Cl^- qui sont quantitativement moins présents que les sulfates avec un taux de 15.71 % . Les HCO_3^{3-} sont enfin, représentés par une valeur négligeable (2,57 %) au classement selon l'ordre suivant ($\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^{3-}$).

Le faciès chimique est de type sulfaté - calcique dans l'ensemble du type de sols (Figure 22). On note l'influence des eaux d'irrigation sur le sol qui ont un faciès sulfaté - calcique.

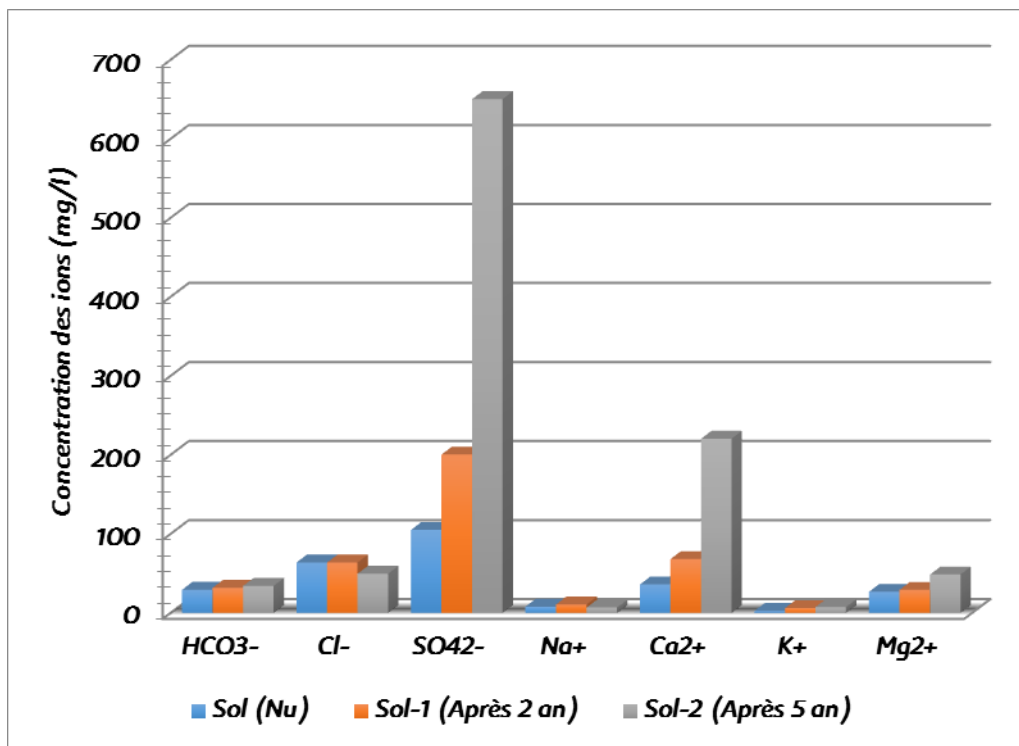


Figure 09. Répartition de la concentration des ions de sol (Extrait 1/5) irrigués pendant 2, 5 années et du sol nu (témoin) dans la station d’Ourmes

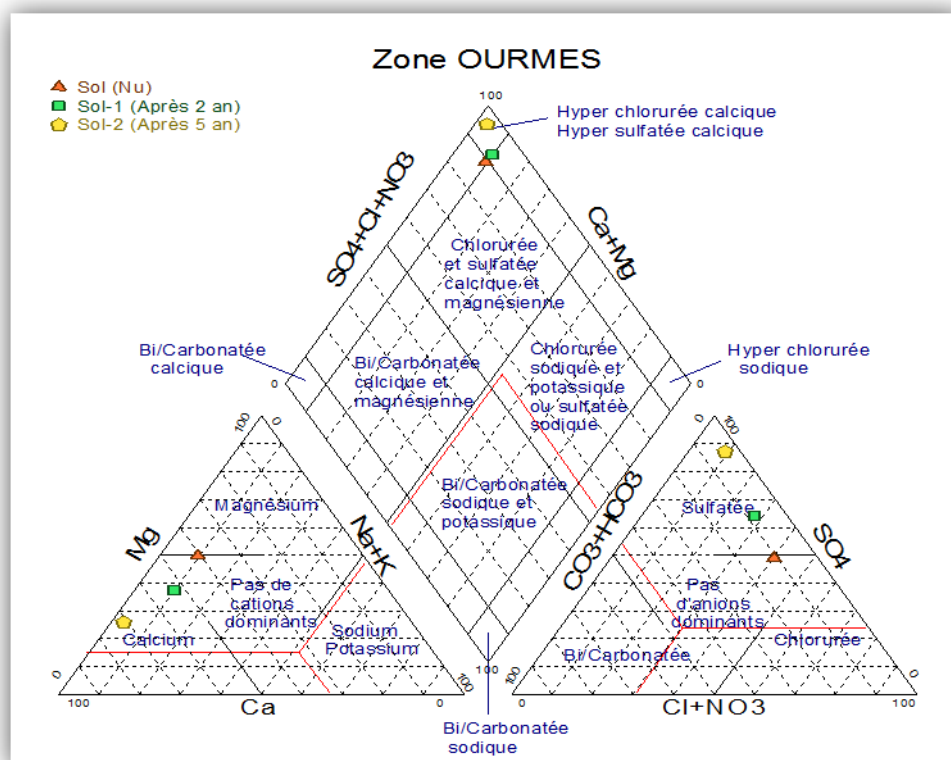


Figure 10. Représentation sur le diagramme de piper des solutions d’extraits aqueux 1/5 irrigués pendant 2, 5 années et du sol nu (témoin) dans la station d’Ourmes

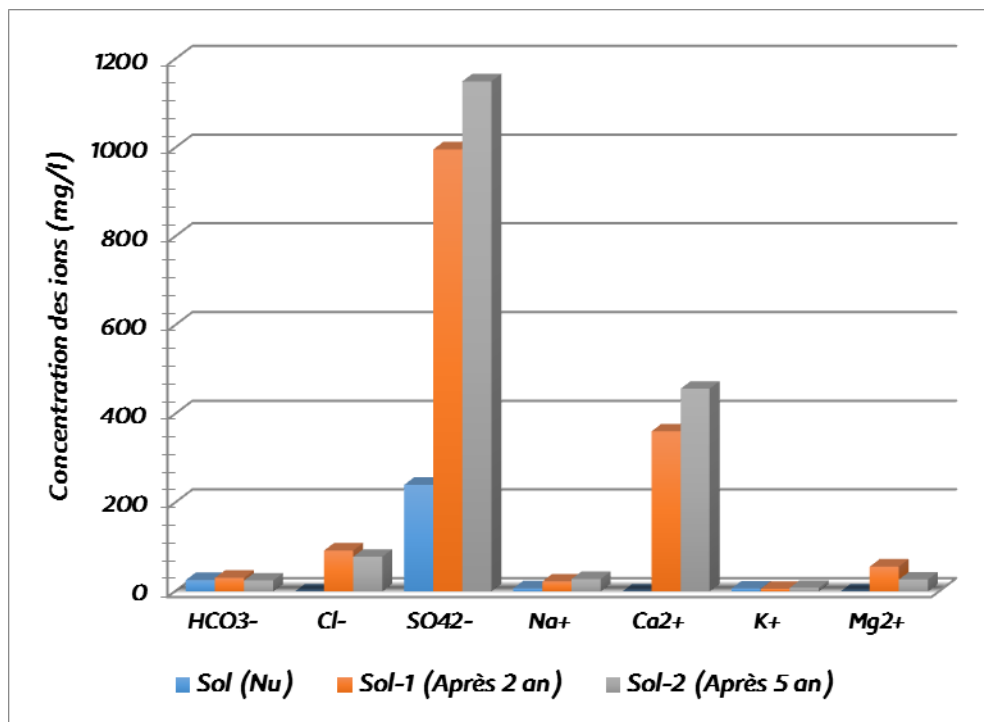


Figure 11. Répartition de la concentration des ions de sol (Extrait 1/5) irrigués pendant 2, 5 années et du sol nu (témoin) dans la station Reguiba

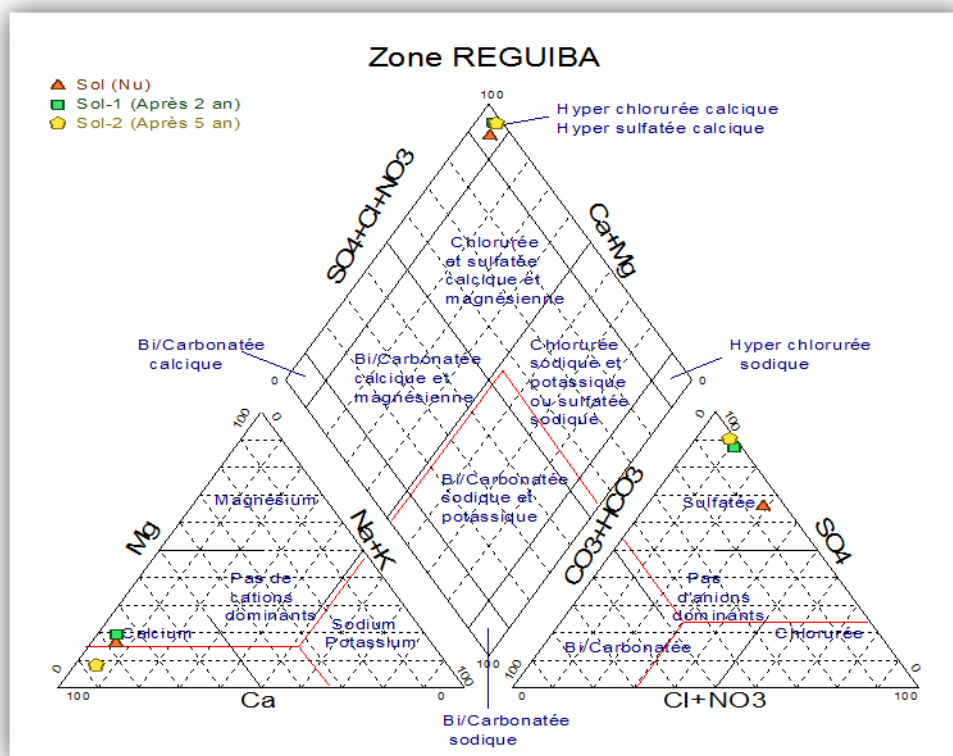


Figure 12. Représentation sur le diagramme de piper des solutions d'extraits aqueux 1/5 irrigués pendant 2, 5 années et du sol nu (témoin) dans la station Reguiba

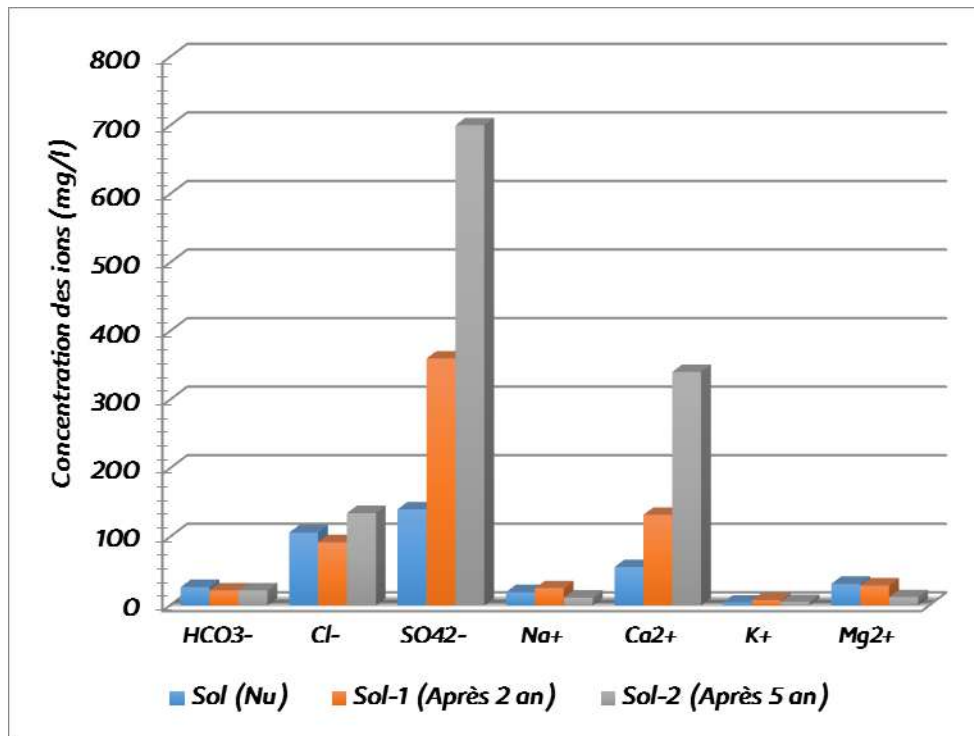


Figure 13. Répartition de la concentration des ions de sol (Extrait 1/5) irrigués pendant 2, 5 années et du sol nu (témoin) dans la station Trifaoui

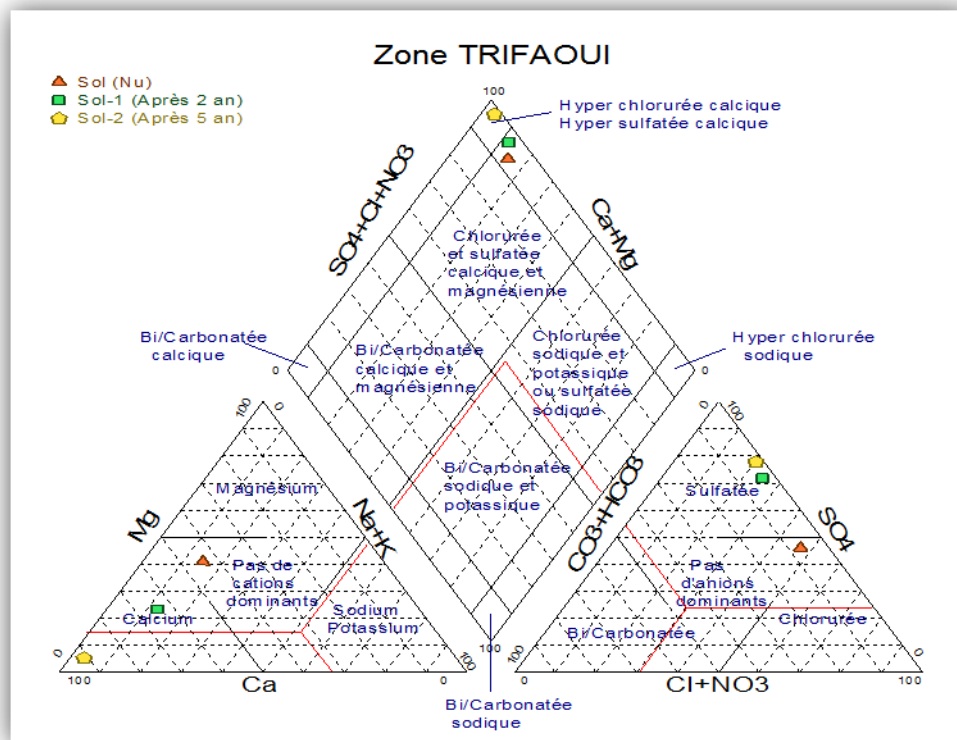


Figure 14. Représentation sur le diagramme de piper des solutions d'extraits aqueux 1/5 irrigués pendant 2, 5 années et du sol nu (témoin) dans la station Trifaoui

5.6. Spéciation des cations et anions dans les solutions extraites des sols :

Le logiciel Visual MINTEQ (version MINTEQ3.0) a été utilisé pour calculer la distribution de masse des espèces anioniques et cationiques en utilisant la composition de la solution sol de l'extrait de pâte saturée. Afin de soutenir l'interprétation des relations observées par l'analyse multivariable, nous voulions rapporter la spéciation ionique la plus probable dans des échantillons de solution de sol.

Dans les échantillons de sol, les différentes formes de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ et Na^+ étaient les cations dominants (Tableau 5, 6, 7). Cependant, la teneur totale a été grandement influencée par les espèces de sulfates de calcium et de magnésium.

D'après nos résultats (Tableau 5, 6, 7). Le calcium a montré une bonne coordination avec SO_4^{2-} et constitue 7, 12 et 22% de la teneur totale en Ca^{2+} dans des solutions d'extraits dans la première station ST1 d'Ourmes tandis que dans la deuxième station ST2 Trifaoui cette coordination s'augmente à 10, 17 et 29% et de la même manière dans la troisième station ST3 Reguiba, cette coordination s'augmente à 18, 26 et 30%. Alors que les espèces $\text{MgSO}_4(\text{aq})$ constituaient 7, 12 et 22% du Mg^{2+} total dissout dans la solution extraite des sols dans les deux stations, dans le troisième poste ST3 Reguiba cette coordination a diminué jusqu'à 10, 17 et 29%

Cependant, des espèces de sulfates dans le sodium et le potassium étaient présentées en quantités négligeables (< 1%) dans tous les échantillons du sol des trois stations.

