



République Algérienne Démocratique et Populaire



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا للفلاحة

Ecole Nationale Supérieure Agronomique

École Nationale Supérieure Agronomique

Département : Génie rural

Spécialité: Science de l'eau

المدرسة الوطنية العليا للفلاحة

القسم: الهندسة الريفية

التخصص: علم المياه

Thèse

En vue de l'obtention du diplôme de Doctorat-LMD

Thème

Impact des techniques d'irrigation sous pression sur les phénomènes de salinisation des sols : cas des zones arides

Présenté par: **M. BIOUS Islem**

Soutenu publiquement le: **20/12/2023**

Directeur de thèse : CHABACA M. Nacer (Professeurs, ENSA)

Co-directeur de thèse : LARIBI Abdelkader (MCA, ENSA)

Devant le jury :

Président du jury: Hartani Tarik (Professeur, ENSA)

Examineurs :

- **DOUAOUI Abdelkader** (Professeur, Centre Universitaire de Tipaza)
- **MOUHOUCHE Brahim** (Professeur, ENSA)

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma reconnaissance à mon directeur de thèse, **Monsieur Chabaca Mohamed Nacer**, pour l'aide, son encadrement et le temps consacré pour réaliser les travaux de la thèse. Je remercie également mon co-directeur de thèse **Laribi Abdelkader** pour ses précieux conseils et son soutien.

Je remercie messieurs **Hartani Tarik** qui nous a fait l'honneur de présider le jury, **Douaoui Abdelkader** et **Mouhouche Brahim**, d'avoir consacré leurs temps pour examiner la présente thèse et être membres du jury de la soutenance.

J'exprime mes respectueux dévouements à Monsieur **Ahcene Semar**, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique (ENSA) El-Harrach pour ses précieux conseils pour la partie théorique et pratique des analyses de l'eau et du sol. **Mohamed Amine Feddal**, **Zakaria Mohammedi** et les membres du conseil scientifique du Département de Génie Rural à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique. Mes remerciements aux ex-étudiants de l'ENSA qui ont participé dans ce travail, durant les travaux de leurs projets de fin d'études : Douaibia Sabrine, Elkedia Rania, Hedjailia Salah, Moulahoum Imen, Didane Mohamed Arezki, Lebkiri Djalel et Ameer Hachani.

Je remercie également Allali Ahmed, Layeche Khaled et les enseignants de l'université d'El Oued pour m'avoir guidé durant la partie pratique de la thèse dans la vallée du Souf. Aussi Bousbiaa Chawki et sa famille pour leur accueil dans la ville d'Oued Souf.

Résumé

Dans les régions arides, telle la vallée du Souf, la salinisation des sols représente un enjeu majeur pour une agriculture durable. Nos investigations dans la zone d'études ont montré que ce phénomène est lié à l'irrigation avec une eau de mauvaise qualité, utilisant des systèmes d'irrigation sous pression sans application de la dose de lessivage ni aucune autre gestion particulière de l'irrigation. L'évaluation de la qualité de l'aquifère phréatique de la vallée du Souf pour l'irrigation est étudiée dans 36 forages dans deux zones agricoles de cette vallée, en utilisant les paramètres communs pour l'eau d'irrigation. Selon les paramètres de qualité de l'eau pour l'irrigation (Na%, MH, PS, CE) en plus des diagrammes de Riverside et de Wilcox, cet aquifère est de mauvaise qualité pour l'irrigation. La majorité des échantillons analysés montre un faible danger d'alcalinisation du sol et un faible pourcentage de magnésium. Cependant, leur salinité est très élevée pour tous les échantillons, ce qui entraîne un risque élevé de salinisation des sols. Ce niveau de salinité menace la durabilité de l'agriculture dans cette zone. L'analyse des parcelles irriguées avec l'irrigation par pivot et goutte à goutte a montré que le pivot central causait plus de dégâts, la salinité du sol augmentait jusqu'à 24,6% dans les parcelles pivot et 19% dans les parcelles goutte à goutte après trois ans de culture de la pomme de terre. Dans les parcelles pivots, les sels sont principalement concentrés dans un horizon profond de 30 à 50 cm près de la zone racinaire, en raison du débit d'infiltration élevé. Bien que les sels soient concentrés à la surface du sol dans les parcelles goutte à goutte. Ces résultats ont montré que la salinité des sols augmente rapidement dans les terres irriguées, et les autorités doivent intervenir pour éviter l'extension du phénomène aux régions voisines.

Mots clés : Salinité, Irrigation, Agriculture durable , Régions arides , Vallée du Souf

Abstract

In arid regions, such as the Souf Valley, soil salinization is a major issue for sustainable agriculture. Our investigations showed that this phenomenon is related to irrigation with poor quality water, using pressurized irrigation systems without carrying of leaching requirement or any special management of irrigation. Assessment of the quality of the Souf Valley phreatic aquifer for irrigation done in 36 boreholes in two agricultural areas in this valley, using the common parameters for irrigation water. According to water quality for irrigation parameters (Na%, MH, PS, CE) in addition to Riverside and Wilcox diagrams, this aquifer is of poor water quality for irrigation. The majority of analyzed samples shows a weak danger of soil alkalization and a low percentage of magnesium. However, their salinity is very high for all samples which results in a high risk of soil salinization, this level of salinity may threaten the sustainability of agriculture in this area. Analysis of irrigated plots with both pivot and drip irrigation showed that central pivot caused more damage, soil salinity increases up to 24,6% in pivot plots and 19% in drip plots after three years of potato cultivation. In pivot plots, salts are mostly concentrated in deep horizon 30-50 cm near to the root zone, because of high infiltration flow. Although salts are concentrated in soil surface in drip plots. These results showed that soil salinity is increasing quickly in irrigated lands, and authorities must intervene to avoid the extension of the phenomenon such as neighboring regions.

Keywords : Salinity, Irrigation , Sustainable Agriculture , Arid regions , Souf Valley

ملخص

في المناطق الجافة مثل وادي سوف, يعتبر تملح التربة قضية رئيسية للزراعة المستدامة. أظهرت تحقيقاتنا أن هذه الظاهرة مرتبطة بالري بمياه ذات نوعية رديئة , باستخدام أنظمة الري بالضغط دون استخدام لترشيح التربة أو أي إدارة خاصة للري. تم تقييم جودة الخزان الجوفي في وادي سوف للري في 36 بئراً في منطقتين زراعتين في هذا الوادي , باستخدام المعايير العالمية المشتركة لمياه الري. وفقاً لجودة المياه لمعايير الري: Na%, MH, PS, CE بالإضافة إلى مخططات ريفرسايد وويلكوكس , فإن هذا الخزان الجوفي ذو نوعية مياه رديئة للري. تظهر غالبية العينات التي تم تحليلها ضعف خطر قلونة التربة وانخفاض نسبة المغنيسيوم. ومع ذلك , فإن ملوحتها عالية جداً لجميع العينات مما يؤدي إلى ارتفاع مخاطر تملح التربة , وقد يهدد هذا المستوى من الملوحة استدامة الزراعة في هذه المنطقة. أظهر تحليل قطع الأراضي المروية بالري المحوري والري بالتنقيط أن نظام الري المحوري تسبب في مزيد من الضرر , حيث زادت ملوحة التربة ب 24,6% في الأراضي المسقية بالرش المحوري 19% في قطع الأراضي بالتنقيط بعد ثلاث سنوات من زراعة البطاطس. في التربة المروية بالمحاور , تتركز الأملاح في الغالب في الأفق العميق 30-50 سم بالقرب من الجذو , بسبب التدفق المرتفع للمياه. أما في التربة المروية بالتنقيط فتتركز الأملاح تتركز سطح التربة. أظهرت هذه النتائج أن ملوحة التربة تزداد بسرعة في الأراضي المروية , ويجب على السلطات التدخل لتجنب اتساع نطاق الظاهرة مثل المناطق المجاورة.

الكلمات المفتاحية: الملوحة , الري , الزراعة المستدامة , المناطق الجافة , الوادي

Table des matières

| | |
|---|------|
| Remerciements | ii |
| Résumé | iii |
| Liste des figures | v |
| Liste des tableaux : | vii |
| Liste des abréviations : | viii |
| Introduction | 1 |
| Chapitre 1 : | 4 |
| Synthèse Bibliographique | 4 |
| I. Les enjeux de la salinisation des sols dans le monde et en Algérie | 5 |
| I.1. Historique | 5 |
| I.2. Salinisation du sol dans le monde | 5 |
| I.3. Salinisation des sols en Algérie..... | 7 |
| I.3.1. Principales régions agricoles affectées par la salinité | 8 |
| I.3.1.1. Les périmètres irrigués de l'ouest | 8 |
| I.3.1.2. Le bassin Saharien | 9 |
| II. Relation entre l'irrigation et la salinisation des sols | 12 |
| II.1. Définition de la salinité..... | 12 |
| II.2. Origines de la salinité du sol..... | 12 |
| II.2.1. Salinité associée à l'eau souterraine | 13 |
| II.2.2. Salinité non-associée à l'eau souterraine | 13 |
| II.2.3. Salinité due à l'irrigation | 14 |
| II.3. Sols salins..... | 15 |
| II.4. Sols sodiques | 16 |
| III. Evaluation de la qualité de l'eau pour l'irrigation | 17 |
| III.1. Paramètres utilisés pour déterminer la qualité de l'eau pour l'irrigation..... | 17 |
| III.1.1. La CE | 17 |
| III.1.2. Le SAR..... | 18 |
| III.1.3. Le Résiduel Sodium Carbonates (RSC) | 19 |
| III.1.4. Toxicité spécifique des ions | 19 |
| III.2. Classification des eaux d'irrigation | 20 |
| III.2.1. Diagramme de Riverside | 20 |
| III.2.2. Standards et normes FAO | 22 |
| IV. Impacts de la salinité sur les cultures | 23 |
| IV.1. Notion du stress salin | 23 |
| IV.2. Effet de la salinité sur les activités physiologiques de la plante | 24 |
| IV.2.1. Effet hyper-osmotique (Effet non spécifique)..... | 24 |
| IV.2.2. Toxicité des ions Cl ⁻ et Na ⁺ (Effet spécifique)..... | 25 |
| IV.3. Effet de la salinité sur le rendement | 26 |
| IV.4. Effet de la salinité sur la qualité de la production..... | 27 |

| | |
|--|----|
| V. Gestion et amélioration des sols salins | 28 |
| V.1. Diagnostic | 28 |
| V.2. Méthodes hydrotechniques | 29 |
| V.2.1. Lessivage | 29 |
| V.2.1.1. Définition | 29 |
| V.2.1.2. Les besoins de lessivage | 29 |
| V.2.1.3. Rôle de la technique d'irrigation dans le lessivage | 29 |
| V.2.2. Le dessalement et la déminéralisation de l'eau d'irrigation | 30 |
| V.2.2.1. Osmose inverse | 30 |
| V.2.2.2. Nano filtration | 31 |
| V.3. Méthodes chimiques | 31 |
| V.4. Méthodes physiques | 31 |
| V.5. Phytoremédiation des sols | 31 |
| Chapitre 2 : | 33 |
| Présentation de la région d'étude | 33 |
| I. Situation géographique | 34 |
| II. Topographie | 34 |
| III. Hydrogéologie | 35 |
| IV. Climat | 36 |
| IV.1. Précipitations | 37 |
| IV.2. Températures | 37 |
| IV.3. Humidité relative | 38 |
| IV.4. Le vent | 38 |
| IV.5. Evapotranspiration potentielle | 38 |
| IV.6. Insolation | 38 |
| IV.7. Synthèse climatique | 38 |
| IV.7.1. Diagramme ombro-thermique de Gaussen | 38 |
| IV.7.2. Diagramme d'Emberger | 39 |
| V. Etat des lieux de l'Agriculture dans la Vallée du Souf | 40 |
| V.1. Systèmes agraires de la Vallée du Souf | 40 |
| V.1.1. Agriculture oasienne | 40 |
| V.1.2. Agriculture conventionnelle | 41 |
| V.1.2.1. Phoeniculture moderne | 41 |
| V.1.2.2. Cultures maraichères | 41 |
| V.2. Techniques d'irrigation dans la vallée du Souf | 42 |
| Chapitre 3 : | 43 |
| Matériels et méthodes | 43 |
| I. Démarche générale de l'étude | 44 |
| II. Méthodologie de l'enquête | 45 |