Tableau 5. La distribution de la masse des cations et anions dans les différentes spéciations dans les solutions extraites des sols de la station d'Ourmes

Component	Espèce chimique	ST.01 OURMES (Choucha El-hamra)		
		Sol (Nu)	Sol (Après 2 an)	Sol (Après 5 an)
		Total %	Total %	Total %
Magnésium	Mg^{+2}	91,102	87,109	77,403
	MgCl^+	0,469	0,422	0,245
	$\text{MgSO}_4(\text{aq})$	7,822	12,106	22,096
	$\text{MgCO}_3(\text{aq})$	0,219	0,048	0,019
	MgHCO_3^+	0,314	0,3	0,23
Chlorure	Cl^-	99,552	99,452	99,059
	CaCl^+	0,145	0,243	0,574
	MgCl^+	0,287	0,281	0,35
	$\text{NaCl}(\text{aq})$	0,014	0,018	0,01
Sulfate	SO_4^{-2}	83,998	80,7	71,83
	$\text{MgSO}_4(\text{aq})$	7,863	6,962	6,527
	$\text{CaSO}_4(\text{aq})$	7,995	12,136	21,519
	NaSO_4	0,113	0,138	0,065
	KSO_4	0,03	0,064	0,059
Sodium	Na^+	99,549	99,3	98,455
	$\text{NaHCO}_3(\text{aq})$	0,018	0,018	0,017
	$\text{NaCl}(\text{aq})$	0,071	0,069	0,048

	NaSO ₄ -	0,356	0,612	1,479
Calcium	Ca ⁺²	89,152	84,381	73,054
	CaCl ⁺	0,29	0,258	0,146
	CaSO₄ (aq)	9,72	14,891	26,483
	CaHCO ³⁺	0,396	0,374	0,28
	CaCO ³ (aq)	0,438	0,095	0,037
Potassium	K ⁺¹	99,431	99,079	97,9
	KCl (aq)	0,073	0,07	0,049
	KSO ₄ -	0,496	0,851	2,051

Tableau 6. La distribution de la masse des cations et anions dans les différentes spéciations dans les solutions extraites des sols de la station Trifaoui

		ST.02 Trifaoui (Kobna)		
Component	Espèce chimique	Sol (Nu)	Sol (Après 2 an)	Sol (Après 5 an)
		Total %	Total %	Total %
Magnésium	Mg ⁺²	90,039	82,702	77,944
	MgOH ⁺	0,732	0,531	0,646
	MgCl⁺	8,943	16,563	21,247
	MgSO ₄ (aq)	0,022	0,019	0,013
	MgCO ₃ (aq)	0,255	0,176	0,143
	MgHCO ³⁺	0,134	0,187	0,174
Chlorure	Cl ⁻¹	99,435	99,301	99,031
	CaCl ⁺	0,211	0,407	0,863
	MgCl ⁺	0,317	0,245	0,085
	NaCl (aq)	0,032	0,04	0,017
Sulfate	SO ₄ ⁻²	81,085	76,62	68,61
	MgSO ₄ (aq)	7,964	5,298	1,456
	CaSO₄ (aq)	10,656	17,736	29,797
	NaSO ₄ -	0,251	0,278	0,1
	KSO ₄ -	0,043	0,067	0,037
Sodium	Na ⁺¹	99,435	98,937	98,395
	NaHCO ₃ (aq)	0,015	0,012	0,011
	NaCl (aq)	0,115	0,094	0,128
	NaSO ₄ -	0,434	0,956	1,466
Calcium	Ca ⁺²	88,074	79,265	73,85
	CaCl ⁺	0,452	0,321	0,386
	CaSO₄ (aq)	11,109	20,159	25,563
	CaHCO ³⁺	0,321	0,218	0,175
	CaCO ³ (aq)	0,043	0,037	0,025
Potassium	K ⁺¹	99,278	98,575	97,836
	KCl (aq)	0,118	0,097	0,131
	KSO ₄ -	0,604	1,329	2,033

Tableau 7. La distribution de la masse des cations et anions dans les différentes spéciations dans les solutions extraites des sols de la station Reguiba

Component	Espèce chimique	ST.03 Reguiba (Nadour)		
		Sol (Nu)	Sol (Après 2 an)	Sol (Après 5 an)
		Total %	Total %	Total %
Magnésium	Mg ⁺²	85,996	73,991	72,555
	MgOH ⁺	0,04	0,014	0,321
	MgCl⁺	0,496	0,396	26,956
	MgSO ₄ (aq)	13,133	25,381	0,02
	MgCO ₃ (aq)	0,101	0,035	0,139
	MgHCO ³⁺	0,235	0,183	0,303
Chlorure	Cl ⁻¹	99,45	98,804	98,816
	CaCl ⁺	0,398	0,809	0,978
	MgCl ⁺	0,135	0,35	0,16
	NaCl (aq)	0,011	0,032	0,039
Sulfate	SO ₄ ⁻²	78,02	67,967	66,851
	MgSO ₄ (aq)	3,15	5,626	2,477
	CaSO₄ (aq)	18,688	26,187	30,405
	NaSO ₄ ⁻	0,08	0,183	0,217
	KSO ₄ ⁻	0,062	0,038	0,05
Sodium	Na ⁺¹	99,21	97,954	97,764
	NaHCO ³ (aq)	0,015	0,015	0,011
	NaCl (aq)	0,083	0,085	0,071
	NaSO ₄ ⁻	0,69	1,945	2,153
Calcium	Ca ⁺²	83,091	69,293	67,677
	CaCl ⁺	0,302	0,234	0,189
	CaSO₄ (aq)	16,114	30,184	31,929
	CaHCO ³⁺	0,292	0,221	0,167
	CaCO ₃ (aq)	0,199	0,068	0,038
Potassium	K ⁺¹	98,956	97,222	96,951
	KCl (aq)	0,085	0,086	0,072
	KSO ₄ ⁻	0,959	2,692	2,977

La formation d'espèces de SO₄²⁻ avec Ca²⁺ et Mg²⁺ a été l'association la plus forte entre cations et anions, selon nos résultats de l'analyse de spéciation (Tableau 5, 6, 7). De plus, le CaSO₄ représente 9 à 32% du SO₄²⁻ total dissous dans des solutions sol de l'extrait 1/5 irriguées pendant 2, 5 années et du sol nu (témoin), ce qui en fait la seconde espèce la plus importante dans la concentration totale en sulfate après le SO₄²⁻.

Les ions sulfate étaient fortement associés au magnésium et au calcium, ce qui indique que les sels de sulfate pourraient être présents dans les sols sous forme de CaSO₄, MgSO₄. Cependant, en raison de la saturation du site d'échange avec du calcium, le sel prédominant est probablement CaSO₄. Ceci est dû à l'effet ion commun ou à une source ionique commune. À l'appui de cette hypothèse, l'analyse de spéciation a révélé que l'association la plus forte entre cations et anions était la formation d'espèces de sulfate avec Ca²⁺ et Mg²⁺.

5.7. Diagnostic des sources des ions :

Une analyse statistique multi variante a été utilisée aussi comme outil d'identification des sources d'ions. La matrice de corrélation (MC) et l'analyse des composants principaux (ACP) ont été réalisées par STATISTICA7.1. La corrélation entre différents paramètres a été utilisée pour mesurer la relation entre deux variables quantitatives. L'ACP a été utilisé pour étudier les corrélations entre les anions et les cations et leur regroupement en quelques facteurs.

Tableau 8. Matrice de corrélation des paramètres de salinité du sol nu (Témoin) dans les trois stations dans la couche arable des sols (0-30 cm)

Variables	CE	PH	HCO ³⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺
CE	1								
PH	-0.0146	1							
HCO ³⁻	-0.9263	0.3901	1						
Cl ⁻	0.1370	-0.9925	-0.5000	1					
SO ₄ ²⁻	0.9972	0.0599	-0.8958	0.0629	1				
Na ⁺	-0.2852	-0.9542	-0.0968	0.9104	-0.3557	1			
Ca ²⁺	0.9964	0.0703	-0.8910	0.0524	0.9999	-0.3655	1		
K ⁺	0.9962	-0.1017	-0.9557	0.2228	0.9869	-0.2006	0.9852	1	
Mg ²⁺	-0.8206	-0.5595	0.5449	0.4538	-0.8608	0.7818	-0.8661	-0.7676	1

Tableau 9. Matrice de corrélation des paramètres de salinité du sol irrigués (depuis 2 Années) dans les trois stations dans la couche arable des sols (0-30 cm)

Variables	CE	PH	HCO ³⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺
CE	1								
PH	0.6010	1							
HCO ³⁻	0.1290	0.8701	1						
Cl ⁻	0.7194	-0.1228	-0.5960	1					
SO ₄ ²⁻	0.9961	0.6692	0.2159	0.6553	1				
Na ⁺	0.5845	-0.2972	-0.7292	0.9841	0.5107	1			
Ca ²⁺	0.9976	0.6549	0.1973	0.6696	0.9998	0.5269	1		
K ⁺	-0.4540	-0.9850	-0.9421	0.2923	-0.5308	0.4576	-0.5146	1	
Mg ²⁺	0.9612	0.7981	0.3974	0.5000	0.9818	0.3382	0.9780	-0.6820	1

Tableau 10. Matrice de corrélation des paramètres de salinité du sol irrigués (depuis 5 Années) dans les trois stations dans la couche arable des sols (0-30 cm)

Variables	CE	PH	HCO ³⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺
CE	1								
PH	0.9175	1							
HCO ³⁻	-0.7783	-0.4644	1						
Cl ⁻	0.3602	-0.0405	-0.8661	1					
SO ₄ ²⁻	0.8929	0.9983	-0.4123	-0.0984	1				
Na ⁺	0.9398	0.9982	-0.5170	0.0199	0.9930	1			
Ca ²⁺	0.9997	0.9272	-0.7623	0.3366	0.9040	0.9481	1		
K ⁺	0.0666	0.4579	0.5747	-0.9068	0.5086	0.4034	0.0916	1	
Mg ²⁺	-0.6236	-0.2612	0.9762	-0.9539	-0.2048	-0.3190	-0.6037	0.7385	1

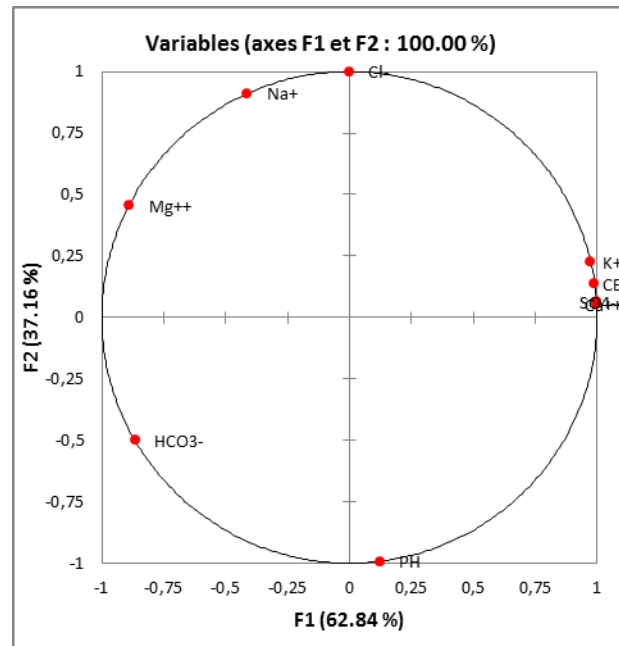


Figure 15. Analyse en composantes principales des paramètres de salinité du sol nu (Témoin) dans les trois stations dans la couche arable des sols (0-30 cm)

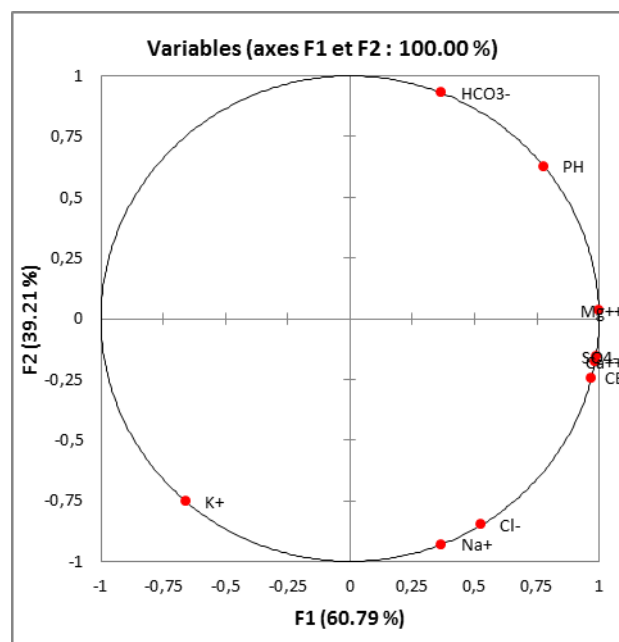


Figure 16. Analyse en composantes principales des paramètres de salinité du sol irrigués durant 2 ans dans les trois stations dans la couche arable des sols (0-30 cm)

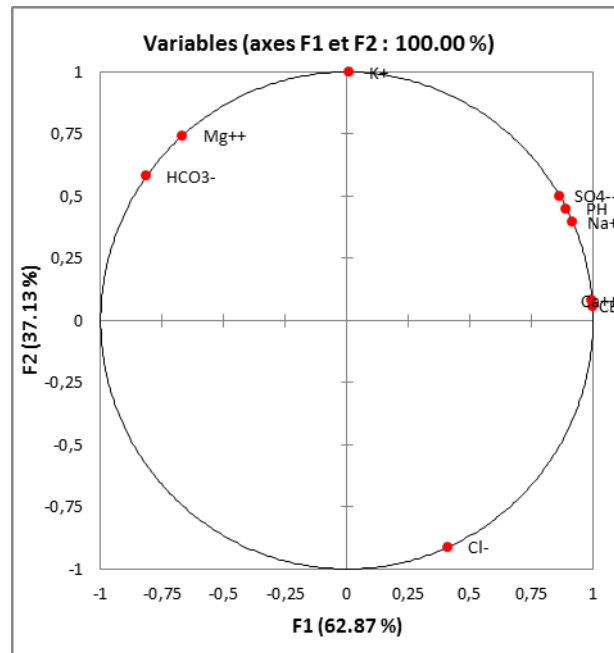


Figure 17. Analyse en composantes principales des paramètres de salinité du sol irrigués durant 5 ans dans les trois stations dans la couche arable des sols (0-30 cm)

Les tableaux 8 et 10 présentent les coefficients de corrélation pour les trois stations cultivées pendant 2 et 5 années, ainsi que pour le sol nu (sol non irrigué).

Les résultats montrent que Ca^{2+} , SO_4^{2-} et Mg^{2+} ont des coefficients de corrélations très élevés avec l'indicateur de salinité CE. Ces ions sont les principaux ions qui affectent la salinité de nos sols. En raison de leur forte corrélation avec le CE, le sulfate et le calcium sont les ions les plus salins des sols étudiés.

5.8. Relation entre la salinité d'eau d'irrigation et la salinisation des sols :

A travers les résultats des salinités initiales et les salinités des sols après irrigation, on a remarqué que les stations 1, 2 et 3 ont connus des accumulations de sels au cours des saisons d'irrigation. La salinité moyenne des sols a augmenté et dépassé la valeur initiale, cela déduit l'effet spécifique de type de produit organique sur la rétention en eau (CR). D'après Larney et Angers (2012), l'impact des apports organiques sur la teneur en eau est susceptible d'avoir plus d'importance dans les sols sableux dégradés que dans les sols à texture fine. Par conséquent, l'apport de la matière organique est très justifié pour les sols des zones arides où le sable constitue la majeure partie de la fraction minérale. Important à rappeler aussi, que notre sol est caractérisé par une forte concentration en sels, ce qui a probablement contribué à augmenter la capacité de rétention en eau (CR) du sol.

Dans les sols salés, les pH élevés diminuent la disponibilité des éléments nutritifs. Alors que, l'enrichissement de ces sols en matières organiques abaisse leur pH et augmente la disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes (Walker et al., 2004).

L'irrigation des sols sableux contribue à l'entraînement et à l'accumulation de l'azote nitrique et autres éléments en solution des couches supérieures vers les couches profondes, l'augmentation de la lixiviation est directement liée aux épisodes d'irrigation et aux taux de fertilisation (Silva, 2006) une lixiviation importante par un excès d'irrigation dans un sol sableux.

En se basant sur les résultats de régression linéaire des ions avec la CE, nous déduisons que les anions et les cations responsables de la salinité sont les chlorures et les sulfates, ainsi que le calcium, le magnésium et le sodium. La linéarité la plus élevée a été observée chez le SO_4^{2-} pour les anions et le Ca^{2+} pour les cations. Ces résultats sont confirmés par l'analyse statistique des données l'ACP qui a révélé que la salinité est fortement influencée par le Mg^{2+} , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^- et HCO_3^- dans la couche arable. Le calcium et le sulfate sont les ions qui présente une forte corrélation avec CE, donc la salinité des sols étudiés est dominée par le sulfate. À l'appui de cette hypothèse, l'analyse de spéciation a révélé que l'association la plus forte entre les cations et les anions était la formation d'espèces de sulfate avec Ca^{2+} et Mg^{2+} . En outre, le CaSO_4 (aq), étant la deuxième espèce principale après SO_4^{2-} de la concentration totale de sulfate.

Le sol est gypseux avec une forte présence du calcaire total, ce qui conduit à un sol gypso-calcaire, car sous l'irrigation, la précipitation concomitante de gypse pourrait aussi avoir des conséquences importantes sur les propriétés physiques du sol qui se manifeste par les problèmes d'érosion, de résistance mécanique à la pénétration racinaire, de la perméabilité et de la rétention en eau.

La présence d'une couche de gypse dure ou de croûte gypseuse construit un obstacle mécanique pour l'extension racinaire, donc il y a un problème d'exploration du sol par les racines, les mouvements de l'eau sont ralentis (Mashali, 1996). En effet, il existe une relation entre la résistance mécanique, la pénétration racinaire et l'élongation des racines, quand la teneur en gypse est élevée, ce dernier constitue une structure cimentée faisant obstacle au développement des racines.

Selon Mashali (1996), la présence des teneurs élevées en gypse dans la rhizosphère affecte la teneur et la disponibilité des éléments nutritifs par :

- ✓ Changement de la forme de l'élément nutritif dans le sol; l'élément se trouvant sous forme disponible devient indisponible, cas du phosphore qui se transforme en forme inassimilable en présence de gypse.
- ✓ Perte d'élément nutritif (cation et anion); la solution du sol a une grande concentration en Ca^{2+} ce qui conduit à une libération successive du K^+ et Mg^{2+} du complexe absorbant.

Les teneurs élevées en gypse peuvent conduire à un déséquilibre des rapports ioniques particulièrement K^+/Ca^{2+} et Mg^{2+}/Ca^{2+} qui deviennent faibles dans les sols gypseux.

La compétition ionique des ions supplémentaires affectant la nutrition ; la présence en concentration élevée d'un élément diminue les prélèvements par la plante d'autre élément tel que : K, Mg, Fe, Cu, Zn, phosphate et nitrate.

L'élévation de la pression osmotique due à la solubilité du gypse, ce qui réduit l'extraction de l'eau et des éléments nutritifs par la plante (Raymond, J. E., Shapiro, K. L., & Arnell, K. M. (1992).

La relation inverse entre la teneur en gypse et la CEC dans le sol (le gypse n'absorbe pas ou libère les éléments nutritifs); la diminution de la fertilité des sols gypseux est due à la faible capacité d'adsorption des éléments.

En effet, l'effet du gypse sur les plantes dépend de la capacité de ces dernières à tolérer sa présence. Mashali (1996) classe les plantes selon leur tolérance au gypse comme suit :

- ✓ Plantes sensibles: tabac
- ✓ Plantes semi-sensibles: coton, pomme de terre, tournesol
- ✓ Plantes semi-tolérantes: fève, betterave, canne à sucre, sorgho
- ✓ Plantes tolérantes: soja, sésame.

Les plantes sensibles et semi-sensibles peuvent vivre dans des sols à des teneurs inférieures à 15%. Les plantes tolérantes peuvent supporter des teneurs supérieures à 25% (forme continue du gypse). (Boyadjiev et Verheye, 1997).

5.9. L'effet de la salinité sur la diminution des rendements de la pomme de terre :

Chez la majorité des plantes cultivées même si elles sont tolérantes aux sels, présentent une diminution des rendements lorsqu'elles croient sous des conditions salines (Mass et Hoffman, 1977 ; Maas, 1986).

Chez la pomme de terre est relativement tolérante à la salinité par rapport aux autres cultures maraîchères. Cependant, un taux de salinité élevé peut bloquer l'absorption de l'eau par le système racinaire. Lorsque la teneur en sel est élevée, le point de flétrissement est atteint rapidement. On peut réduire la salinité d'un sol en le lessivant avec une eau d'irrigation douce (Bamouh, 1999).

Selon l'INSID (2008) (Annexe 1) les plantes choisies pour cet essai (la pomme de terre) présentent une sensibilité à la présence des sels dans le sol.

La sensibilité de la pomme de terre apparaît au delà de 1,7 dS, et on peut avoir une perte de rendement de 75% à une conductivité de 3,8 dS.

6. Conclusion :

Après la détermination des caractéristiques hydrochimiques de l'eau d'irrigation, les résultats démontrent un faciès chimique st sulfaté calcique et sodique avec un risque très élevé de salinité et un risque moyen de sodicité.

Le sol utilisé pour étudier l'impact de la salinité des eaux d'irrigation il a été prélevé à partir d'horizons (0-30 cm) dans les trois stations irrigués respectivement depuis 2 et 5 années sont étudiées et comparés au sol témoin (temps zéro, autrement jamais mis en culture). L'irrigation se fait par aspersion avec une eau minéralisée de la nappe phréatique, et a une texture sablonneuse.

L'analyse de la solution du sol de l'extrait aqueux (1/5) dans les trois sites montre une distribution des cations dans le sens croissant suivant ($\text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$) et les pour anions ($\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^-$). Le calcium et le sulfate sont les ions qui prédominent dans la solution, ce qui est caractéristique des solutions salines neutres (Duchaufour, 1983 ; Sparks, 1995).

Les sels les plus abondants sont représentés par les sulfates de calcium (CaSO_4) et les sulfates de magnésium (MgSO_4).

Les conséquences de cette salinité enregistrent un effet direct sur la nutrition minérale et hydrique de la plante par suite des modifications du potentiel osmotique. Ceci se traduit par la diminution de la disponibilité en eau pour la nutrition hydrique (augmentation du potentiel osmotique), par le déséquilibre de la balance ionique et aussi par des effets de toxicité de certains ions en solution

Deuxième Volet



L'EXPERIMENTATION SUR LE REGIME HYDRIQUE EN CONDITIONS SALINES



Introduction:

La salinité du sol et de l'eau est un problème majeur dans de nombreux pays du monde (SZABOLOCS, 1979). La salinisation secondaire est généralement associée à l'irrigation dans les régions arides. Les principaux responsables de l'accumulation de sels dans le sol et de la baisse des rendements dans les zones irriguées sont la charge saline de l'eau et une mauvaise gestion de l'irrigation.

Et d'autant plus dangereux si leur utilisation n'est pas étudiée. Un domaine de recherche très important est la gestion appropriée et l'utilisation rationnelle de ces eaux en agriculture. Vu l'absence ou la rareté des ressources d'eau douce dans certaines régions, l'utilisation de l'eau salée devient de plus en plus une nécessité absolue. Quand il s'agit de créer de nouveaux espaces irrigués, le manque d'eau de haute qualité est devenu un obstacle majeur (CHEVERRY, 1995). Par conséquent, les eaux salées peuvent être utilisées pour l'irrigation sur certains sols si des pratiques de gestion appropriées sont appliquées (HAMDY, 1991).

Enfin, l'eau salée est fréquemment la seule eau disponible dans certaines régions, il devient nécessaire d'accepter ses limitations et de l'utiliser sagement (ISRAELSEN, 1965) ce qui fait de la valorisation des eaux salées est l'une des préoccupations importantes dans le monde aujourd'hui.

Pour arriver aux objectifs de notre travail de recherche on est obligé de faire un dispositif d'expérimental qui vise à étudier l'influence de la salinité des eaux et la fréquence d'irrigation sur le sol dont l'objectif est d'atténuer l'effet de la salinité et la valorisation de l'eau salée à travers le régime hydrique.

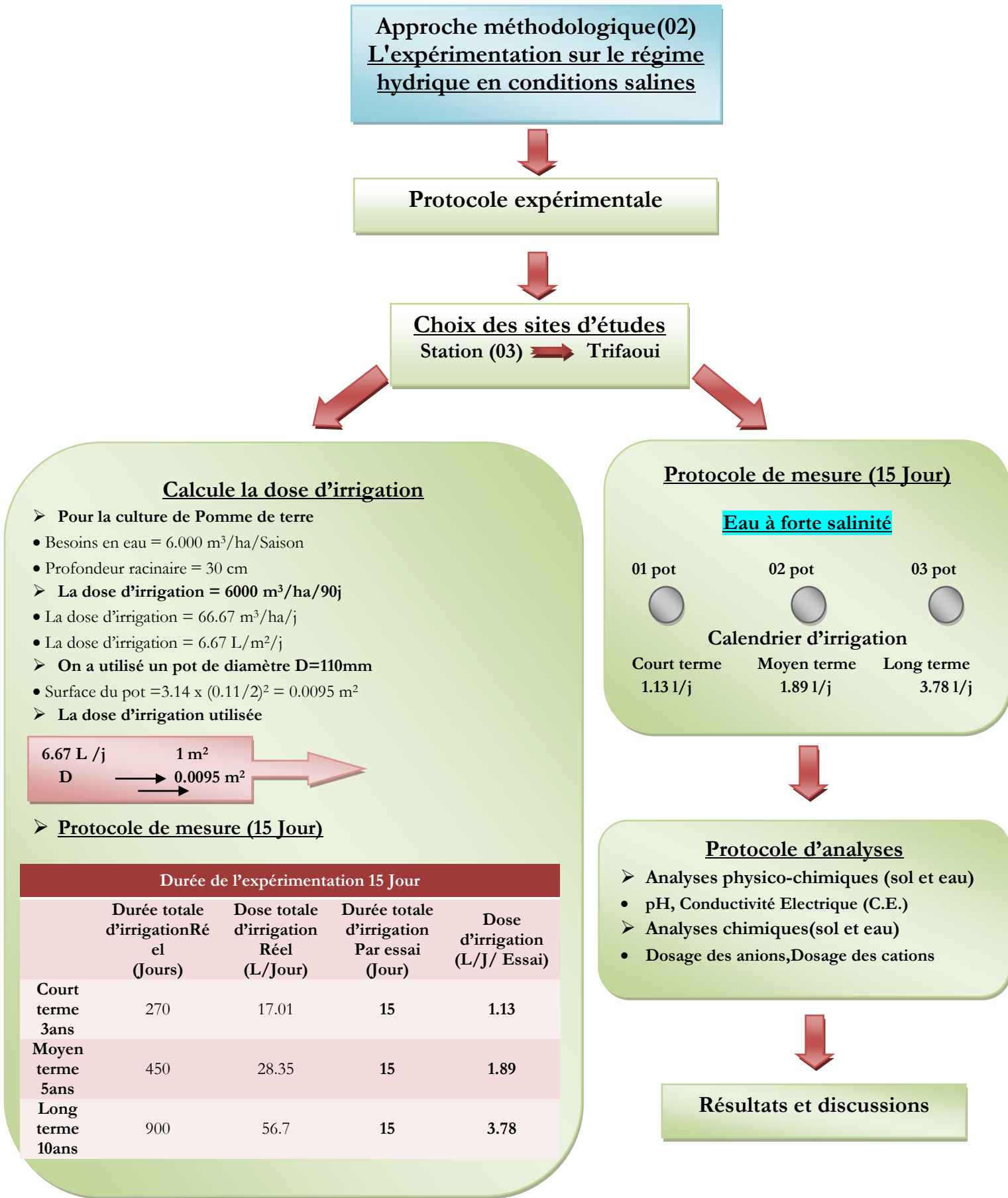


Figure 18. Schéma général de la méthodologie de travail du deuxième volet

7. Matériel et méthodes :

7.1. Lieux d'échantillonnage de matériaux étudiés :

L'échantillonnage de sable a été prélevé au niveau des dunes de sable de la station de Trifaoui qui est situé à 10 km au nord-est de centre-ville, dont ses coordonnées spatiales sont 33° 25' 24" N ; 06° 56' 09" E.

Au cours de prélèvement d'échantillons on prend en compte les conditions suivantes :

- ✓ Prélever le sable de 3 cotés endroits (du bas, du milieu et du haut);
- ✓ Déposer chaque prélèvement dans un récipient et le mélanger;
- ✓ Enlever le sable du mélange dans un sachet et numéroter chacun;
- ✓ Mettre une petite étiquette et remplir tous les informations de chaque sable (lieu de prélèvement avec la date...);
- ✓ Fermer bien les sachets pour éviter le gaspillage d'échantillon;
- ✓ Ramener des échantillons au laboratoire pour l'utilisation.

7.2. Les eaux d'irrigation:

L'eau est prélevée des puits d'irrigation, avec CE = 7ds/m. Le sol de la station d'étude est irriguée par un puits traditionnel captant l'eau de la nappe phréatique sur une profondeur de 60 m et un débit de 5 l/s. l'irrigation est assurée par aspersion (pivot) qui est le moyen le plus utilisé pour irriguer les parcelles cultivées en pomme de terre de la station étudiée.



Photo 11. Un filet filtrant pour éviter le passage de sable (ZAIZ, 2020).



Photo 12. Dispositif expérimental (Pots de filtration avec filtres) (ZAIZ, 2020).

7.3. Les dispositifs expérimentaux :

Pour atteindre notre objectif, nous avons mis en place un dispositif expérimental, pour suivre les résultats et évaluer des caractérisations de sol agricoles irriguées par les eaux minéralisées.

A cet effet, nous avons réalisé 03 pots de filtration avec le même sable. Les pots utilisés ont un diamètre de 11 cm et une hauteur de 40 cm, soit un volume d'environ 230 cm³. Ces pots ont été fabriqués à partir de morceaux de PVC dont la partie inférieure est obstruée à l'aide d'une toile. Ils sont remplis de 200 g de sol. Pour éviter le colmatage des pots, nous avons garni leur fond de gravier (Figure 16).

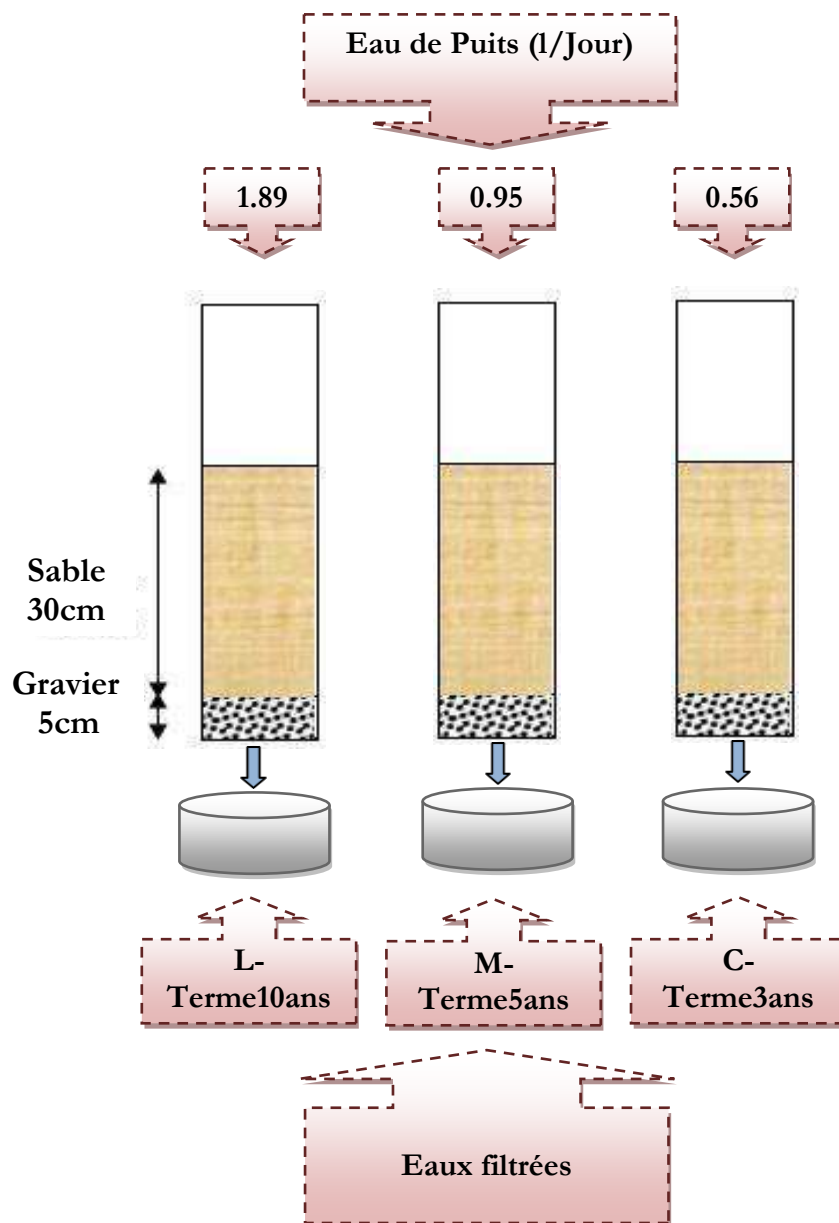


Figure 19. Schéma explicatif des pilotes, et des supports filtrant.

Une fois la phase de conception achevée, les trois pilotes sont placés dans le support de serrage l'un à côté de l'autre, ces derniers doivent être bien fixés en position parfaitement verticale afin d'avoir une certaine stabilité, et une protection contre les vibrations, mais aussi pour favoriser l'écoulement gravitaire et permettre la récupération des eaux filtrées dans des récipients on a utilisé les goutteurs dans l'irrigation par dispersion; pour la distribution homogène de l'effluent

7.4. Protocole d'irrigation des parcelles et de leur suivi :

Le choix du débit se fait selon le modèle réel dans les pratiques agricoles. Le mode d'irrigation varie entre 4000 à 6000 m³/saison/ha selon l'Institut Technique Des Cultures Maraichères et Industrielles (I.T.C.M, 2010). Nous avons simulé ces valeurs réelles pour une surface de 0.0095 m², d'où un débit journalier de 0.063 l/j a été adopté pour chaque filtre.

Pour des raisons pratiques, nous avons choisi d'alimenter les filtres une fois par jour, et le volume à injecter est de l'ordre de V=0.020 l/h. Ce dernier a été doublé pour accélérer le processus afin de récupérer une quantité acceptable en eau filtrée. En d'autres termes, l'alimentation des filtres est manuelle avec un débit journalier de 0.063 l/j.

L'irrigation a débuté en mois de juillet 2020 sur une durée de 15 jours au total résultant en 45 échantillons du lixiviat qui ont été récoltés pour être analysés. Les principaux paramètres physico-chimiques des eaux (pH et conductivité électrique (EC) ont été déterminés in situ. Les constituants ioniques (Na⁺, Cl⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, SO₄²⁻ et HCO₃³⁻) ont été effectués dans le laboratoire de l'Algérienne des eaux ADE de la wilaya d'EL Oued. Les méthodes d'analyse utilisées au cours de notre expérimentation est basée sur la méthodologie de Rodier (RODIER et al., 2005)

8. Résultats et discussion:

La mise en marche de notre dispositif a été réalisée en juillet 2020 et les colonnes de filtration sont alimentées avec les différentes eaux d'irrigation de différentes salinités. Des prélèvements, entrée-sortie, ont été effectués une fois par jour.

8.1. Le pH :

Les résultats que nous avons obtenus sont présentés dans le Tableau 11. La Figure 17, montrent que les sables vierges sont légèrement basiques avec des pH qui varient de 7,73 à 8,76. Après utilisation les sables on a enregistré en générale une légère augmentation de pH. Au saint de chaque filtre, (de 7,19 à 7,99 pour le Court terme (3ans) ; de 7,29 à 7,91 pour le moyen terme (5ans), de 7,29 à 7,89 pour le long terme (10ans).

Les valeurs du pH des eaux filtrées sont toujours supérieures au pH de l'eau d'irrigation brute dans chaque filtre. Cette variation, entre ces deux valeurs extrêmes est due à la variabilité de la dose eaux irrigation et leurs temps (Figure 17).

Le pH a une corrélation positive avec le calcaire ; en raison de lessivage et de la dissolution de ce dernier par les acides organique et une forte CO₂, le pH est relativement faible en surface des colonnes comparé aux couches inférieures. Au fond des colonnes les valeurs élevées du pH confirment l'accumulation du calcaire à ce niveau par l'effet combiné de lessivage et de lixiviation depuis les couches supérieures des pilotes.

C'est la raison pour laquelle les agriculteurs qui souhaitent «remonter» le pH de leur sol, y incorporent des amendements calcaires sous forme de poudre.

Tableau 11. La variation du pH de l'eau traitée en fonction du temps

Temps (Jours)	PH (3 ans)	PH (5 ans)	PH (10 ans)
Jour 00	7.70	7.70	7.70
Jour 01	/	/	7.35
Jour 02	/	7.29	7.29
Jour 03	7.19	7.29	7.41
Jour 04	7.50	7.48	7.62
Jour 05	7.52	7.55	7.54
Jour 06	7.44	7.51	7.6
Jour 07	7.75	7.79	7.75
Jour 08	7.81	7.72	7.70
Jour 09	7.71	7.72	7.81
Jour 10	7.76	7.80	7.81
Jour 11	7.99	7.92	7.86
Jour 12	7.84	7.91	7.89
Jour 13	7.80	7.88	7.85
Jour 14	7.76	7.84	7.83
Jour 15	7.55	7.50	7.67

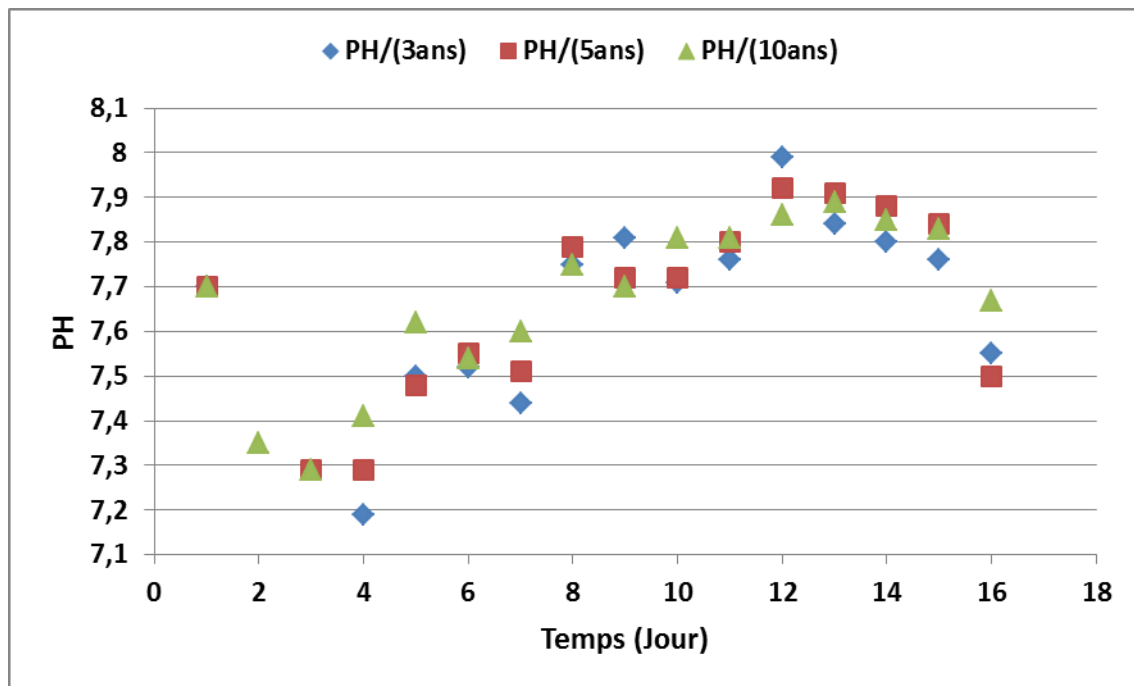


Figure 20. Variation du pH depuis (3, 5 et 10 années) à l'état initial

8.2. La Conductivité Electrique (CE) :

Le paramètre qui permet de définir la salinité totale d'une solution est sa conductivité électrique (CE) qui est en effet, directement proportionnelle à la concentration totale en sels solubles.