| | | |
|--|---|----|
| II.1. | Première enquête | 45 |
| II.2.1. | Volet hydrotechnique..... | 46 |
| II.2.1. | Volet agricole..... | 47 |
| III. | L'analyse de l'eau | 47 |
| III.1. | L'échantillonnage | 47 |
| III.3. | L'interprétation | 49 |
| IV. | Evolution des paramètres physico-chimiques du sol..... | 49 |
| IV.1. | Présentation de l'exploitation..... | 49 |
| V.2. | Mise en place du protocole expérimental | 51 |
| V.2.1. | Etude hydrotechnique des parcelles..... | 51 |
| V.2.1.1. | Indicateurs techniques | 51 |
| V.2.1.2. | Indicateurs hydrauliques | 51 |
| V.2.2. | Echantillonnage et analyse du sol..... | 52 |
| V.2.3. | Méthodes d'analyses | 53 |
| V.2.3.1. | Paramètres chimiques | 53 |
| V.2.3.2. | Paramètres physiques | 53 |
| V.2.4. | Méthodes d'interprétation | 54 |
| V.2.4.1. | Lecture des résultats..... | 54 |
| Chapitre 4 ;Résultats et Discussion..... | | 55 |
| I. | Etat des lieux de l'irrigation et de la salinisation des sols dans la vallée du Souf..... | 56 |
| I.1. | Introduction | 56 |
| I.2. | Etat des lieux de l'irrigation dans la vallée du Souf..... | 56 |
| I.2.1. | Les terres irriguées | 56 |
| I.2.4. | Composition des systèmes d'irrigation par aspersion dans la vallée du Souf | 63 |
| I.2.4.1. | Ouvrage de prise d'eau..... | 63 |
| IV.1.1.1. | Station de tête | 65 |
| IV.1.1.2. | Technique d'irrigation..... | 66 |
| I.2.4. | Relation entre le milieu biophysique, la qualité et la technique d'irrigation | 67 |
| I.4. | Etat des lieux de la salinisation des sols dans la vallée du Souf | 68 |
| I.4.1. | Symptômes..... | 68 |
| I.4.2. | Impact sur l'agriculture | 69 |
| I.5. | Pratiques culturales pour la lutte contre la salinisation des sols | 71 |
| I.5.1. | Travail du sol..... | 71 |
| I.5.2. | La jachère | 71 |
| I.6. | Conclusion | 72 |
| II. | Evaluation de la qualité de l'eau d'irrigation et son impact sur le sol et les cultures ... | 73 |
| II.1. | Introduction | 73 |
| II.2. | Caractéristiques piézométriques et hydrochimiques des eaux de l'aquifère | 73 |
| II.2.1. | Piézométrie | 73 |
| II.2.2. | Description sommaire des paramètres hydro-chimiques des échantillons..... | 75 |
| II.2.3. | Faciès chimique | 76 |
| II.2.4. | Le diagramme de Gibbs..... | 77 |

| | |
|---|-----|
| II.2.5. Indice de Saturation | 78 |
| II.2.6. Indices Chloro-Alcalins | 80 |
| II.3. Evaluation de la qualité de l'eau pour l'irrigation | 80 |
| II.3.1. Pourcentage du sodium (Na%) | 81 |
| II.3.2. Magnesium Hazard..... | 82 |
| II.3.3. La salinité potentielle | 82 |
| II.3.4. Conductivité Electrique | 82 |
| II.3.5. La dureté..... | 84 |
| II.3.6. Toxicité chlorique | 84 |
| II.4. Impacte de l'eau d'irrigation sur les cultures | 85 |
| II.4.1. Effets sur les feuilles..... | 85 |
| II.4.2. Effets sur le rendement..... | 85 |
| II.5. Conclusion | 86 |
| III. Evolution des paramètres physico-chimiques des sols irrigués | 88 |
| III.1. Introduction | 88 |
| III.2. Caractérisation physico-chimique du site expérimental..... | 88 |
| III.2.1. Propriétés physico-chimiques de l'eau d'irrigation..... | 88 |
| III.2.2. Etat initial du Sol..... | 89 |
| III.2.2.1. Paramètres physiques | 89 |
| III.2.2.2. Paramètres chimiques..... | 90 |
| III.2.3. Paramètres hydrotechniques des parcelles | 90 |
| III.2.3.1. Performances des systèmes d'irrigation | 90 |
| III.2.3.2. Calendrier d'irrigation | 92 |
| III.3. Evolution des paramètres physico-chimiques et chimiques du sol | 92 |
| III.3.1. Conductivité électrique | 92 |
| III.3.1.1. Evolution de la conductivité électrique du sol dans le temps | 92 |
| III.3.1.2. Evolution de la conductivité dans la zone racinaire | 94 |
| III.3.2. Le chlore | 97 |
| IV. Conclusion générale | 100 |
| Références | 103 |
| Annexes | |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1 : Carte mondiale de la salinisation des sols (Fischer et al, 2008)..... | 6 |
| Figure 2 : Répartition des sols salins au nord de l'Algérie (INSID, 2008) | 7 |
| Figure 3 : La néo-agriculture Saharienne (Khris, 2020)..... | 9 |
| Figure 4 : Accumulation des sels dans les exploitations du Sud en monoculture (Bouznad, 2009) | 10 |
| Figure 5 : Origines majeures de la salinité dans les sols (Rengasamy, 2006)..... | 13 |
| Figure 6 : Cycle Hypothétique de la salinisation des sols (Shahid et al., 2018)..... | 14 |
| Figure 7 : Diagramme de Riverside (Richads, 1954)..... | 20 |
| Figure 8 : Schéma des effets du stress salin sur la plante (Evelin et al., 2009)..... | 24 |
| Figure 9 : Situation géographique de la Vallée du Souf..... | 34 |
| Figure 10 : Coupe hydrogéologique de la section A-B (Figure 9), modifiée de Bouselsal (2016) | 36 |
| Figure 11 : Diagramme Ombro-thermique de la région d'étude | 39 |
| Figure 12 : Diagramme d'Emberger de la région d'études | 39 |
| Figure 13 : Système oasien de type Ghout dans la Vallée du Souf (FAO, 2011) | 41 |
| Figure 14 : Démarche générale de l'étude..... | 44 |
| Figure 15 : Conception de la première enquête..... | 45 |
| Figure 16 : Conception de deuxième l'enquête (partie hydrotechnique) | 46 |
| Figure 17 : Conception de deuxième l'enquête (partie hydrotechnique) | 46 |
| Figure 17 : Zones d'échantillonnage et positions des échantillons | 48 |
| Figure 18: La position et le plan de l'exploitation Messaoudi et Frères (Google Imagery, WGS 84).. | 50 |
| Figure 19 : Position des parcelles expérimentales..... | 51 |
| Figure 20 : Position des points de prélèvement du sol pour les parcelles pivot (a) et pour les parcelles goutte à goutte | 52 |
| Figure 22: Coupe transversale d'un point de prélèvement du sol | 53 |
| Figure 22 : La SAU irriguée dans la vallée du Souf (DSA, 2019)..... | 57 |
| Figure 23 : SAU irriguée des communes de la vallée du Souf pour les années 2003, 2008, 2013, 2018 (DSA, 2019) | 58 |
| Figure 24 : Surfaces irriguées par technique d'irrigation pour chaque commune (DSA,2019) | 59 |
| Figure 25 : Pourcentages des techniques d'irrigation par rapport aux surfaces arboricoles par communes (DSA, 2019)..... | 60 |
| Figure 26 : Surfaces irriguées par technique d'irrigation et par commune (DSA,2019)..... | 61 |
| Figure 27 : Pourcentages des techniques d'irrigations par rapport aux surfaces maraichères par commune (DSA, 2019)..... | 62 |
| Figure 28 : (a) forage mixte, (b) forage..... | 63 |
| Figure 29 : Schéma du forage mixte..... | 64 |
| Figure 30 : Schéma du puits-forage..... | 64 |
| Figure 31 :(a) Multi-vannes, (b) filtre à sable hydrocyclone..... | 65 |
| Figure 32 : Schéma du pivot artisanal | 66 |
| Figure 33 : Schéma de la composition du système goutte à goutte dans la vallée du Souf..... | 67 |
| Figure 34 : Les critères du choix de la technique d'irrigation par les agriculteurs | 67 |
| Figure 35 : Dépôts de sels sur les feuilles (a), sur le sol (b) et sur les parties mouillées du pivot (c) ... | 69 |
| Figure 36 : La salinisation des sols irrigués par le goutte-à-goutte (a) et par le pivot artisanal (b) | 70 |
| Figure 37 : Parcelle pivot (a) et parcelle goutte-à-goutte (b) abandonnées à cause de la salinisation des sols..... | 70 |
| Figure 38 : Schéma de la technique du sillonnaege..... | 71 |
| Figure 39 : Parcelle-pivot en jachère..... | 72 |
| Figure 40 : Niveau piézométrique de la nappe phréatique dans la zone 1 (a) et la zone 2 (b) | 74 |
| Figure 41 : Diagramme de piper pour les échantillons de la zone 1(a) et la zone 2 (b) | 76 |