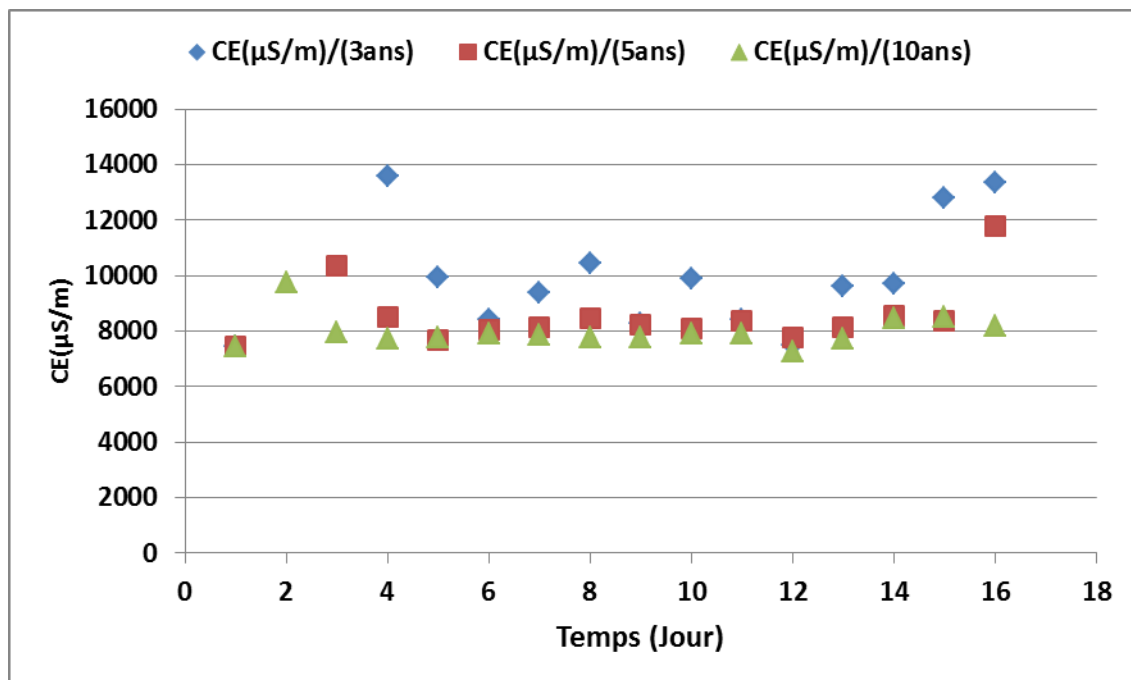
Les résultats que nous avons obtenus sont présentés dans le Tableau 12. La Figure 18, montre que les eaux filtrées sont caractérisées par une conductivité dépassant 7440 $\mu\text{S}/\text{m}$. Pour le court terme (3 années d'irrigation), la conductivité augmente jusqu'à 13560 $\mu\text{S}/\text{m}$ dans le 3^{ème} jours et revient à sa valeur initiale dans le 15^{ème} jours, ceci peut se justifier par la période de lessivage de support filtrant.

Pour le moyen terme (5 années d'irrigation), du 2^{ème} au 15^{ème}, les valeurs de la conductivité électrique ont passé de 10350 $\mu\text{S}/\text{m}$ jusqu'à 11770 $\mu\text{S}/\text{m}$, Ceci peut être justifié par la diminution de la période de lessivage de support filtrant.

Pour le long terme (10 années d'irrigation), nous avons remarqué une stabilisation des valeurs de la conductivité électrique, cette stabilisation peut être justifiée par l'élimination presque complète des sels solubles dans le filtre par l'écoulement de l'eau filtrée, l'augmentation de la valeur de la conductivité électrique des eaux filtrées par rapport à l'eau d'irrigation brute.

Tableau 12. La variation de la conductivité électrique (CE) en fonction du temps

Temps (Jours)	CE($\mu\text{S}/\text{m}$) (3ans)	CE($\mu\text{S}/\text{m}$) (5ans)	CE($\mu\text{S}/\text{m}$) (10ans)
Jour 00	7440	7440	7440
Jour 01	/	/	9770
Jour 02	/	10350	7970
Jour 03	13560	8490	7720
Jour 04	9940	7690	7760
Jour 05	8400	8040	7900
Jour 06	9380	8130	7840
Jour 07	10440	8440	7780
Jour 08	8300	8210	7780
Jour 09	9900	8090	7920
Jour 10	8430	8370	7920
Jour 11	7510	7780	7270
Jour 12	9620	8160	7710
Jour 13	9700	8570	8460
Jour 14	12800	8390	8500
Jour 15	7440	7440	7440

Figure 21. Variation de la CE ($\mu\text{S}/\text{m}$) depuis (3,5 et 10 années) à l'état initial

La salinité du sol de la zone d'étudiée augmente avec l'augmentation de la température. Cette augmentation de la salinité est due à l'évaporation. L'eau apportée par irrigation descend vers les horizons salins, provoquant la solubilisation des sels puis ces sels montent, à cause de réchauffement du sol (texture sablonneux) par les rayons de soleil qui provoquent l'évaporation

de l'eau et par conséquent l'augmentation de la concentration de solution du sol ou des dépôts de sels à la surface du sol.

En période hivernale de la conductivité électrique CE démunira par la chute des températures à cause de l'absence d'évaporation, et de l'augmentation de l'infiltration de l'eau dans le sol vers les horizons profonds.



Photo 13. Salinisation des sols dans les filtres causés par l'évaporation du sol (ZAIZ, 2020).

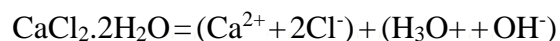
8.3. La teneur en ions majeurs :

À partir de la détermination des concentrations des ions majeurs, on peut déduire la teneur en sels dissous. Les principales espèces ioniques (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , et HCO_3^-) sont analysées au laboratoire de l'Algérienne des eaux ADE de la wilaya d'EL Oued, suivant les normes AFNOR et ISO.

8.3.1. Le chlore Cl^- :

Les résultats d'analyse du chlore sont présentés dans obtenus (tableau 13). Selon la figure (19), les valeurs moyennes de Cl^- mesurées sont de l'ordre de 2032,82 mg/l après 3ans, de 1512,32 mg/l après 5 ans d'irrigation et de 1561,35 mg/l après 10 ans de d'irrigation. Cela est du par l'augmentation de la période de filtration par lessivage des milieux, qui est causée par une diminution des sels solubles dans le filtre.

La présence de cet élément, dans les eaux filtrées, est liée, essentiellement, à la dissolution des composants présents dans les eaux d'irrigation brute, qui sont :



L'évolution se fait dans le même sens que la conductivité électrique. Le chlore est un élément très soluble, et peut donner lieu à des précipités dans le cas des concentrations très élevées.

Tableau 13. Variation de la Cl⁻ (mg/l) en fonction de temps

Temps (Jours)	Cl ⁻ (mg/l) (3ans)	Cl ⁻ (mg/l) (5ans)	Cl ⁻ (mg/l) (10ans)
Jour 00	1552.84	1552.84	1552.84
Jour 01	/	/	1978.28
Jour 02	/	2261.90	1879.01
Jour 03	1907.37	2049.18	1836.47
Jour 04	2191.00	1978.28	1907.37
Jour 05	2120.09	1411.03	1879.01
Jour 06	2049.18	1411.03	1552.84
Jour 07	2261.90	1198.31	1411.03
Jour 08	1907.37	1411.03	1595.39
Jour 09	2120.09	1127.41	1127.41
Jour 10	1340.12	1198.31	1269.22
Jour 11	1552.84	1056.50	1694.65
Jour 12	1552.84	1269.22	1411.03
Jour 13	2545.53	1198.31	1481.94
Jour 14	2616.43	1623.75	1269.22
Jour 15	2261.90	1978.28	1127.41

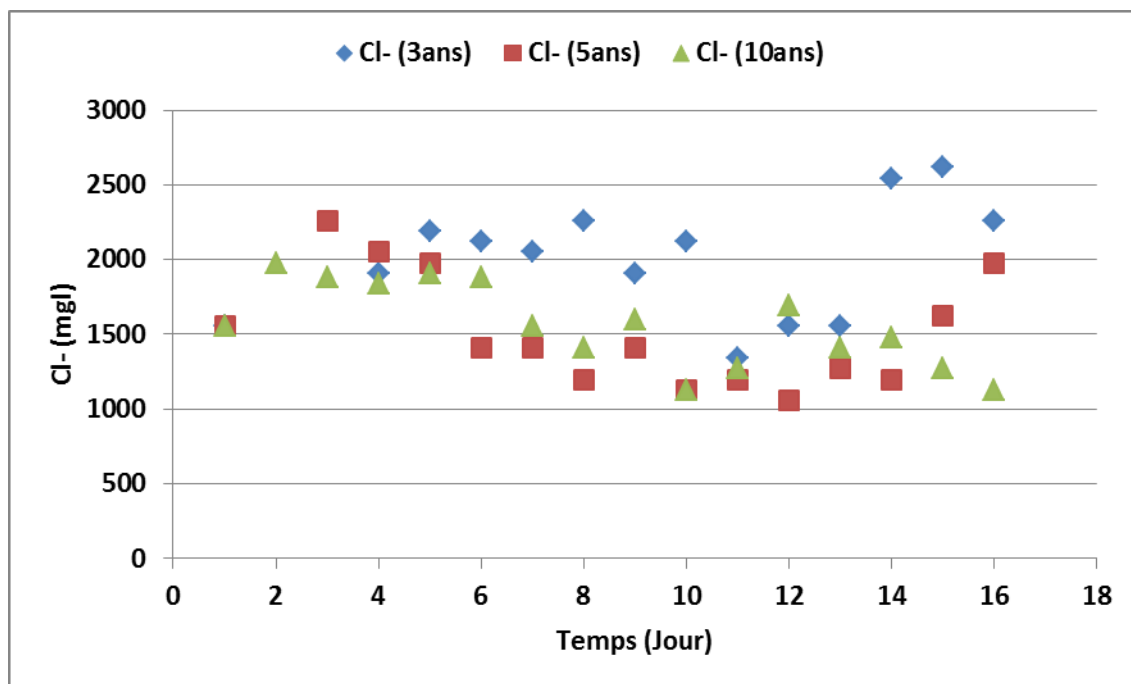


Figure 22. Variation de la Cl⁻ (mg/l) depuis (3,5 et 10 années) à l'état initial

8.3.2. L'alcalinité HCO_3^- :

Les résultats d'analyse de l'alcalinité montrent que les valeurs moyennes de HCO_3^- sont de l'ordre de 144.24 mg/l, de 119.38 mg/l et de 118.61 mg/l après 3, 5 et 10 années d'irrigation respectivement (la Figure 20). Ceci peut se justifier par diminution de la période de lessivage de support filtrant. Cette diminution a causé l'augmentation des sels solubles dans le filtre. Les résultats d'analyse sont illustrés dans le tableau 14. La figure 14 montre que l'alcalinité des eaux filtrées est toujours élevée par rapport de l'eau d'irrigation brute utilisées et confirme ainsi les résultats du pH.

La présence de ces éléments dans les eaux filtrées est justifiée soit par:

- La dissolution du composant du NaHCO_3
- La solubilité de CO_2 , atmosphérique ou engendré par les activités abiotiques donnant $\text{HCO}_3^- / \text{CO}_3^{2-}$

Tableau 14. Variation de la HCO_3^- (mg/l) en fonction de temps

Temps (Jours)	HCO_3^- (mg/l) (3 ans)	HCO_3^- (mg/l) (5 ans)	HCO_3^- (mg/l) (10 ans)
Jour 00	91.50	91.50	91.50
Jour 01	/	/	146.40
Jour 02	/	134.20	152.50
Jour 03	124.44	170.80	113.46
Jour 04	170.80	115.90	109.80
Jour 05	134.20	91.50	103.70
Jour 06	152.50	122.00	115.90
Jour 07	152.50	122.00	115.90
Jour 08	128.10	109.80	128.10
Jour 09	115.90	97.60	115.90
Jour 10	128.10	103.70	97.60
Jour 11	122.00	109.80	85.40
Jour 12	128.10	122.00	110.22
Jour 13	164.70	146.40	128.10
Jour 14	195.20	122.00	109.80
Jour 15	158.60	103.70	146.40

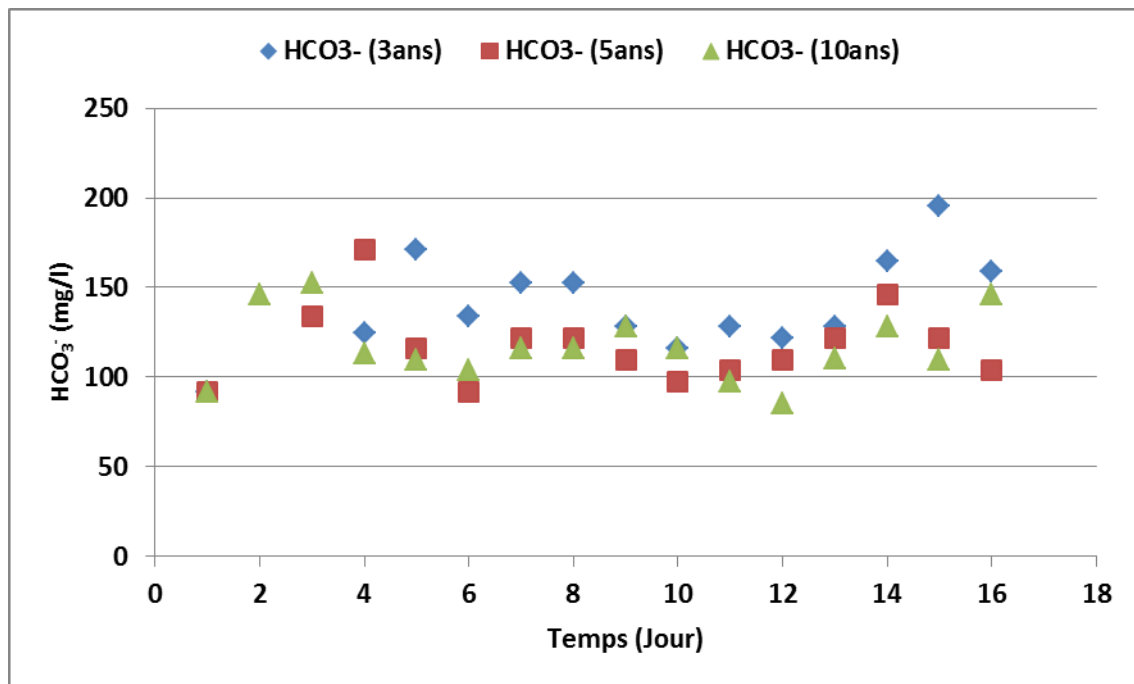


Figure 23. Variation de la HCO₃⁻ (mg/l) en fonction de la durée d'irrigation (3,5 et 10 années) par rapport à l'état initial

8.3.3. Le sulfate SO₄²⁻:

Les valeurs moyennes de SO₄²⁻ obtenues pour 3, 4 et 5 années d'irrigation sont de l'ordre de 2032.82 mg/l, 1512.32 mg/l et 61.35 mg/l respectivement (Figure 21). L'évolution de SO₄²⁻ est donnée dans Tableau 15. Cette diminution est causée par l'augmentation des sels solubles dans le filtre.

Les ions SO₄²⁻ étaient présents dans l'eau d'irrigation brute synthétique sous forme de sel MgSO₄.7H₂O et solubilisés de la manière suivante : (Mg²⁺ + SO₄²⁻) + 7(H₃O⁺ + OH⁻).

Le surplus ou le déficit de cet ion dans les eaux filtrées est dû à :

- La précipitation sous forme de CaSO₄.2H₂O (gypse), MgSO₄, ou K₂SO₄ ;
- L'absorption sur les surfaces des colloïdes par les forces d'attraction universelle ;
- La fixation sur les grains du matériau, grâce à ses propriétés amphotériques, dans certaines conditions par les forces électrostatiques.

Tableau 15. Variation de la SO₄²⁻(mg/l) en fonction de temps

Temps (Jours)	SO ₄ ²⁻ (mg/l) (3ans)	SO ₄ ²⁻ (mg/l) (5ans)	SO ₄ ²⁻ (mg/l) (10ans)
Jour 00	1921.32	1921.32	1921.32
Jour 01	/	/	1440.99
Jour 02	/	2401.65	1681.16
Jour 03	4851.33	2113.45	2593.78
Jour 04	2401.65	2113.45	1440.99
Jour 05	1873.29	2329.60	1152.79

Jour 06	2161.49	2881.98	1681.16
Jour 07	2137.47	2257.55	2641.82
Jour 08	2041.40	2833.95	2449.68
Jour 09	2809.93	3602.48	3122.15
Jour 10	3386.33	2978.05	2017.39
Jour 11	2401.65	2449.68	240.17
Jour 12	2497.72	960.66	1873.29
Jour 13	576.40	2401.65	1873.29
Jour 14	4226.90	3602.48	2978.05
Jour 15	3362.31	3938.71	4322.97

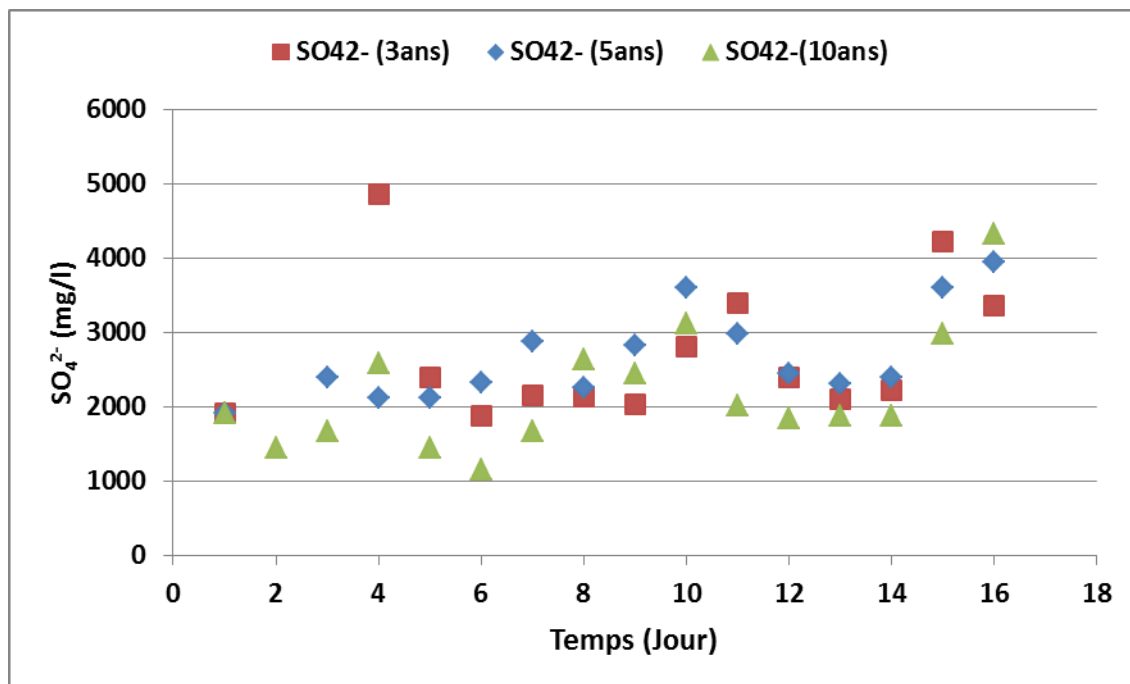


Figure 24. Variation de la SO_4^{2-} (mg/l) en fonction de la durée d'irrigation (3, 5 et 10 années) par rapport à l'état initial

8.3.4. Le calcium Ca^{2+} et le magnésium Mg^{2+} :

Les résultats obtenus montrent qu'après 3 années d'irrigation les valeurs moyennes de Ca^{2+} et Mg^{2+} mesurées sont de l'ordre de 816.38 mg/l et 255.39 mg/l respectivement. Elles sont respectivement de l'ordre de 736.32 mg/l et 238.19 mg/l après 5 années d'irrigation et de 699.57 mg/l et 216.93, après 10 années d'irrigation (figure 22, 23). Ceci peut être justifié en réduisant la lixiviation de la concentration du calcium Ca^{2+} et du magnésium Mg^{2+} dans les milieux filtrants. Cette diminution est causée par l'augmentation des sels solubles dans le filtre. L'évolution dans le temps du calcium Ca^{2+} et du magnésium Mg^{2+} est présentée dans le Tableau 16.