| | |
|---|----|
| Figure 42 : Diagramme de Gibbs pour les échantillons de la zone 1(a) et la zone 2 (b)..... | 77 |
| Figure 43 : Indices de saturation des échantillons de la zone 1(a) et la zone 2 (b) | 79 |
| Figure 44 : Diagrammes Riverside (a et b) et Wilcox (c et d) pour la zone 1 (a, c) et la zone 2 (b, d) | 83 |
| Figure 45 : Besoins d'irrigation de la pomme de terre et les doses appliquées dans le cas du pivot et du goutte-à-goutte..... | 92 |
| Figure 46 : Evolution de la CE dans les parcelles au début et à la fin de la saison | 93 |
| Figure 47 : Les profils salins des témoins pour les campagnes C1) et C2 | 94 |
| Figure 48 : Les profils salins des parcelles-pivots pour les campagnes C1 et C2..... | 95 |
| Figure 50 : Concentration du chlore dans les parcelles étudiées pour les campagnes C1 et C2 | 97 |
| Figure 51 : Concentrations du Chlore selon les profondeurs 10 cm , 30 cm , 50 cm..... | 98 |

Liste des tableaux :

| | |
|---|----|
| Tableau 1 : Sols affectés par la salinité par continents (UNEP 1992 ; FAO-ITPS-GSP 2015)..... | 7 |
| Table 2 : Les superficies affectées par la salinité dans quelques périmètres de l'Ouest du pays (ONID (ex AGID) 2003) | 8 |
| Tableau 3 : La salinisation secondaire dans les zones irriguées par pays (Shahid et al.,2018)..... | 15 |
| Tableau 4 :: Classification des sols selon la conductivité électrique..... | 16 |
| Tableau 5 : La classification des sols sodiques selon le PSE..... | 17 |
| Table 6 : La classification des eaux selon la CE et le TSS (Daoud et Halitim, 1994) | 18 |
| Tableau 7 : La Classification des sols selon le SAR (Richard, 1954)..... | 18 |
| Table 8 : La Classification des eaux selon l'indice RSC (Siddiqui, 2005)..... | 19 |
| Tableau 9 : Classification des eaux selon la concentration du chlore (Maas, 1990) | 20 |
| Tableau 10 : Standards de l'FAO pour l'interprétation de la qualité de l'eau pour l'irrigation | 22 |
| Tableau 11 : Les normes de la FAO pour l'évaluation de la qualité de l'eau en agriculture | 23 |
| Table 12 : Classification des cultures selon la résistance à la salinité totale du sol (EC _e) | 24 |
| Tableau 13 : La tolérance des cultures aux sodium échangeable dans les conditions non-salines..... | 25 |
| Tableau 14 : La susceptibilité des cultures aux blessures foliaires pour l'irrigation par aspersion..... | 26 |
| Tableau 15 : La tolérance aux sels des cultures (Maas et Grattan, 1999) | 27 |
| Tableau 16 : Techniques pour l'amélioration des sols salins et sodiques | 28 |
| Tableau 17 : Quantité de sels accumulée par quelques plantes halophytes..... | 32 |
| Tableau 18 :Cordonnées de la station météorologique de Guemar..... | 36 |
| Tableau 19 : Répartition mensuelle des précipitations durant la période 1990-2015..... | 37 |
| Table 20 : Surfaces et productions des principales cultures maraichères dans la wilaya d'El Oued | 42 |
| Tableau 21 : Population d'agriculteurs concernés par la deuxième enquête..... | 47 |
| Tableau 22 : Fiche technique de l'exploitation Messaoud | 50 |
| Tableau 23 : Sources d'eau pour l'agriculture dans la Vallée du Souf | 59 |
| Table 24 : Paramètres statistiques des analyses physico-chimiques | 75 |
| Tableau 25 : Minimum, Maximum, Moyenne et coefficient de variation des indices de saturation | 78 |
| Tableau 26 : Classification et paramètres descriptifs des indices CAI-1 et CAI-2 | 80 |
| Table 27 : Classification de l'eau d'irrigation..... | 81 |
| Table 28 : Tolérance des cultures à la salinité (Maas et Grattan, 1999)..... | 86 |
| Tableau 29 : Paramètres physico-chimiques des Forage 1 et Forage 2..... | 88 |
| Tableau 30 : Valeurs des indices de saturations des différents minéraux | 89 |
| Tableau 31 : Paramètres physiques des témoins | 89 |
| Table 32 : Paramètres chimiques décrivant l'état initial du sol..... | 90 |
| Table 33 : Paramètres hydrotechniques des parcelles-pivot et parcelles goutte à goutte | 91 |

Liste des abréviations :

ADE : Algérienne des Eaux
AEP : Alimentation en Eau Potable
AGID : Agence Nationale de la Gestion des Infrastructures Hydrauliques pour l'Irrigation et le Drainage
ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques
APFA : Accession à la propriété Financière Agricole
AW : Besoins Minimum en eau de lessivage
BNEDER : Bureau National des Etudes pour le Développement Rural
CAI : Chloro-alkaline Indice
CAPER : Causse d'Accession à la Propriété et à l'Exploitation Rurale
CE : Conductivité Electrique
CEC: Capacité d'Echange Cationique
CI : Continental Intercalaire
CRSTRA : Centre de Recherche Scientifique et Technique des Régions Sahariennes
CT : Complexe Terminal
CU : Coefficient d'uniformité
CV : Cheval Vapeur
Da : Densité apparente
Dr : Densité réelle
DSA : Direction des Services Agricoles
EC_{1/5} : Conductivité électrique du sol mesurée par l'extrait dilué 1/5
EC_e : Conductivité électrique du sol mesurée par la méthode de la pâte saturée
EC_{iw} : Salinité de l'eau d'irrigation
EC_w : Conductivité Electrique de l'Eau
EC_x : Conductivité Electrique de l'Extrait Aqueux
ENAE0 : Entreprise Nationale de Géophysique
ET : Evapotranspiration
ETp : Evapotranspiration potentielle
FAO: Food and Agriculture Organization
GAG : Goutte à goutte
GCA : Générale des Concessions Agricole
GPS : Global Positioning System
GSP: Global Soil Partnership
H% : Humidité de l'air
INSID: Institut National des Sols, de l'Irrigation et du Drainage
ITPS: International Technical Panel on Soils
JC : Jésus Christ
LR : Leaching Ratio
meq : Milliéquivalent
MH% : Magnesium Hasard
Mha : Million d'hectares
MO : Matière Organique
MRE : Ministère des Ressources en Eau
Na% : Sodium Hazard
ONM : Office National de Météorologie
ONS : Office National des Statistiques
OSS : Observatoire du Sahara et du Sahel
P : Précipitations
P% : Porosité

pH: potential Hydrogen
PHD : Polycarbonates à Haute Densité
PNDA : Plan National de Développement Agricole
ppm : partie par million
PS : Potential Salinity
PSE : Pourcentage de Sodium Echangeable
Q : Débit
qx : Quintaux
RSC: Residual Sodium Carbonate
SAR : Sodium Adsorption Ratio
SAU : Surface Agricole Utile
SI : Saturation Index
SIPAM : Système Ingénierie du Patrimoine Agricole Mondial
TDS : Total Dissolved Solids
TH : Total Hardness
 T_{\max} : Température maximale
 T_{\min} : Température minimale
TSS: Total Suspended Solids
UNEP : United Nations Environment Programme
USDA: United States Department of Agriculture
USSL: United States Salinity Laboratory
 V_{in} : Vitesse d'infiltration
 V_v : Vitesse du vent

Introduction

Dans le monde, 30 % des surfaces irriguées sont alimentées par l'eau souterraine (Lejars et Courilleau, 2015). Cette ressource est considérée comme une option face au réchauffement climatique dans les pays à climat humide et subhumide, cependant elle est indispensable pour l'agriculture dans les pays arides et semi-arides. Dans les régions arides tel le Sahara algérien, l'eau souterraine représente la majorité, parfois l'intégralité de l'eau mobilisée pour l'irrigation, en raison de l'hyper salinité des eaux de surface qui sont représentés par les exutoires endoréiques appelées Chotts.

L'exploitation des eaux souterraines dans de Sahara algérien fut la composante constitutive de l'agriculture Oasienne par des systèmes d'irrigation ingénieux tel : la foggara dans la région du Touat et le Ghoutt dans la vallée du Souf (Daoudi et Lejars, 2017). Cependant la métamorphose agricole de cette région qui est passée d'une agriculture Oasienne vivrière à une agriculture de marché a provoqué un changement radical dans le secteur de l'hydraulique agricole. L'extension de l'agriculture intensive a été accompagnée par un remplacement des systèmes ingénieux d'irrigation par les systèmes modernes basés sur le pompage de l'eau souterraine. Cependant cela a provoqué plusieurs phénomènes écologiques tels : le bouleversement des niveaux piézométriques des nappes et la salinisation des sols agricoles (Guendouz, 2006).

L'eau souterraine est associée dans certains cas à une salinité élevée et représente la cause principale de la salinisation des sols dans les périmètres irrigués. Ce phénomène est fréquent dans les régions arides et semi arides où le dépôt des sels dans les couches superficielles du sol est intensifié par la rareté des pluies et par la forte évapotranspiration (Qadir et al. 2014). D'autres facteurs anthropiques s'y ajoutent dans le cas de l'agriculture intensive où la gestion des ressources naturelles à court terme sans privilégier la durabilité de l'agriculture (Shahid et al., 2013). L'intensité du phénomène n'est pas liée aux phénomènes naturels seuls, mais à plusieurs facteurs techniques liés principalement à la gestion de l'irrigation.

Plusieurs recherches mentionnent la relation significative entre la salinité du sol et le rendement des cultures avec la technique d'irrigation employée (Nagaz et al., 2012, Heng et al., 2018). Le système d'irrigation est le maître de la relation eau-sol par le contrôle du régime d'écoulement de l'eau dans le sol. Pour cela, le choix de la technique d'irrigation le milieu aride est crucial afin de garantir une agriculture durable et une production satisfaisante.

Actuellement, la salinisation secondaire des sols est considérée comme la première cause de la dégradation des sols agricoles. On annonce 1030 Mha de sols affectés dans le monde et qui engendrent une perte équivalente à 27 milliards de dollars (FAO-ITPS-GSP, 2015). L'Algérie est considérée comme l'un des pays les plus affectés par ce phénomène, où près de 3,2 Mha sont affectés et qui sont principalement localisés dans les régions Sahariennes et intérieures du pays (Szabolcs, 1994). Selon l'OSS (2008), 4300 ha/année sont endommagés dans le Sahara algérien à cause de ce phénomène. Dans ces régions plusieurs facteurs naturels et anthropiques sont impliqués dont les plus importants sont : la salinité de l'eau souterraine, la gestion empirique de l'irrigation ainsi que l'émergence de l'agriculture intensive depuis l'application

des programmes étatiques de la mise en valeur des régions sahariennes (Daoud et Halitim 1994 ; Djili et al., 2003 ; Daoudi et Lejars, 2016 ; Semar et al., 2019).