L'origine de ces cations dans les eaux filtrées, est liée essentiellement, à la dissolution du $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ et $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ existants dans les eaux d'irrigation brute.

On constate que les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} se retrouvent à des proportions différentes dans quasiment tous les échantillons des eaux filtrées.

On peut expliquer ce résultat par les conditions de solubilité et la précipitation de deux éléments. La présence de Ca^{2+} et Mg^{2+} avec des quantités importantes par rapport au Na^+ , fait que le complexe absorbant se sature de façon préférentielle par les cations alcalino-terreux.

La présence du Mg^{2+} en surplus signifie qu'il y a une autre source de provenance, qui peut être les sels moins solubles tels que le MgSO_4 , ou la composition primaire du matériau.

Tableau 16. Variation de la Ca^{2+} et Mg^{2+} (mg/l) en fonction de temps

Temps (Jours)	Ca^{2+} (mg/l) (3ans)	Ca^{2+} (mg/l) (5ans)	Ca^{2+} (mg/l) (10ans)	Mg^{2+} (mg/l) (3ans)	Mg^{2+} (mg/l) (5ans)	Mg^{2+} (mg/l) (10ans)
Jour 00	621.24	621.24	621.24	182.29	182.29	182.29
Jour 01	/	/	761.52	/	/	121.53
Jour 02	/	841.68	621.24	/	243.05	206.59
Jour 03	961.92	661.32	661.32	401.03	255.20	243.05
Jour 04	761.52	661.32	741.48	230.90	255.20	72.92
Jour 05	841.68	661.32	689.38	133.68	218.75	104.51
Jour 06	729.456	729.456	625.25	286.80	177.43	192.01
Jour 07	885.768	681.36	701.40	228.47	97.22	303.81
Jour 08	741.48	721.44	721.44	182.29	218.75	230.90
Jour 09	881.76	781.56	641.28	121.53	182.29	291.66
Jour 10	781.56	761.52	741.48	206.59	206.59	145.83
Jour 11	681.36	681.36	721.44	291.66	230.90	157.98
Jour 12	781.56	801.6	770.20	279.51	170.14	150.33
Jour 13	921.84	801.6	801.60	145.83	167.70	121.53
Jour 14	901.8	781.56	693.38	449.64	413.19	318.40
Jour 15	741.48	741.48	601.20	362.14	498.25	593.04

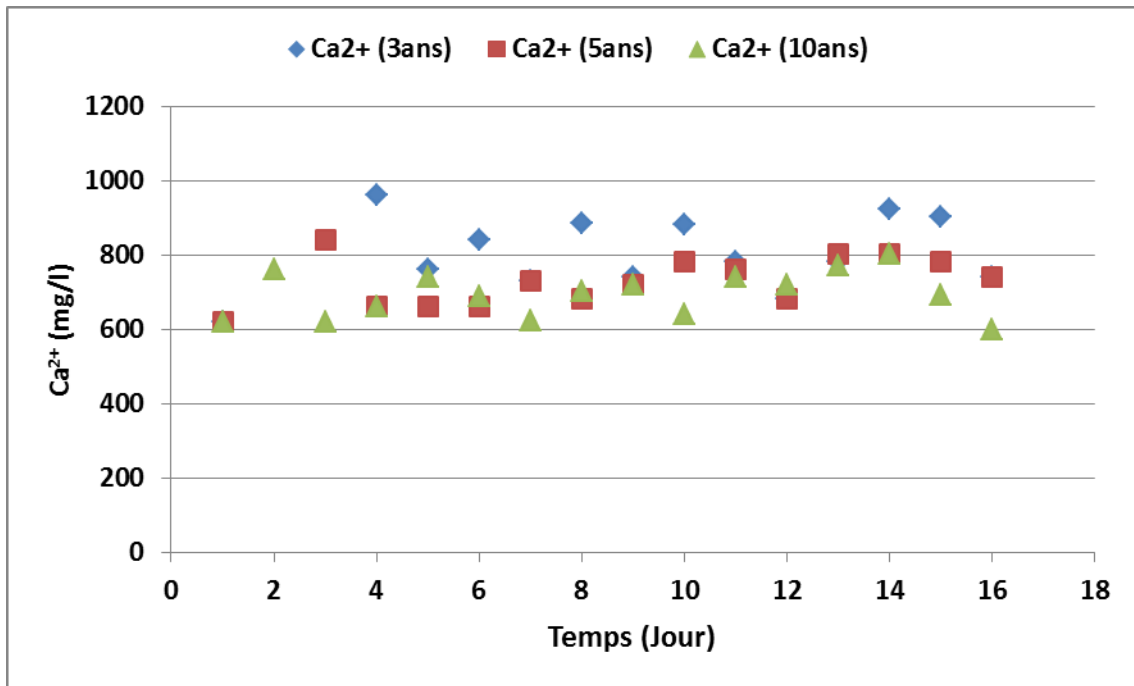


Figure 25. Variation de Ca²⁺ (mg/l) en fonction de la durée d'irrigation (3,5 et 10 années) par rapport à l'état initial

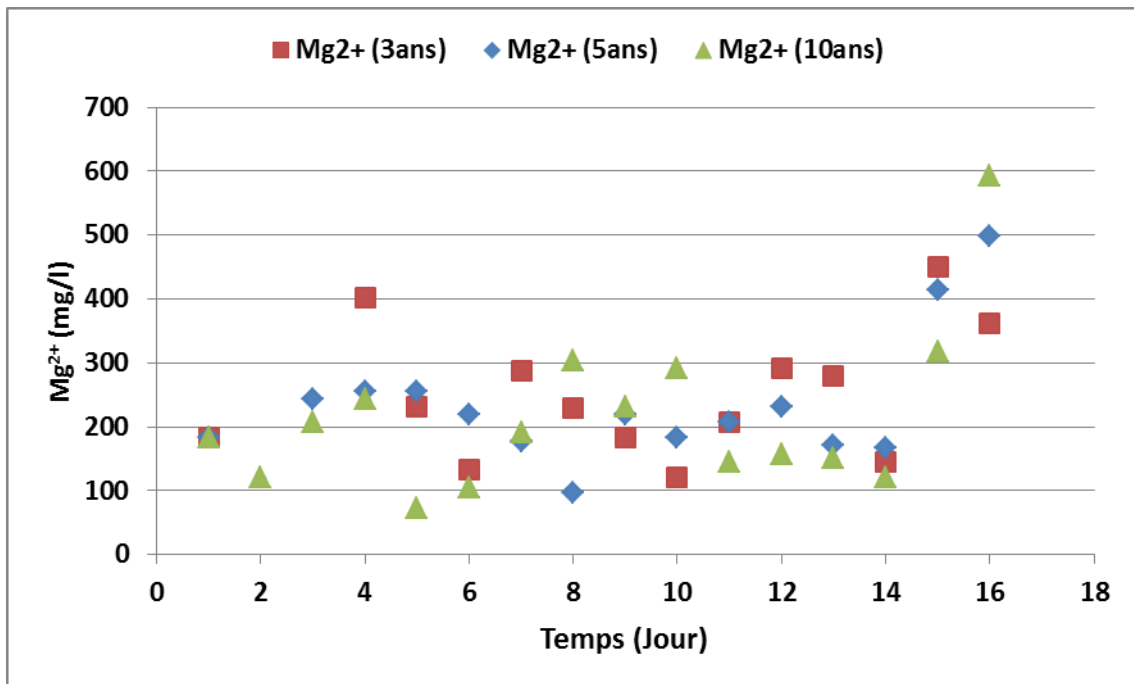


Figure 26. Variation de Mg²⁺ (mg/l) en fonction de la durée d'irrigation (3,5 et 10 années) par rapport à l'état initial

8.3.5. Le sodium Na⁺ et le potassium K⁺:

Les résultats d'évolution du sodium Na⁺ et du potassium K⁺ sont présentés dans le Tableau 17. Pour 3, 5 et 10 années d'irrigation, les valeurs moyennes de ces éléments sont respectivement de 1152.72 mg/l et 55.59 mg/l, de 965.11 mg/l et 43.55 mg/l et de 805.40 mg/l et 34.67 mg (Figure 24). Ceci peut être justifié en réduisant la lixiviation de la concentration du sodium Na⁺ et du potassium K⁺ dans les milieux filtrants. Cette diminution est causée par l'augmentation des sels solubles dans le filtre. L'origine de ces éléments est liée généralement à la dissolution des sels de l'eau d'irrigation brute tels que le NaCl, NaSO₄ et NaHCO₃ pour Na⁺ et KSO₄ pour K⁺.

L'analyse montre que ces éléments se précipitent et se forment sur le complexe absorbant car ils sont facilement échangeables.

Tableau 17. Variation de la Na⁺ et K⁺ (mg/l) en fonction de temps

Temps (Jours)	Na ⁺ (mg/l) (3ans)	Na ⁺ (mg/l) (5ans)	Na ⁺ (mg/l) (10ans)	K ⁺ (mg/l) (3ans)	K ⁺ (mg/l) (5ans)	K ⁺ (mg/l) (10ans)
Jour 00	832.85	832.85	832.85	113,71	113,71	113,71
Jour 01	/	/	820.00	/	/	62,61
Jour 02	/	1182.80	913.54	/	81,93	52,10
Jour 03	1682.80	1069.89	951.01	96,36	74,37	38,67
Jour 04	1247.31	1016.13	893.37	85,29	62,89	30,80
Jour 05	997.12	821.33	743.52	66,25	39,79	29,07
Jour 06	945.24	1107.53	691.64	48,88	35,99	27,42
Jour 07	1005.38	855.91	806.92	55,32	31,40	36,33
Jour 08	1021.51	1005.38	916.43	50,28	30,97	31,83
Jour 09	1430.11	1177.42	904.90	38,06	38,93	30,28
Jour 10	1215.05	907.78	639.77	34,51	31,14	21,68
Jour 11	760.81	608.07	622.48	34,51	25,97	23,71
Jour 12	746.40	657.06	622.48	34,51	24,23	24,23
Jour 13	573.49	683.00	671.47	55,88	37,46	38,50
Jour 14	1838.71	1059.14	867.44	55,46	46,54	34,60
Jour 15	1521.51	1360.22	1016.13	67,37	48,18	38,32

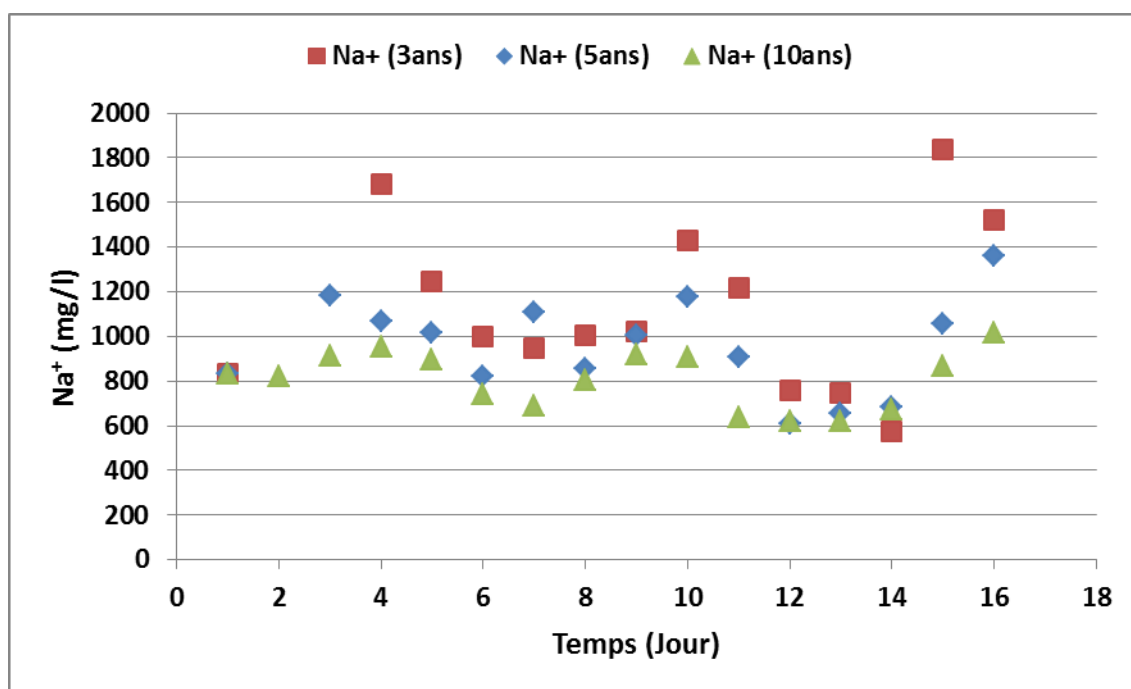


Figure 27. Variation de la Na⁺ (mg/l) en fonction de la durée d'irrigation (3,5 et 10 années) par rapport à l'état initial

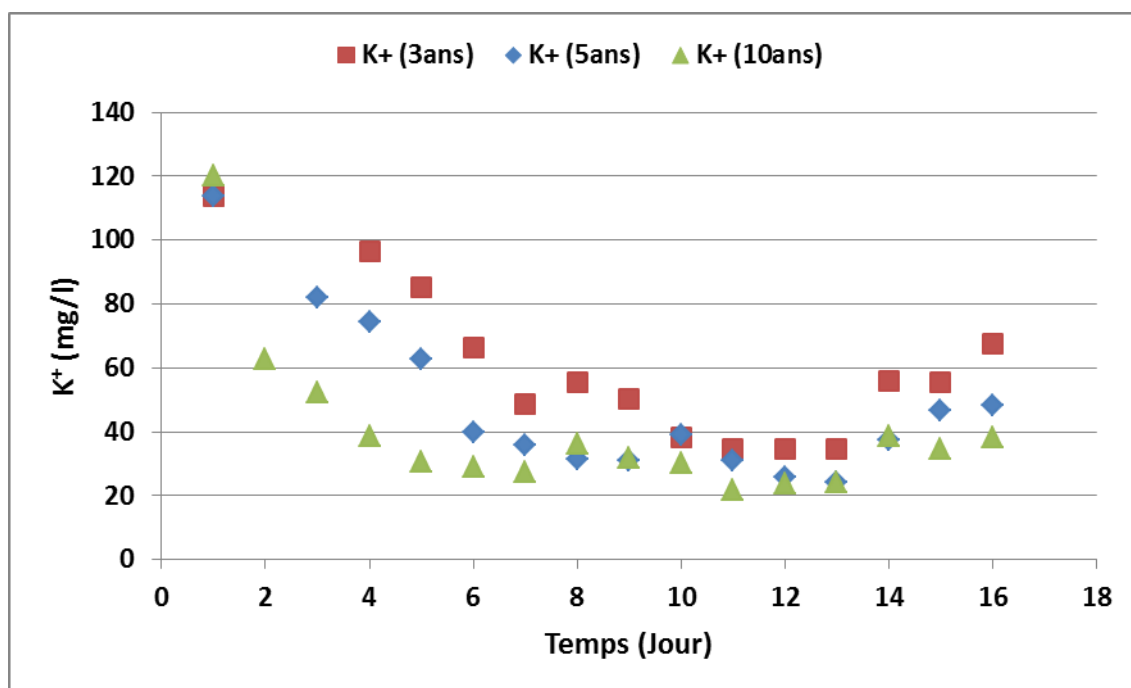


Figure 28. Variation de la K⁺ (mg/l) en fonction de la durée d'irrigation (3,5 et 10 années) par rapport à l'état initial

8.4. Equilibres chimiques et indices de saturation :

8.4.1. Degré de saturation d'une solution vis-à-vis d'un minéral :

La simulation de la concentration des ions majeurs (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+) sous évaporation isotherme (à 25°C) a été utilisée pour interpréter l'équilibre sels/solution en utilisant le logiciel « Phreeqci 2.8 » (version gratuite du laboratoire d'hydrogéologie d'Avignon). Cette simulation donne une idée de l'état des minéraux responsables de la minéralisation dans l'eau/les solutions du sol et des équilibres entre les minéraux et la solution.

L'indices de saturation exprime le degré d'équilibre chimique entre l'eau et le minéral dans la matrice de l'aquifère et peut être considéré comme une mesure du processus de dissolution et ou précipitation concernant l'interaction eau-roche (Drever, 1997).

Le degré de saturation peut être évalué à partir de l'équation suivante :

$$\text{IS} = \log (\text{KIAP}/\text{Ksp}).$$

Où :

KIAP = Le produit d'activité ionique des ions.

Ksp = Le produit de la solubilité du minéral.

IS = L'indice de saturation.

- Si le $\text{IS} < 1$ L'eau est sous-saturée en ce qui concerne un certain minéral, c'est-à-dire l'eau est encore capable de dissoudre ce minéral spécifique.
- Si le $\text{IS} > 1$ L'eau est sursaturée en ce qui concerne ce minéral. Et le minéral va précipiter à l'intérieur de l'aquifère.
- Si le $\text{IS} = 1$ L'eau est en état d'équilibre.

L'objectif principal des indices de saturation est d'évaluer les activités ioniques sous les conditions de température et des forces ioniques prévues.

8.4.2. Variation de l'indice de saturation des minéraux présents dans des eaux filtrées

(Court terme - 3ans):

Le calcul des indices de saturation qui est donnée dans le Tableau 18 montre que les eaux filtrées est saturée (équilibre) par rapport à la calcite, l'aragonite et la dolomite et sous-saturée (précipitation) pour la halite, le gypse et l'anhydrite. Donc, les minéraux carbonatés sont susceptibles de se précipiter par contre les minéraux sulfatés sont toujours à l'état de sous-saturation donc susceptibles de se dissoudre.

Tableau 18. Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans des eaux filtrées (Court terme - 3années)

Temps (Jours)	Phase					
	Anhydrite	Aragonite	Calcite	Dolomite	Gypsum	Halite
Jour/3	0.04	0.06	0.2	0.37	0.25	-4.27
Jour/4	-0.21	0.51	0.65	1.15	0	-4.31
Jour/5	-0.23	0.4	0.54	0.64	-0.02	-4.41
Jour/6	-0.26	0.41	0.55	1.05	-0.05	-4.45
Jour/7	-0.19	0.78	0.92	1.62	0.02	-4.39
Jour/8	-0.25	0.7	0.85	1.44	-0.04	-4.45
Jour/9	-0.09	0.59	0.73	0.95	0.11	-4.27
Jour/10	-0.08	0.7	0.84	1.45	0.13	-4.54
Jour/11	-0.23	0.8	0.94	1.87	-0.02	-4.66
Jour/12	-0.17	0.73	0.87	1.66	0.04	-4.67
Jour/13	-0.45	0.97	1.12	1.81	-0.2	-4.56
Jour/14	-0.04	0.79	0.93	1.92	0.17	-4.09
Jour/15	-0.15	0.28	0.42	0.89	0.06	-4.23

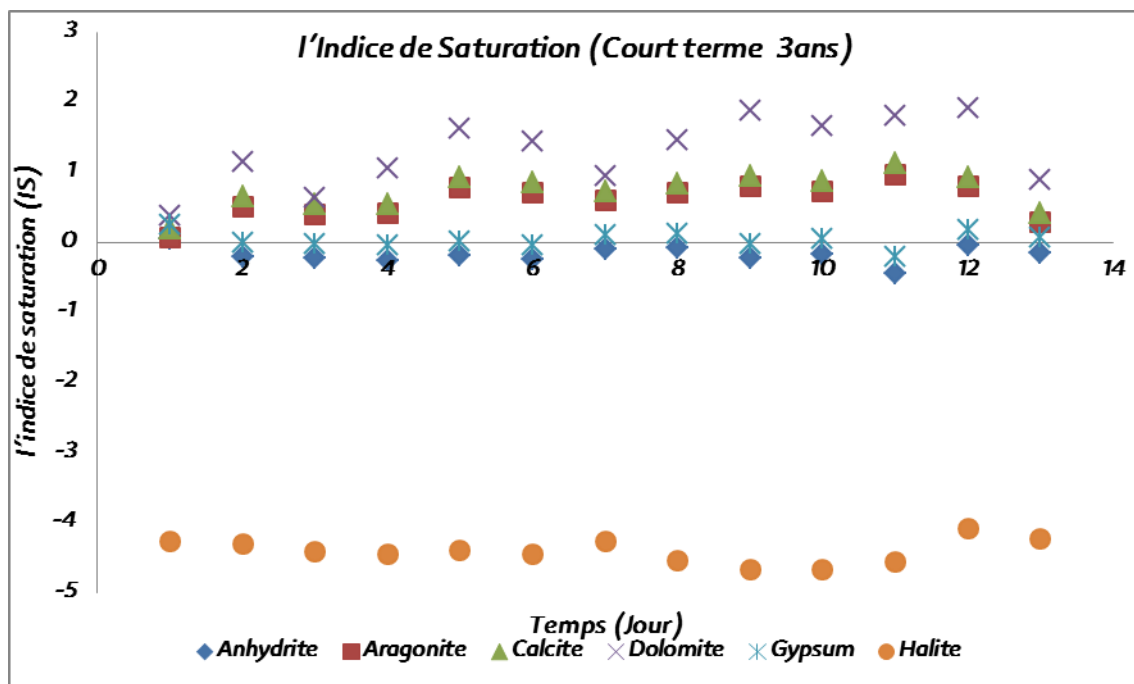


Figure 29. Variation de l'indice de saturation des minéraux présents dans des eaux filtrées au cours de l'expérimentation (Court terme - 3années)

La simulation à l'évaporation naturelle des eaux filtrées dans le court terme montre que les eaux sont déjà sursaturées (précipitation) selon les cas : Dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), Calcite (CaCO_3), Aragonite (CaCO_3). L'indice de saturation de ces minéraux carbonatés est positif (précipitation), il varie entre 0.06 et 1.92. Où il ya un maximum du Ca^{2+} , Mg^{2+} et HCO_3^- .

Aussi que pour les minéraux évaporitiques ; l'indice de saturation du gypse est sous saturé et proche de l'équilibre qui a une tendance de se précipiter ($0 < IS_{\text{gypse}} < 0.25$), ce qui lui permet de se dissoudre d'avantage dans les milieux filtrants surtout en surface et former une couche blanchâtre (Photo 12), l'anhydrite et halite sont sous saturés (IS est négatif) surtout pour l'halite (NaCl) qui est situé ente ($-4.09 < IS < -4.67$), ce qui lui permet de contribuer à une augmentation de la minéralisation des eaux filtrées.

8.4.3. Variation de l'indice de saturation des minéraux présents dans des eaux filtrées (Moyen terme - 5 années):

Le calcul des indices de saturation (Tableau 19) montre que la solution du sol étudié est saturée par rapport à la calcite, l'aragonite et la dolomite et sous-saturée pour la halite, le gypse et l'anhydrite. Donc, les minéraux carbonatés sont susceptibles de se précipiter, par contre les minéraux sulfatés sont toujours à l'état de sous-saturation, donc susceptibles de se dissoudre.

Tableau 19. Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans des eaux filtrées (Moyen terme - 5 années)

Temps (Jours)	Phase					
	Anhydrite	Aragonite	Calcite	Dolomite	Gypsum	Halite
Jour/2	-0.18	0.24	0.39	0.6	0.03	-4.32
Jour/3	-0.3	0.27	0.41	0.77	-0.09	-4.4
Jour/4	-0.3	0.29	0.43	0.81	-0.09	-4.44
Jour/5	-0.23	0.25	0.4	0.67	-0.02	-4.67
Jour/6	-0.14	0.34	0.48	0.71	0.07	-4.55
Jour/7	-0.2	0.63	0.77	1.05	0.01	-4.72
Jour/8	-0.15	0.5	0.64	1.12	0.06	-4.59
Jour/9	-0.05	0.44	0.58	0.88	0.16	-4.63
Jour/10	-0.11	0.57	0.71	1.21	0.1	-4.7
Jour/11	-0.2	0.7	0.84	1.56	0.02	-4.92
Jour/12	-0.3	0.88	1.02	1.74	-0.08	-4.57
Jour/13	-0.14	0.85	0.99	1.66	0.07	-4.82
Jour/14	-0.1	0.65	0.79	1.65	0.11	-4.52
Jour/15	-0.12	0.21	0.35	0.88	0.09	-4.34

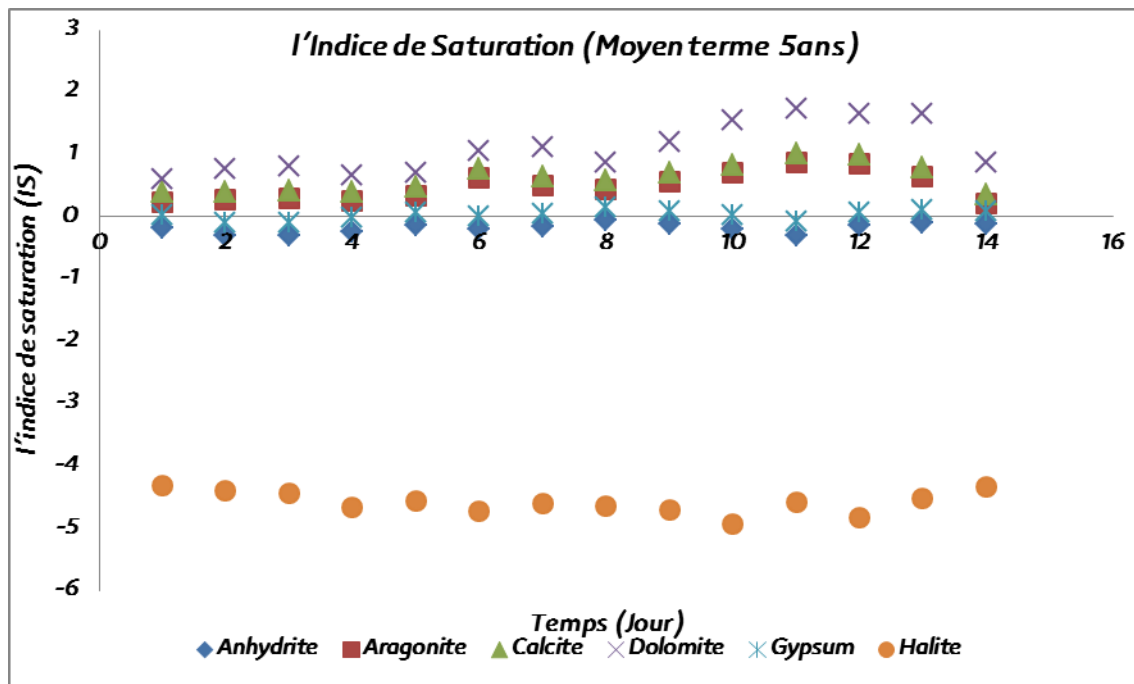


Figure 30. Variation de l'indice de saturation des minéraux présents dans des eaux filtrées (Moyen terme - 5ans)

La simulation à l'évaporation naturelle des eaux filtrées dans le moyen terme 5ans montre que les solutions sont déjà sursaturées (précipitation) Selon les cas : Dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), Calcite (CaCO_3), Aragonite (CaCO_3). L'indice de saturation de ces minéraux carbonatés est positif (précipitation) et varie entre 0.21 et 1.74. Où il ya un maximum du Ca^{2+} , Mg^{2+} et HCO_3^- . Pour les minéraux évaporitiques ; l'indice de saturation du gypse est sous saturé et proche de l'équilibre qui a une tendance de se précipiter ($0.02 < \text{IS}_{\text{gypse}} < 0.11$), ce qui lui permet de se dissoudre d'avantage dans les milieux filtrants surtout en surface et former une couche blanchâtre (Photo 12), l'anhydrite et halite est sous saturé (IS est négatif) surtout pour l'halite (NaCl) qui se présente largement en sous saturation ($-4.32 < \text{IS} < -4.92$), ce qui lui permet de contribuer à une augmentation de la minéralisation des eaux filtrées.

8.4.4. Variation de l'indice de saturation des minéraux présents dans des eaux filtrées (Long terme - 10 ans):

Le calcul des indices de saturation (Tableau 20) montre que la solution du sol étudié est saturée par rapport à la calcite, l'aragonite et la dolomite et sous-saturée pour la halite, le gypse et l'anhydrite. Donc, les minéraux carbonatés sont susceptibles de se précipiter, par contre les minéraux sulfatés sont toujours à l'état de sous-saturation, donc susceptibles de se dissoudre.

Tableau 20. Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans des eaux filtrées (Moyen terme 10 ans)

Temps (Jours)	Phase					
	Anhydrite	Aragonite	Calcite	Dolomite	Gypsum	Halite
Jour/1	-0.34	0.37	0.52	0.6	-0.13	-4.52
Jour/2	-0.37	0.23	0.37	0.63	-0.16	-4.5
Jour/3	-0.21	0.19	0.33	0.59	0	-4.59
Jour/4	-0.33	0.5	0.65	0.65	-0.12	-4.49
Jour/5	-0.43	0.4	0.54	0.63	-0.22	-4.57
Jour/6	-0.35	0.43	0.57	0.99	-0.14	-4.69
Jour/7	-0.2	0.55	0.69	1.38	0.01	-4.68
Jour/8	-0.2	0.57	0.71	1.28	0.01	-4.57
Jour/9	-0.17	0.55	0.69	1.38	0.04	-4.73
Jour/10	-0.21	0.61	0.75	1.15	0	-4.81
Jour/11	-0.21	0.68	0.82	1.37	-0.01	-4.52
Jour/12	-0.23	0.76	0.9	1.44	-0.02	-4.78
Jour/13	-0.21	0.8	0.94	1.42	0	-4.73
Jour/14	-0.17	0.58	0.72	1.46	0.04	-4.7
Jour/15	-0.16	0.43	0.57	1.48	0.05	-4.7

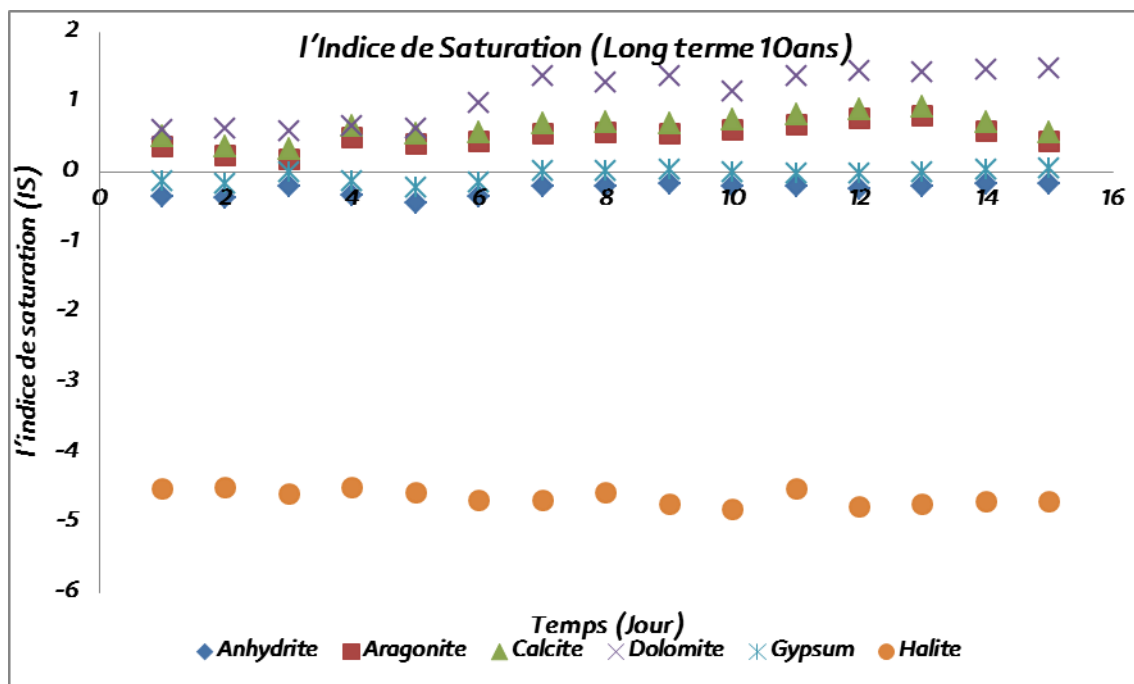


Figure 31. Variation de l'indice de saturation des minéraux présents dans des eaux filtrées (Long terme 10ans)

La simulation à l'évaporation naturelle des eaux filtrées dans le moyen terme 5ans montre que les solutions sont déjà sursaturées (précipitation) Selon les cas : Dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), Calcite (CaCO_3), Aragonite (CaCO_3). L'indice de saturation de ces minéraux carbonatés est positif (précipitation) et varie entre 0.19 et 1.48. Où il ya un maximum du Ca^{2+} , Mg^{2+} et HCO_3^- . Pour les

minéraux évaporitiques ; l'indice de saturation du gypse est sous saturé et proche de l'équilibre qui a une tendance de se précipiter ($-0.01 < IS_{\text{gypse}} < 0.05$), ce qui lui permet de se dissoudre d'avantage dans les milieux filtrants surtout en surface et former une couche blanchâtre (Photo 12), l'anhydrite et halite est sous saturé (IS est négatif) surtout pour l'halite ($NaCl$) qui se présente largement en sous saturation ($-4.50 < IS < -4.81$), ce qui lui permet de contribuer à une augmentation de la minéralisation des eaux filtrées.

9. Conclusions

Les sels solubles des filtres sont mobiles et peuvent se déplacer en raison de divers processus. Il est évident que les sels les plus mobiles sont les plus solubles, et leurs mouvements sont influencés par la qualité de l'eau d'irrigation brute qui mouille le filtre et les mouvements qu'il subit. Les caractéristiques du milieu filtrant et le type des sels de l'eau d'irrigation brute affectent la migration et le dépôt des sels dissous dans l'eau.

Les sels des eaux filtrées contiennent des proportions variées de cations (Na^+ , Mg^{2+} , K^+ et Ca^{2+}) ainsi que des anions (Cl^- , SO_4^{2-} et HCO_3^-) qui conduisent à des degrés différents de salinité.

Les composants présents dans l'eau d'irrigation brute sont les principales sources de ces sels.

Le sel des sols regroupe l'accumulation et le lessivage des sels solubles (variations périodiques de ces processus dans les filtres). L'examen analytique des sels, les variations entre une eau d'irrigation brute et les filtres, révèle la direction dominante de leurs mouvements et si l'accumulation ou la lixiviation de sels a lieu dans des conditions données.

Le transport des cations et des anions, et leurs interactions sur la surface du matériau filtrant affecte de nombreux aspects de comportement des sols. Il est donc important de comprendre les processus qui régissent le mouvement de soluté vers le bas et vers le haut à travers le sol et l'influence du débit sur la concentration de différents cations et anions.

Le sol est un système minéral poly-dispersé auquel peut s'ajouter de la matière organique plus ou moins décomposée. La phase la plus importante est la phase colloïdale : argile+humus qui possède la propriété d'absorber les cations et anions et certains organismes microscopiques

Le complexe absorbant d'un sol est l'ensemble des colloïdes minéraux et organiques qui ont la propriété de fixer des ions. Les ions sont retenus sur les surfaces adsorbantes par interactions électrostatiques sous forme de complexes à sphère externe et par des liaisons de coordination sous forme de complexes à sphère interne.

Le complexe argilo-humique, chargé négativement à sa surface, a la capacité de retenir à sa surface des cations provenant de la solution du sol : c'est le pouvoir adsorbant. Les cations présents dans la solution n'ont pas tous le même pouvoir flocculant. Ce dernier est donné dans

l'ordre décroissant des cations : $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{H}^+ = \text{K}^+$. Le magnésium a les mêmes propriétés que le calcium, mais son pouvoir flocculant est moindre.

L'échange des ions bivalents, surtout Ca^{2+} du complexe absorbant contre les ions Na^+ , n'est possible que dans la mesure où la concentration de l'ion Na^+ l'emporte de manière significative sur celle de l'ion Ca^{2+} dans la solution du sol.