La vallée du Souf située au Sahara Algérien est l'une des régions agricoles les plus importantes du pays, plus de 60,000 ha sont cultivés et irrigués avec les eaux de la nappe phréatique de cette vallée. Actuellement elle est considérée parmi les régions les plus productrices au niveau national, elle couvre seule 30% de la production nationale en pomme de terre. Dans cette région, l'agriculture a subsisté pendant des siècles grâce au système du Ghout, cependant ce dernier est de plus en plus délaissé devant les systèmes d'irrigation sous pression, basés sur le pompage de l'eau souterraine. La rentabilité de ce dernier mode agricole à court terme et l'encouragement de l'état par les programmes nationaux de développement agricole à donner avantage à l'extension exponentielle des systèmes d'irrigation sous pression dans la vallée du Souf. Les surfaces couvertes par cette dernière sont passées de quelques centaines d'hectares au début des années 90 à des dizaines de milliers d'hectares. Cette extension de l'agriculture intensive basée sur le pompage a engendré d'importants phénomènes écologiques telle : la remontée des eaux de la nappe phréatique et la salinisation des sols agricoles. Par conséquent, Sur près de 9000 ha couverts par les Ghout, il n'y a que 1500 ha qui sont réellement cultivés.

Selon Khechana et Derradji (2011), l'eau souterraine dans cette vallée a une forte salinité (CE entre 2700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 17 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Cela peut engendrer un effet immédiat sur le rendement des cultures et menace la durabilité de l'agriculture dans cette région à moyen et à long terme, comme le cas des régions voisines situées dans le même contexte pédoclimatique: la vallée d'oued Righ et les oasis de Tozeur en Tunisie (Askri et al., 2011 ; Boudibi et al., 2021).

Malgré l'importance de la vallée pour la production nationale, la qualité de l'eau pour l'irrigation et son effet sur le sol restent modestement étudiés. Dans ces conditions, l'étude des propriétés chimiques de l'eau d'irrigation et la caractérisation de l'évolution de la salinité du sol constituera une ligne directrice pour la gestion durable de l'irrigation, surtout que le pays traverse une période de sécheresse où les périmètres irrigués doivent être préservés afin de garantir une production continue et régulière.

La carence des bases de données et des études relatives à ce sujet, dans les périmètres irrigués de la vallée du Souf nous engage à répondre à trois principales questions : quels sont les causes de la salinisation des sols agricoles dans la vallée du Souf? Comment se développe-t-elle sous les techniques d'irrigation sous pression et quel serait son impact sur le sol et les cultures ?

Afin de répondre à cette problématique, on doit entretenir les trois composantes du phénomène la salinisation des sols agricoles : l'eau d'irrigation, le sol et les techniques d'irrigation. Pour cela nous avons tracé les objectifs suivants :

- Réaliser l'état des lieux du phénomène de la salinisation des sols, sa localisation géographique ses causes et ses conséquences
- Evaluer la qualité de l'eau souterraine de la nappe phréatique du Souf dans les périmètres irrigués et apprécier les risques de la salinisation secondaire des sols.

- Caractériser l'évolution de la salinité d'un sol irrigué avec les techniques d'irrigations sous pression : pivot artisanal et goutte à goutte.

Afin de répondre aux objectifs susmentionnés et pour présenter les résultats de notre étude, nous avons organisé notre thèse selon le plan suivant :

- Synthèse bibliographique : Ce chapitre présente le support bibliographique utilisé pour le développement et le traitement de la problématique.
- Présentation de la région d'études : Ce chapitre affiche les informations, géographiques, climatiques, pédologiques et le potentiel agricole de la vallée du Souf.
- Matériels et méthodes : Ce chapitre de la thèse on présente le matériel utilisé et les différentes méthodes suivies pour l'acquisition des informations, l'échantillonnage, l'analyse et le traitement des résultats.
- Résultats et discussions : Ce chapitre est organisé en trois volets dans lesquels nous allons étudier la relation entre l'utilisation des techniques d'irrigation sous pression et les problèmes de salinisation des sols, évaluer la qualité hydrochimique de l'eau d'irrigation et caractériser l'évolution des propriétés chimiques du sol avec deux techniques d'irrigation (le pivot artisanal et le goutte-à-goutte)
- Conclusion : A la fin, nous confrontons nos résultats aux prospections de l'agriculture saharienne et ses enjeux.

Chapitre 1 :

Synthèse Bibliographique

I. Les enjeux de la salinisation des sols dans le monde et en Algérie

I.1. Historique

Durant des siècles, l'humanité et la salinité ont vécu l'une à côté de l'autre, depuis les premières civilisations en Mésopotamie (Iraq actuellement), dans les vallées Indus en Inde et au Pakistan, dans la vallée de Viru au Pérou (Shahid et al., 2018). Il a été rapporté par Wiley (1953), que « Plusieurs sociétés basées sur l'agriculture irriguée ont échoué ». L'accumulation des sels dans les sols agricoles est très ancienne, elle est apparue il y'a 6000 ans dans les terres Sumériennes considérées comme les premières terres irriguées de l'histoire (Pitman et Läuchli, 2002).

L'accumulation des sels, dans les sols agricoles, sur les berges des fleuves, a causé une réduction de la fertilité des sols en Mésopotamie, sur plusieurs épisodes entre 2400 et 900 avant JC. Les rendements du blé dans ces terres ont été réduits à 1/6 du rendement initial. Cette culture très importante au début, a cédé la majorité de ses surfaces à la culture de l'orge qui tolère plus les sols chargés en sels (Jacobson et Adam, 1958).

Parallèlement à la croissance démographique, les besoins alimentaires augmentent. Alors, les surfaces irriguées surtout dans les pays arides et semi-arides sont passées de 8 Mha en 1800 à 50 Mha en 1900 (Li, 2009). Durant le 20^{ème} siècle, l'agriculture intensive gourmande en eau prend place dans la majorité des terres irriguées. Ce type d'agriculture est un contributeur majeur de la salinisation. Ceci a favorisé la réapparition du même épisode de la Mésopotamie dans plusieurs régions du monde (Pitman et Läuchli, 2002).

I.2. Salinisation du sol dans le monde

La salinisation des sols est connue depuis des siècles comme un facteur limitant de l'agriculture irriguée et elle prend de plus en plus d'ampleur, parallèlement à la croissance démographique mondiale et l'extension de l'agriculture irriguée. Actuellement, ce phénomène est considéré comme la cause majeure de la dégradation des sols et qui engendrent l'équivalent de 27,3 milliards de dollars de production perdue (Shahid et Abdelfattah, 2013).

Les surfaces affectées par la salinisation sont passées de 955 Mha (Szabolcs, 1989), jusqu'à 1030 Mha (FAO-ITPS-GSP, 2015), et 1069 en 2016 (Ivushkin, 2019) et on prévoit que 50% des terres arables dans le monde seront affectés par ce problème en 2050 (Wang et al. 2003). Ces statistiques incluent 100 pays et prennent en considération les sols où la CE dépasse 4 μ S/cm ainsi que les sols sodiques où le PSE dépasse 60 %.