Certains éléments, tels que le phosphore et l'azote, sont absorbés et disparaissent par transformation par voie biochimique. Les phosphates peuvent donner des composés insolubles qui précipitent dans le sol, tandis que l'azote après nitrification et ammonisation peut être vaporisé dans l'atmosphère.

CONCLUSION GENERALE

Les sols des écosystèmes arides sont vulnérables à tous les types de changements et de mise en valeur qui n'ont pas été étudiés, et une salinisation secondaire, qui conduit à la désertification, pourrait les fragiliser à long terme. Bien que l'impact à court terme de certains changements, comme une agriculture irriguée avec des eaux chargées en sels, soit incertain. Si les interventions des agriculteurs ne sont pas mesurées aux préalables, seul l'utilisation de certains indicateurs (analyse physico-chimique) pourrait nous informer sur la qualité des sols et des eaux de ces écosystèmes et éventuellement leurs devenir.

L'objectif principal de notre travail de thèse est d'étudier l'évolution des caractérisations des sols agricoles irrigués par les eaux minéralisées dans la vallée d'Oued-souf dans ce cadre. Le travail de recherche est divisé en deux volets principales.

Le premier volet est une analyse qualitative de l'évolution de la salinité des sols irrigués par un système d'aspersion (Pivot) depuis quelques années. Pour cela, trois stations irrigués respectivement depuis 2 et 5 années ont été étudiées, leurs résultats ont été comparés au sol témoin (sol naturel ayant les mêmes caractéristiques pédologique que celui étudié et se trouvant à sa proximité). L'irrigation des terres agricole est effectuée au moyen d'aspersion avec une eau minéralisée provenant de la nappe phréatique.

Le deuxième volet est purement expérimental qui vise à étudier l'influence de la salinité des eaux et la fréquence d'irrigation sur le sol.

Les résultats d'analyse obtenus selon les critères du laboratoire régional de la salinité des États-Unis U.S. Salinity Laboratory Staff (1954), indique que l'eau d'irrigation est de type C4S1, C4S2, selon Durand(1958), ils interprètent des qualités médiocres à mauvaises.

Durant 2 années d'irrigation dans les trois stations, la conductivité électrique d'extraits aqueux (1/5) a varié entre 0.40 et 1.45 dS/m, elle correspond aux classes salée. Lors des 5 années d'irrigation dans ces stations, la conductivité électrique a varié de 1.13 à 1.90 dS/m, elle correspond aux classes fortement salé. La comparaison de cet état de salinité avec le sol témoin (sol non irrigué) ayant une CE variant entre 0.19 et 0.58 dS/m (correspond aux classes non salée) donne une différence significative de CE.

Ces résultats sont confirmés par l'analyse statistique des données (ACP et MC), l'ACP a révélé que la salinité est fortement influencée par le magnésium Mg^{2+} , le calcium Ca^{2+} , le sulfate SO_4^{2-} , le chlorures Cl^- et le bicarbonate HCO_3^- dans la couche arable. Le calcium (Ca^{2+}) et le sulfate (SO_4^{2-}) sont les ions qui présentent une forte corrélation avec la conductivité électrique, donc la

salinité de ces sols est dominée par le sulfate SO_4^{2-} . À l'appui de cette hypothèse, l'analyse de spéciation a révélé que l'association la plus forte entre les cations et les anions était la formation d'espèces de sulfate avec Ca^{2+} et Mg^{2+} . En outre, CaSO_4 (aq), étant la deuxième espèce principale après SO_4^{2-} de la concentration totale de sulfate.

Concernant l'expérimentation sur le régime hydrique en condition saline on n'a trouvé que la migration et le dépôt des sels dissous dans l'eau dépendant des caractéristiques du milieu filtrant et le type des sels de l'eau d'irrigation brute. Les sels des eaux filtrées pour (3 années, 5 années et 10 années d'irrigation) contiennent diverses proportions de cations (Na^+ , Mg^{2+} , K^+ et Ca^{2+}) et les anions (Cl^- , SO_4^{2-} et HCO_3^-) qui mènent à différents degrés de la salinité.

Les principales sources des constituants de ces sels sont les composants trouvés dans de l'eau d'irrigation brute. L'examen analytique des sels, les variations entre une eau d'irrigation brute et les eaux filtrées, révèle la direction dominante de leurs mouvements et si l'accumulation ou la lixiviation de sels a lieu dans des conditions données.

Recommandations et perspectives

L'amélioration durable de la productivité agricole en sols salés est aujourd'hui un objectif qu'il faut atteindre pour motiver les agriculteurs à produire dans ces conditions pédologiques.

Pour Plus d'information et compréhension du fonctionnement des ressources en eau et sol de la région d'étude, diverses perspectives semblent être nécessaires :

Etude de traitement et ses conséquences

- ✓ Les sols devraient être traités par des amendements chimiques qui réduisent de la solubilité du gypse et de son concentration. Certains composés chimiques comme le chlorure de baryum, l'oxalate de potassium, l'oxalate, le carbonate d'ammonium et le phosphate d'ammonium ont été utilisés pour traiter le problème du gypse dans ces sols. Le but de l'ajout de ces produits chimiques au sol est de réduire la proportion de gypse, sa solubilité et son efficacité dans le sol par la transformation du précipité de ce dernier en formes et formulations chimiques moins solubles que le gypse et précipitation de leur dissolution.
- ✓ Les techniques de gestion comprennent le lessivage des terres et l'irrigation par modes efficaces, par exemple, l'irrigation goutte à goutte, méthode peut jouer un rôle important dans le contrôle des sels dans la zone racinaire, et Toute pratique qui réduisent l'évaporation de la surface du sol et favoriser le flux descendant d'eau du sol aidera également le contrôle de la salinité autours de la zone racinaire.
- ✓ Une irrigation adéquate a un effet significatif sur l'optimisation des rendements et le contrôle de la salinité du sol et les pertes d'eau, ces résultats ne peuvent être atteints que si on agit

simultanément sur le système d'irrigation et la conduite des arrosages on prenant en considérations les conditions pédoclimatiques.

- ✓ Utilisation de modèles de simulation mathématiques pour une gestion efficace de l'irrigation par les eaux salées, avec contrôle de la salinité des sols et des rendements des cultures.
- ✓ L'évapotranspiration est l'un des processus qui augmente la concentration des sels par capillarité autour des racines des plantes surtout en présence d'apport d'eau sous forme d'irrigation subséquent par des vents secs. Les haies brise-vent agissent également pour limiter les pertes d'eau utile par évaporation et assèchement des sols par évapotranspiration des plantes.
- ✓ Pour mieux valoriser nos travaux de recherches, et tant que la vallée d'Oued-souf est une région pionnière à vocation agricole, la multiplication du nombre des stations météologiques apparait plus que nécessaire afin de maîtriser et contrôler le bilan hydrique (l'ETP, et pluie/irrigation) et par conséquent le bilan salin.
- ✓ Faire de la recherche appliquée au défi du développement durable est un réel partenaire en continu.
- ✓ Elaboration d'un réseau de veille des risques liée à la salinité et sodicité des sols et des eaux d'irrigation (dépérissement, dégradation des terres cultivées, chutes de rendements, ...);
- ✓ L'étude pédologique récente de l'ensemble des oasis anciennes apparait primordiale et plus que nécessaire, permette de dégager un certain nombre de caractéristiques spécifiques liées à la mise en culture.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- AUBERT G, OLLATC H., 1969** - « Observation sur l'utilisation d'eaux saumâtres pour l'irrigation et sur l'amélioration des sols salés ». Acad. d'agric.de France 19/02/69,244-254.
- AYERS R. S., 1976**- «Aspects de salinité et de la qualité de l'eau de l'irrigation goutte à goutte ». Annales INAEI-Harrach VI,3,109-113.
- AYERS R.S, WESTCOTD.W., 1985** - «Water quality for agriculture ». FAO, Irrigation and drainage paper 29. 174P. Rome, Italy.
- AUBERT G., 1978** - « Sols salés en Afrique tropicale ». UNEP URSS Ac. of Sci. Seminar on salinity problems.
- ABDESSELAM S., 1998** - «Contribution à l'étude des sols gypseux au nord-est du Sahara Algérien : Caractérisation et genèse. Cas des Oasis de Tolga (région des Ziban) » - Thèse Mag.I.N.A.(El-h Harrach), 147p.
- ABDESSELAM S., 2013** - «Impact de la mise en culture en irrigué sur les sols et les eaux dans un bassin endoréique en zone aride. Cas du sud du Hodna (Algérie) ». Thèse doctorat. Université Hadj Lakhdar Batna, 202p.
- AIDAOUI S., 1994** - «Ressource en eau et aménagement hydroagricole dans la région de Biskra (Ziban) (Algérie) » ; thèse Doctorat. Université de Nancy II. 327 p.
- ANAT, Agence Nationale d'Aménagement de territoire, Algérie., 2003** - «Schéma directeur des ressources en eau ». Wilaya de Biskra. Rapport de synthèse, 100 p.
- ANRH., 2008** - «Inventaire des points d'eau et enquêtes sur les débits extraits de la wilaya de Biskra (2008) »,rapport .
- ANRH., 2016** - «Efficacité de l'irrigation GPI d'El Outaya ». Rapport de l'Agence Nationale des Ressources hydriques de Biskra.
- ASSAMI T., HAMDI-AISSA B., HALITIM A., MOSTEFAOUI T est ROUAHANA H., 2014** - « Apport de la télédétection dans l'étude de la relation entre états de surface et pédopaysages en milieu aride : Exemple de la région d'El Outaya (Biskra, Algérie) ». Algerian Journal of arid environment, volume 4 n°1, pp. :60–71.
- ASKRI H. et REJEB S., 2000** - «Effets de différentes techniques d'irrigation sur deux cultures Maraîchères irriguées avec une eau saumâtre. Compte rendu du séminaire sur l'économie de l'eau en irrigation ». Numéro spécial des annales de l'Institut National de Recherche en Génie Rural. Hammamet, 14-16 novembre 2000, PP : 218-232.

- ASKRI B et BOUHLILA R., 2010** - «Évaluation de la salinisation dans une oasis moderne de la Tunisie ». Étude et gestion des sols vol 17, 3-4, 197-212 p.
- AUBERT G., 1960** - «Les sols de la zone aride, étude de leur formation, de leurs caractères, de leur utilisation et de leur conservation ». Colloque général sur les problèmes de la zone aride, 11-18mai1960. Commun (5). UNESCO/NS/AZ/S14, Paris, 30p.
- AUBERT G., GUILLEMIN C et PIERROT R., 1978** - « Précis de minéralogie ». Paris : Masson, 332p.
- BOUGENDRE A., 1973** - «Utilisation des eaux salées pour l'irrigation ».Mémoire ESAT.
- BADRAOUI M., SOUDI B., et FARHAT A., 1998** - Variation de la qualité des sols : une base pour évaluer la durabilité de la mise en valeur agricole sous irrigation par pivot au Maroc ». Étude et Gestion des Sols ; volume 5 n° 4, PP : 227-234.
- BAIZE D., 1988** - « Guide des analyses courantes en pédologie ». Choix, expression, présentation, interprétation. I.N.R.A. Paris, 172p.
- BALA S., 2005** - « Évolution de la salinité des sols sous serres en milieu aride. Cas de la station de l'ITDAS de Biskra ». Thèse Mag I.N.A. (El Harrach). 129 p.
- BARBALUT R., 2000** - « Écologie générale, structure et fonctionnement de la biosphère 5e Éd.DUNOD, 326p ».
- BARZANJIA. F., 1973** - «The gypsiferous soil of Irak ». Thèse de Doctorat. Genet., 199 p.
- BELGHEMMAZ S., 2000** - «Contribution à l'étude de l'évolution de la salinité et du complexe Adsorbant d'un sol saharien soumis à l'irrigation goutte à goutte. Cas du périmètre du Groupement El-Moustakbal ; Zeribet El Oued Biskra ».Thèse Magister Inst.Agro. Batna101p.
- BELHADI A., MEHENNI M., REGUIEG L et YEKHLEF H., 2016** - « Apport de la plasticulture à la dynamique agricole de la région de Ziban (Biskra) ». Revue Agriculture, 1 : 93
- BENAOUDA L., 2008** - **ASSAMI T., MERIDJA W., HALITIM S. et HALITIM A.** « Changement de la qualité des sols irrigués de la plaine d'El Outaya (Biskra) : Données de base et hypothèses ». Colloque international sur l'aridoculture - optimisation des productions agricoles et développement durable. Biskra, C. R.S.T.R.A, 13-14 Décembre 2008.
- BENSAID R., 1999** - « Les sols à accumulations gypso-calcaires de la région d'Ain - Benoui (Biskra) ». Annales de l'Institut National Agronomique El Harrach — Vol N° 1 et 2, 8p.
- BOUALLA N., BENZIANE A et DERRICH Z., 2012** - « Origine de la salinisation des sols de la plaine de M'léta (bordure sud du bassin sebkha Oran) ». Journal of Applied Biosciences 53:3787-3796 pp.

- BOUGHERARA A et LACAZE B., 2009** - « Étude préliminaire des images Landsat et Alsat pour le suivi des mutations agraires des Ziban (extrême Nord-est du Sahara algérien) de 1973 à 2007 ». Journées d'animations scientifiques. J.A.S 9. Alger, 6 p.
- BOUGAFLA F. et BENZAZZOUZ M. T., 2013** - « Eaux d'irrigation et salinisation des sols de périmètres irrigués dans la vallée de l'Oued Righ ». Journal algérien des régions arides (CRSTRA), 12 : 97-102.
- BOUMARAF B., 2013** - « Caractéristiques et fonctionnement des sols dans la vallée d'Oued Righ, Sahara Nord Oriental, Algérie ». Thèse Doctorat. Université de Reims Champagne-Ardenne, 97p.
- CHABAH M., 2007** - « Lithostratigraphie, sédimentation et modèles des deux Bassins des dépôts néogènes de la région de Biskra, de part et d'autre de l'occident Sud Atlasique (Ziban, Algérie) ». Thèse doctorat d'État, 417 p.
- CHABOUR N., 2006** - « Hydrogéologie des domaines de transition entre l'Atlas saharien et la plateforme saharienne à l'est de l'Algérie ». Thèse doctorat en géologie. Université de Constantine, 176p.
- CHAUSSOD R., 1996** - « La qualité biologique des sols : Évaluation et implications ». Eude et Gestion des sols ; volume 3 n° 4, PP : 261-277.
- COLL P., LE VELLY R., LE CADRE E., et VILLENAVE C., 2012** - « La qualité des Sols : associer perceptions et analyses des scientifiques et des viticulteurs ». Étude et Gestion des sols ; volume 19 n° 2, PP : 79-89.
- COTE M., 1983** - « L'espace algérien : les prémices d'un aménagement ». Ed. OPU. Alger. 280 p.
- COTE M., 1994** - « Mise en valeur nouvelle sur une vieille frange présaharienne : piémont des Ziban (Algérie). Séminaire « Mise en valeur des franges des franges présahariennes du Maghreb », Gabès (Tunisie), 4-6 novembre.
- GOUSCOV N., 1964** - « Notice explicative de la carte géologique au 1/200. 00 e de Biskra (48), service géologique de l'Algérie, sp13 ».
- COUTURE I., 2004** - « Analyse d'eau pour fin d'irrigation ». MAPAQ Montérégie-Est, Agri-Vision, 8 p.
- CPCS, 1967** - « Classification des sols ». Laboratoire de géologie, pédologie de l'E.N.S.A, Paris Grignon, 87 p.
- CRSTRA., 2007** - « Atlas de la faune et la flore des Ziban ». Ed 2007.
- CRSTRA., 2016** - « Les sols du Sahara et les changements de leur qualité sous irrigation : cas des Ziban ». Projets FNR du centre. Division Sol en région Arides.

- DAOUD Y. et HALITIMA., 1994** - « Irrigation et salinisation au Sahara algérien ». Sécheresse ; 3(5), PP: 151-160.
- DAJOZ, 1982** - « Précis d'écologie ». Ecologie fondamentale et appliquée Ed. Gauthier-Villiers paris. 503 P.
- DELLAL A et HALITIM A., 1992** - « Activités microbiennes en conditions salines : cas de quelques sols salés de la région de Relizane (Algérie) ». Ed cahiers de l'agriculture 1 ; 335-340.
- DESROUSSEAUX M., 2015** - « La protection de la qualité des sols. Présentation des travaux des médaillés d'argent ». Séance du 4 novembre 2015.
- DJILI K., DAOUD Y., GUAOUAR A et BELJOUDI Z., 2003** - « La salinisation secondaire des sols au Sahara : conséquences sur la durabilité de l'agriculture dans les nouveaux périmètres de mise en valeur ». Sécheresse ; 14(4), PP: 241-246.
- DOMMERGUES Y. et MANGENOT F., 1970** - « Ecologie microbienne des sols ». Edition Masson, 1976.
- DORAN J.W et SAFLEY M., 1997**- « Heath .CAB International, Wallingford, Oxon, Uk ,pp:1 - 28 ».
- DORAN J. W et ZEISS M.R., 2000** - « Soilhealth and sustainability, mnaging Definig and assessing soil health and sustainable productivity, eds., C.Pankhurst , B.M. Double et V.V.S.R.Gupta, Biological Indicators of Soil the biotic component of quality ». Appl. Soil Ecol., 15, pp.: 3–11.
- DROUET T.,** - « Pédologie BING-F-302, 137 p ».
- DROUICHE A.M., CHAIB W., REZEG A., BOUGHRIRA N., HAMZA OUI W. et DJABRI L., 2013** - Risque de contamination des eaux souterraines par les nitrates en régions arides ; cas d'El Ghrous (région des Ziban - Sud-Est algérien) ». Algerian Journal of arid environment, n° special, pp: 65–75.
- DSA., 2018** - « Bilan final des statistiques de la direction des services agricoles de la Wilaya de Biskra 2017 ».
- DUBOST D., 2002** - « Ecologie, Aménagement et Développement des Oasis Algériennes ». Edition CSTR, 243p.
- DURAND J.H., 1958** - « Les sols irrigables. Étude pédologique ». S.E.S. 193 p.
- DURAND J.H., 1983** - « Les sols irrigables. Étude pédologique. Agence de coopération culturelle et technique ». Presses universitaires de France, 339 p.
- DAOUD Y, HALITIMA ., 1994** - « Irrigation et salinisation au Sahara algérien ». Sécheresses 5, 3, 151 – 160.