La majorité des sols affectés par ce phénomène sont localisés dans les régions arides et semi arides, où la qualité de l'eau pour l'irrigation est médiocre et les précipitations sont faibles pour effectuer un lessivage des sels. Aussi, dans les pays pauvres qui sont en phase de développement, à cause de l'intensification de

l'agriculture pour du bénéfice à court terme et à cause de la mauvaise gestion de l'irrigation (Qadir et al, 2014 ; Ghassemi et al. 1995).

D'après la figure 1 (Fisher et al, 2008) et le tableau 1 (UNEP 1992 ; FAO-ITPS-GSP 2015) qui présentent les sols touchés par la salinisation, on observe que ce phénomène est rencontré sur les 6 continents. Mais il est plus intense dans l'Est et le centre de l'Asie (Le proche et le moyen orient, péninsule arabe, le nord de la Chine et l'Inde, le Pakistan), les régions arides et semi arides de l'Afrique (Le nord-Afrique et le Sahel, la Corne de l'Afrique, les cotes de la Namibie et le Sud de l'Afrique), Le sud de l'Australie, le Sud-Est des Etats-Unis, le Mexique, l'Argentine ainsi que le nord-est de l'Espagne.

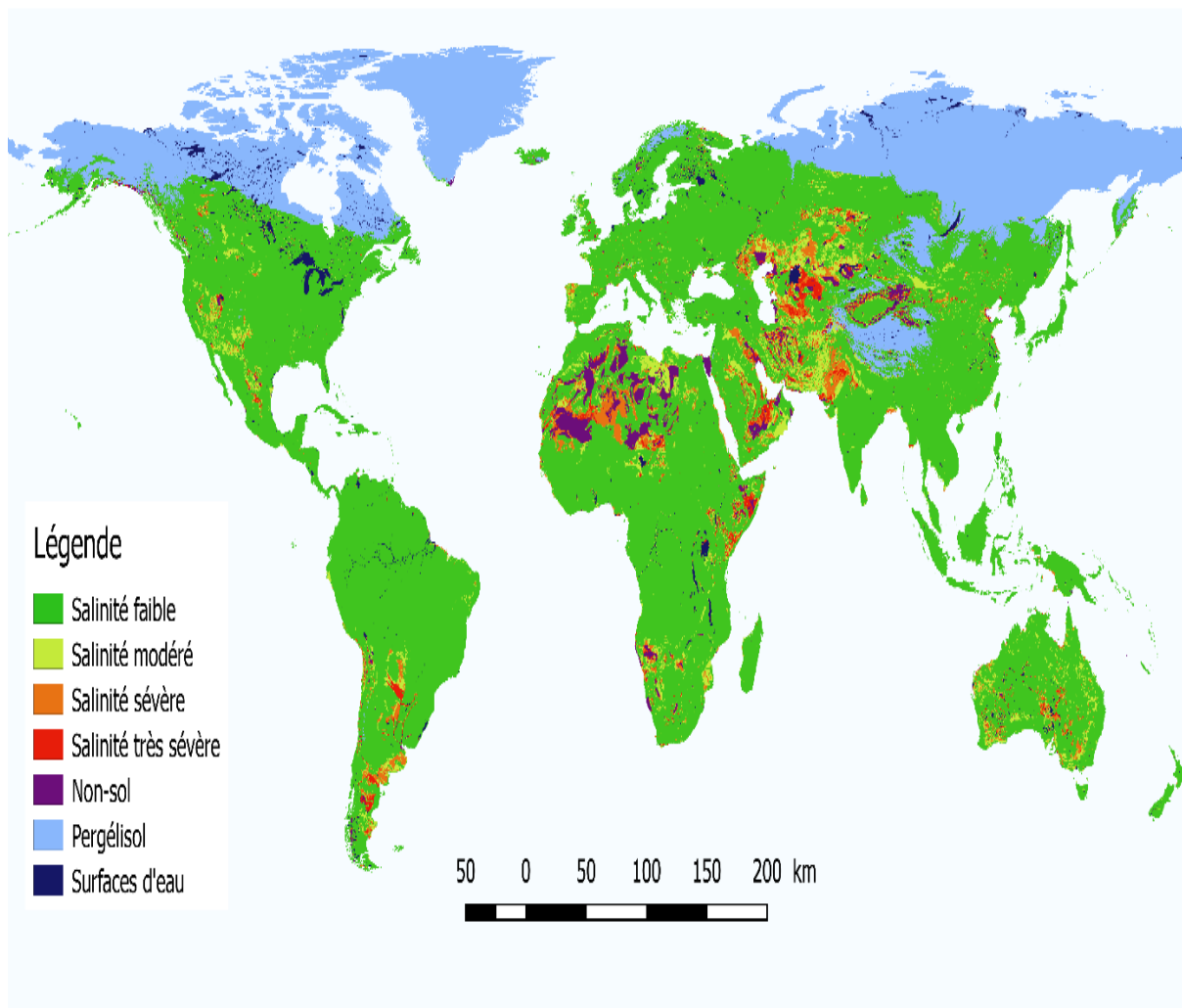


Figure 1 : Carte mondiale de la salinisation des sols (Fischer et al, 2008)

Le tableau 1 montre la répartition des sols affectés par la salinisation par continent. Les sols salins sont localisés principalement en Afrique, Asie et Amérique du Sud. Tandis que les sols sodiques sont localisés majoritairement dans le complexe Australasien, suivie par la partie centrale et nordique de l'Asie. Les régions les moins touchées par le phénomène sont localisées au Nord de la planète (Europe, Amérique du Nord) ainsi que les pays équatoriaux.

Tableau 1 : Sols affectés par la salinité par continents (UNEP 1992 ; FAO-ITPS-GSP 2015)

| Continents | Sols affectés par la salinisation (Mha) | | | Pourcentage (%) |
|---------------------------|--|---------------|-------|-----------------|
| | Sols salins | Sols sodiques | Total | |
| Afrique | 122,9 | 86,7 | 209,6 | 20 |
| Australie-Sud Asie | 17,6 | 340 | 357,6 | 35 |
| Mexique/Amérique centrale | 2 | – | 2 | 0,2 |
| Amérique du Nord | 6,2 | 9,6 | 15,8 | 1,4 |
| Nord et Centre de l'Asie | 91,5 | 120,2 | 211,7 | 21 |
| Amérique du Sud | 69,5 | 59,8 | 129,3 | 12,5 |
| Sud de l'Asie | 82,3 | 1,8 | 84,1 | 8 |
| Sud-Est de l'Asie | 20 | – | 20 | 2 |

I.3. Salinisation des sols en Algérie

L'Algérie est située au nord de l'Afrique, ce continent où plus de 200 Mha sont affectés par la salinité (Tableau 1). Ce pays est aride sur 95% de son territoire (Berkal, 2006) et occupé par le Sahara sur 2 Mkm² (85% de son territoire) (Mediouni, 1997). Selon Szabolcs (1989) l'Algérie figure dans la liste des pays les plus affectés par la salinité, avec 3,2 Mha qui subissent des degrés sévères de salinisation. La figure 2 présente les régions affectées par ce problème au Nord de l'Algérie et qui sont inventoriées par INSID (2008).