- DUCHAUFFOUR PH., 1983** - « Pédogénèse et classification ». 2^{ème} édition. Masson. Paris, 477p.
- EL OUMLOUKI K., MOUSSADEK R., ZOUAHRIA., DAKARH., CHATIM., EL OUMRANI M., 2014** - « Eude de la qualité physico-chimique des eaux et de sols de la région Souss Massa, (Cas de périmètre Issen), Maroc ». Journal of Materials and Environmental Science, 5(S2), pp.: 2365–2374.
- EMBERGER L., 1955** - « Une classification biogéographique des climats ». Trav. Inst. Bot.Montpellier.
- FAO., 1990** - « Management of gypsiferous soils ». Soils bulletin 62, Rome, 81p.
- GUEZ C., 1982** - « L’analyse minéralogique des sédiments par Diffraction de Rayons X.PhysioGéo, n° 3 » Centre de Documentation du C.N.R.S., PP : 73-84.
- GUIRAUD R., (1973)** - « Evolution post – triasique de l’avant pays de la chaine alpine en Algérie d’après l’étude du bassin du Hodna et des régions voisines ». Thèse Sc . Univ . Nice, 270p,
- GUISSE A., 2015** - « Influence des caractéristiques physico-chimiques des sols sur la flore et la végétation ligneuse de trois stations du tracé de la grande muraille verte du Tchad ». Journal of Applied Biosciences 95, pp. 8937–8949.
- HACHICHA M., JOB J. O et MTIMET A., 1994** - « Les sols salés et la salinisation des sols en Tunisie ». Bulletin de la direction des sols «sols de Tunisie » n° 15, PP : 270-341.
- HACHICHA M. et MHIRI A., 2003** - « Utilisation des eaux salées et risque de salinisation en Tunisie ». Congrès de : ADENIT. Association des anciens de l’école Nationale d’ingénieurs de Tunisie - SHF société hydrotechnique de Tunisie et avec le soutien de la Direction de l’eau du Ministère d l’Écologie et du Développement durable de la République français. Tunis, les 20-21 mai 2003, PP : 185-191.
- HACHICHA M., 2007** - « Les sols salés et leur mise en valeur en Tunisie ». Sécheresse vol. 18, n° 1, pp.45-50.
- HALILET M. T., 1998** - « Étude expérimentale de sable additionnée d’argile. Comportement physique et organisation saline et sodique ». Thèse Doctorat. I.N.A.P.G., Paris, 250p.
- HALILAT M.T., 2004**- « Effet de la fertilisation potassique et azotée sur blé en zone saharienne ». IIP regional workshop on potassium and fertigation development in West Asia and North Africa. Rabat, Morocco.
- HALILET M.T. et DOGAR M.A., 2000** - «Rôle de la fertilisation azotée et potassique sur blé en Zones sahariennes ». Actes du premier symposium international sur la filière blé - Enjeux et stratégie (blé 2000, Algérie). Algérie, OAIC - Alger, 7-9 février 2000, PP : 213-234.

- HALITIM A., 1989** - « Sols des régions arides d'Algérie ». Éd. O.P.U. Alger, 384p.
- HALITIM A., 2006** - « Les sols des régions arides d'Algérie. Journées internationales sur la Désertification et le de Développement durable ». Biskra 10 au 12 juin, PP : 27-33.
- HALITIM A., 2011** - « L'aridoculture et le développement durable ». Journal des régions arides, vol 1, n° 1. Janvier 2011, pp. 3-9.
- HALITIM S., 2006** - « Contribution à l'étude de la réserve utile en eau des sols de Cedraies dans les Aure : Influence des facteurs édaphiques ». These Magister, Université de Batna, 117p.
- HEM JD., 1985** - « Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water, USGS Water Supply Paper, 2254, pp:117–120 ».
- HAMMOUDI A., 1999** - « Distribution de l'humidité et de la salinité dans la rhizosphère du maïs jaune sous irrigation goutte à goutte ». Actes du séminaire sur la salinisation de terres agricoles en Algérie. Chlef, 145-156.
- HAMDY A, RAJAB R., 2001**- « Reuse of saline and waste water for irrigation: major issues on water, crop and soil management environment protection and health safety ». In. Non conventional water resource: reuse and management. IAM, BARI, 38P.
- HULLIN, M. 1983** - « Cours de drainage. Partie consacrée aux sols salés ». Cours polycopiés, vol. 3, INA, El-Harrach Alger 139 p.
- IRD., 2008** - « Les dossiers thématiques de L'Institut de Recherche pour le Développement ». Les sols sont fragiles : 1ers partie, Salinisation et sodisation des sols 2e partie, la dégradation des sols par salinisation ou alcalisation.
- IPIRID, FAO, CISEAU, 2006** - « Conférence électronique sur la salinisation: Extension de la salinisation et stratégie prévention et réhabilitation, 11p ».
- IDDER. A et al. , 2016** - « Intrusion minérale par modélisation géochimique dans les textures sableuses des sols. Le cas du Sahara septentrional algérien ». J. Mater. Environ. Sci. 7 (10) (2016) 3724-3729, ISSN : 2028-2508, CODEN: JMESC. RQM8_Nador. p.p 3724-3729
- IDDER, T. 1998** - « La dégradation de l'environnement urbain liée aux excédents hydriques au Sahara algérien. Impacts des rejets d'origine agricole et urbaine et techniques de remédiation proposées. L'exemple de Ouargla ». Thèse Doct. Univ. Angers, 284 p.
- IDDER, T. et al., 2014** - « Les oasis du Sahara algérien, entre excédents hydriques et salinité. L'exemple de l'oasis de Ouargla ». Revue des sciences de l'eau. Volume 27, numéro 2, 2014. ISSN : 1718-8598 Revue des Sciences de l'Eau 27(2) (2014) p.p155-164
- JOB.J.O. 1981** - « Some problems in analysis of soils in arid areas. International soil classification workshops ». Damas : ACSAD, PP : 219-234.

- KHECHANA S. 2014.** « Perspective et méthode de la gestion intégrée des ressources en eau dans une zone hyper-aride. Application sur la vallée d'Oued-Souf (Sud-Est algérien) ». th. Doctorat, univ.de Annaba, 148 p.
- KHECHANA S, DERRADJI F, DEROUICHE A, MEGA N (2011)** « Caractéristique hydrochimiques des eaux de la nappe phréatique du vallée d'Oued Souf (SE Algérien) ». Eur J Sci Res 62:207-215
- KHADRAOUI A., 2006** - « Ressource en eau au Sahara et leur impact environnemental ». Actes des journées internationales sur la désertification et le développement durable, Biskra, du 10 au 12 juin 2006, PP: 49-54.
- KHADRAOUI A., 2010** - « Sols et hydraulique agricole dans les Oasis algériennes. Caractérisation - Contraintes et propositions d'aménagement ». Office des publications universitaires. Edition n° 5125,311p.
- KHECHAI S., 2001** - « Contribution à l'étude du comportement hydrophysique des sols du Périmètre irrigué de l'I.T.D.A.S., dans la plaine de l'El Outaya (Biskra) ». Thèse Magister , Inst. Agro. Batna, 179p.
- KOULL K., KHRAZE M. H., LAKHDARI K., BENZAOUI T., HELIMI S., LAOUISSA M.S., KHERFI Y., BOUGAFLA A., MIMOUNI F., MEZRAG M. et BENAZOUZ M. T., 2013** - « Eaux d'irrigation et salinisation des sols des périmètres irrigués dans la vallée de L'Oued Righ ». Journal algérien des régions arides, PP : 97-103.
- LARSON W.E et PIERCE F.J., 1992** - « Conservation and enhancement of soil quality ». In evaluation for sustainable land management in the developing world. Vol. 2: Technical papers. Bangkok, Thailand, Inter. Board for Research and Management, 1991, IBSRAM Proceedings n°12(2), pp.: 75-203.
- LAVELLE P., LEGROS J-P., LEPRETRE A., et STERCKEMAN T., 1999** - « Le suivi de la qualité des sols en France, la contribution de l'Observation de la Qualité des Sols ». Étude et Gestion des Sols, 6, PP : 215-230.
- LEGROS J-P., 2009** - « La salinisation des terres dans le monde. Académie des Sciences et Lettres de Montpellier ». Séance du lundi 22-06-2009, conférence n° 4069. Bull. n° 40, PP : 257 - 269.
- LAABOUDI A., CHABOUNI A., 2011**- « Les sols de la région d'Adrar ; état initial et méthodes de conservation INRAA ». Station expérimentale d'Adrar, 12p.

- MOUHOUCHE B., 2000** - « L'avenir de l'agriculture saharienne dépend de la maîtrise de la salinisation des sols et de la valorisation de l'eau d'irrigation et de drainage ». Actes du congrès scientifique arabe, El-Oued, 191-201.
- MAOUCHI Y., 2019** - « Biskra, le jardin potager de l'Algérie ». Le magazine promotionnel de l'Algérie - El-Djazair n° 21 - juin.
- MARTIN S., BAISE D., BONNEAU M., CHAUSSOD R., CIESIELSKI H., GAULTIER J-P., LAVELLE P., LEGROS J-P., LEPRETRE A., et STERCKEMAN T., 1999** - « Le suivi de la qualité des sols en France, la contribution de l'Observation de la Qualité des Sols ». Étude et Gestion des Sols, 6, PP : 215-230.
- MASMOUDI A., 2012** - « Problème de la salinité lié à l'irrigation dans la région des Ziban ». Thèse doctorat. Université de Biskra 137p.
- MAUGET G., 1957** - « L'évolution des ressources hydriques dans les oasis du bas Sahara algérien ». Recherche sur l'Algérie. Édition CNRS Paris, PP : 68-75.
- MASHALI A.M., 1996** « Soil management practices for gypsiferous soils. International symposium with gypsum ». Leida. Spain, pp: 34-51.
- MINDA M-S., DILLO M-D., NDIAYE O., NIANG K., SANE S., TOUROUMGAYE G., MATTY F et LAVELLE P., LEGROS J-P., LEPRETRE A., et STERCKEMAN T., 1999** - « Le suivi de la qualité des sols en France, la contribution de l'Observation de la Qualité des Sols ». Étude et Gestion des Sols, 6, PP : 215-230.
- MOSTEPHAOUI T est BENSALIM R., 2014** - « Caractérisation des sols gypseux dans les zones arides par télédétection. Cas du sous-bassin versant d'oued Djeddi - Biskra ». Lebanse Science Journal, vol .15. N° 1, PP : 99-115.
- MOSTEPHAOUI T., 2015** - « Les sols gypseux : Localisation et relation avec le milieu physique ». Thèse Doctorat. Université de Batna, 240p.
- MTIMET A., 1998** - « Gestion durable de l'eau et du sol dans les oasis tunisiennes .16em Congrès mondial de science du sol ». Symposion n° 29, enregistrement : 1462.
- OENDA P., 1983** - « Flore du Sahara. 2ème Edition. Ed. C.N.R.S . Paris, 622 p ».
- QUEZEL P., SANTA .S., 1963** - « Nouvelle Flore De L'Algérie Et Des Régions Désertiques ». Désertiques. Ed. Centre nati.Rech.sci. (C.N.R.S) ,Paris, T. I, 565.
- RAYMOND, J. E., SHAPIRO, K. L., & ARNELL, K. M. (1992)**. «Temporary suppression of visual processing in an RSVP task: An attentional blink? » Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 18, 849–860.

- RECHACHIM Z., 2017** « Impact de la qualité des eaux d’irrigation sur la salinisation des sols en régions arides et semi-arides : cas de la région des Ziban ». Thèse doctorat. Université de Biskra 250p.
- REZKI M., 2000** - « La culture du blé en zones sahariennes : potentialités et contraintes. Actes du premier symposium international sur la filière blé. - Enjeux et stratégie (blé 2000) ». Algérie, OAIC -Alger, 7-9 février 2000, PP : 221-228.
- ROUAHNA H., 2007** - « Relation entre les nappes et la salinité dans les sols gypseux de la région d’Ain Ben Noui (Biskra) ». Mém. Mag, Univ Batna, 98 p.
- ROUAHNA H., 2019** - « l’individualisation de gypse dans les sols de la plaine d’El Outaya ». Thèse doctorat. Université de Biskra 355p.
- SAIDI A., HAMMAMI M., DAGHR H., HATIRA A., LTIFI W et HCHANI K., 2010** - « Bilans d’eau et des sels dans le périmètre irrigué de Kalaat Landalous (Tunisie), Sécheresse, vol.21, n° (1e) : 1-5 ».
- SEDRATI N., 2011** - « Origines et caractéristiques physico-chimiques des eaux de la wilaya de Biskra sud algériens ». Thèse Doctorat. Université d’Annaba, 252p.
- SERVANT J.M et SERVAT E., 1966** - « Introduction à l’étude des sols salés littoraux du Languedoc ». Boussillon. Ann. Agro. 17 (1), PP : 53-73.
- SERVANT J.M., 1976** - « La salinité dans le sol et les eaux. Caractérisation et problèmes d’irrigation drainage ». S.E.S.n °310, Montpellier, 27p.
- SOUTTER M., MERMOUD A et MUSY A., 2007** - « Ingénierie des eaux et du sol, processus et aménagement ». 1ère édit, science et technologie de l’environnement. 294 p.
- TESSIER D., BRUAND A., LE BISSONNAIS Y et DAMBRINE E., 1996** - « Qualité chimique et physique des sols : Variabilité spatiale et évolution ». Étude et Gestion des sols; Volume 3 n° 4, PP : 229-244.s
- U.S. Salinity Laboratory Staff-1954** - « Diagnosis and improvement of saline and alkali soils ». U.S.S.L. L. U.S.D.A.Editor Handbook n° 60, 160 p.
- VANHOORN J.W., 1995** - « Développement de la salinité du sol dans la zone racinaire ». Comptes rendus : Acad.d’Agic de France - Action (4), vol 81 (2), Paris (Sciences spécialisées du 22 mars 95), PP : 61-72.
- ZELA L , KETTAB A., 2003** - « Optimisation d'un réseau de micro irrigation ».Sècheresse 14, 3, 189 – 194.

المراجع بالعربية

- ابوسليمان م.س.م.، غير مؤرخ التوازن الملحي للأراضي المروية.معهد بحوث الأراضي والمياه والبيئة، مصر 16.ص.
- الشيمي ح.م.، 2001 إدارة وصيانة الأراضي و المياه في الزراعات الصحراوية.دار الفكر العربي 272ص ، الطبعة 1
- شاهر م.، فاضل ق.، 1996 كفاءة استعمال اسمدة الأزوت والفسفور على نمو وانتاجية محصول القمح المروي بمياه مالحة بحوض الفرات .في إستعمالات المياه المالحة في الزراعة.أكساد، 28ص.
- عبد الجواد ج.، 1996 صلاحية المياه للري و علاقتها بالتربة و المحاصيل المروية.في إستعمالات المياه المالحة في الزراعة.أكساد، 94ص.
- عبد الجواد ج.، 1999 تدهور التربة بفعل عامل الملوحة في الوطن العربي.الدورة العربية القومية حول التوازن الملحي، المائي و الغذائي في الأراضي المروية.القاهرة، 6ص.
- عبد الجواد ج، غيبة ع.، 2000 تقدير العتبات الملحية للمحاصيل الزراعية المروية بمياه ذات نوعيات مختلفة.دورة تدريبية حول تقنيات الري في وسط ملحي.أكساد، 22ص.
- غيبة ع.، 1996 التوازن الملحي لطبقة الجذور.في إستعمالات المياه المالحة في الزراعة.أكساد، 60ص.
- مصمودي ع.، 1996 مشاكل الملوحة في الري.ملتقحول إستعمالات المياه المالحة في الزراعة. معهد الزراعة الصحراوية بسكرة -أكساد.
- زناتي ع.ا.، 2009 الإدارة الجيدة لإستخدام العناصر المغذية تقلل من التأثيرات الضارة للملوحة على النبات.الأسمدة العربية 54 ، 36-37،



ANNEXES



Annexe 1. Tolérance et rendement relatif des cultures en fonction de la salinité du sol (E.C_e) et de l'eau d'irrigation (E.C_w) (MAAS et al., 1977 in AYERS et al., 1988)

Culture	Sensibilité à la salinité	RDT des cultures			
		100%		75%	
		C.E Sol	C.E eau	C.E Sol	C.E eau
Luzerne	Modérément	2	1.3	5.4	3.6
Carthame	Tolérant				
Sorgho	Tolérant	6,80	4,50	8,40	5,60
Tournesol	Sensible				
Soja	Tolérant	5,00	3,30	6,30	4,20
Betterave Sucre	Tolérant	7,00	4,70	11,00	7,50
Canne à sucre	Modérément	1,70	1,10	5,90	4,00
Blé	Tolérant	5.7	3,80	10,00	6,90
Pomme de Terre	Sensible	1,70	1,10	3,80	2,50
Tomate	//	2,50	1,70	5,00	3,40
Poivron	//	1,50	1,00	3,30	2,20
Haricot	Sensible	1,00	0,70	2,30	1,50
Chou	Modérément	1,80	1,20	4,40	2,90
Epinard	Modérément	2,00	1,30	5,30	3,50
Oignon	Sensible	1,20	0,80	2,80	1,80
Agrume (orange)	Modérément	1,70	1.1	3.3	2.2
Olivier	Modérément				
Raisin	Sensible	1,58	1,00	4,10	2,70
Mais Fourrage	//	1,80	1,20	5,20	3,50
Plein champ	//	1,70	1,10	3,80	2,50
Arachide	//				
Coton	Tolérant				
Pastèque	Modérément				
Orge	Tolérant	8,00	5,30	13,00	8,70
Laitue	Modérément	1,30	0,90	3,20	2,10
Carotte	Sensible	1,00	0,70	2,80	1,90
Betterave rouge	Modérément	4,00	2,70	6,80	4,50
Prunier	Modérément	1.5	1	2.9	1.9
Poirier	//				
Pêcher	//	1.7	1.1	2.9	1.9
Citronnier	//				
Abricotier	//	1.6	1.1	2.6	1.8
Pommier	//				
Amandier	//	1.5	1.1	2.8	1.9
Fève	Modérément	1.5	1.1	4.2	2
Grenadier	Modérément				
Aubergine	Modérément				
Concombre	//				
Citrouille	Modérément	4.7	3.1	7.4	4.9
Avoine	//				

Annexe 2. Profondeurs d'enracinement de certains légumes (Adapté de FAO, 1990)

Superficiel (20-30 cm)	Profondeur modérée (30-50 cm)	Profond (>50 cm)
Brocoli	Haricots	Artichaut
Choux de Bruxelles	Betterave	Asperge
Choux	Carotte	Potiron
Chou-fleur	Concombre	Patate douce
Céleri	Aubergine	Tomate
Choux chinois	Cantaloup	Pastèque
Ail	Pois	
Poireau	Poivron	
Laitue	Courge	
Oignons	Navet	
Pomme de terre		
Radis		
Epinard		

Annexe 3. Profondeurs d'enracinement de certaines plantes et arbres fruitiers

(Adapté de FAO, 1990)

Plantes et arbres fruitiers	Profondeur des racines (cm)
Fraises	15-25
Avocat	120-150
Citrus	120-150
Mangue	130-180

Annexe 4. Salinité du sol (extrait aqueux 1/5) (AUBERT, 1978)

CE (ds/m) à 25°C	Degrés de salinité
CE < 0,6	Sol non salé
0,6 < CE < 1,2	Sol peu salé
1,2 < CE < 2,4	Sol Salé
2,4 < CE < 6	Sol très salé
CE > 6	Sol extrêmement salé

Annexe 5. pH du sol (extrait aqueux 1/5) (SOLTNER, 1989)

pH	Sol
6,75 < pH ≤ 7,25	Neutre
7,25 < pH ≤ 8,5	Alcalin
pH > 8,5	Très alcalin