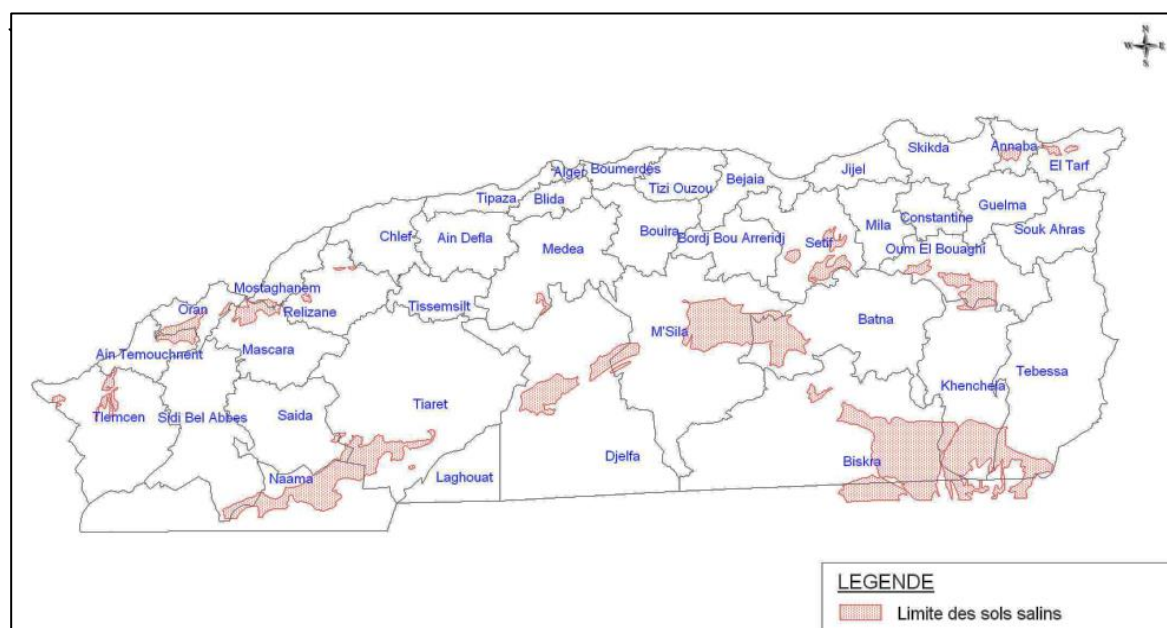


Figure 2 : Répartition des sols salins au nord de l'Algérie (INSID, 2008)

Parmi les régions les plus touchées par la salinité en Algérie on cite : Les périmètres de l'Ouest (Mina, Cheliff, Habra Sig, Maghnia), les hautes plaines de l'Est (Constantine, Sétif, Bordj Bou Arreridj, Oum El Bouagui), les abords des Chotts et de Sebkhas (Chott Ech Chergui, Chott Gharbi, Chott Hodna, Chott Melghir, Sebkha d'Oran, de Benziane, Zemmoul, Zahrez Gharbi et Chergui, etc..) et le grand bassin Saharien (dans les Oasis, le long des oueds, les périmètres de la mise en valeur) (INSID, 2008).

I.3.1. Principales régions agricoles affectées par la salinité

I.3.1.1. Les périmètres irrigués de l'ouest

L'ouest Algérien est l'une des régions connues par le phénomène de la salinisation des sols. L'endoréisme de certains bassins versants joue un rôle assez important dans le phénomène de salinisation (accumulation des sels dans les sebkhas et les parties basses du bassin), ceci est accentué par la géologie salifère, le climat aride et semi-aride qui favorisent l'évaporation de l'eau et le dépôt des sels solubles dans les couches superficielles du sol (INSID, 2008). Le tableau 2 et la figure 2 affichent les surfaces affectées dans les périmètres irrigués de l'ouest Algérien, où la salinisation des sols représente un obstacle pour l'agriculture irriguée.

Tableau 2 : Les superficies affectées par la salinité dans quelques périmètres de l'Ouest du pays (ONID (ex AGID) 2003)

| Périmètres irrigués | Superficies irrigables | Superficies affectées | Pourcentage % |
|---------------------|------------------------|-----------------------|---------------|
| Haut Cheliff | 20 200 | 6 400 | 32 |
| Moyen Cheliff | 21 800 | 8 700 | 40 |
| Bas Cheliff | 22 500 | 15 000 | 67 |
| Mina | 9 600 | 4 190 | 44 |
| Habra | 19 600 | 8 100 | 41 |
| Sig | 8 600 | 3 200 | 37 |

La plaine du bas Cheliff est la plaine la plus touchée par la salinité dans le nord de l'Algérie (INSID, 2008). Selon Douaoui et al. (2006), 22% des sols agricoles du bas Cheliff sont moyennement salés (CE entre 4 dS/m et 8 dS/m), 30% sont salés (CE entre 8 dS/m et 16 dS/m) et 32% sont très salés (CE >16 dS/m).

Cette salinisation intense de la plaine est due à l'absence d'une politique d'aménagement du bassin, qui malgré son potentiel hydrologique important, seules les eaux souterraines sont accessibles à l'agriculture durant les années précédentes marquées par un fort stress hydrique. Les eaux souterraines sont chargées en sels et qui dégradent intensivement les sols lourds de la région (Sols Argileux) (Douaoui et al., 2006).

Une étude cartographique de l'évolution de la salinité des sols dans la même plaine entre 1975 et 2006 a montré qu'il y'a une extension spatiale importante avec une intensification de la salinité des sols surtout dans la partie ouest de la plaine (Rata, 2015).

I.3.1.2. Le bassin Saharien

L'agriculture Saharienne a connu une métamorphose depuis la découverte de son grand potentiel hydrique (Eaux souterraines). Un passage remarquable suivi par des programmes étatiques afin de promouvoir l'agriculture saharienne font passer celle-ci d'une agriculture oasienne durable à une agriculture intensive dominée par la céréaliculture sous pivot, des palmeraies en monoculture ainsi que par les cultures maraichères serres tunnels (Daoudi et Lejars, 2016). La figure 3 présente une exploitation dans le Sahara algérien, basée sur l'agriculture intensive.



Figure 3 : La néo-agriculture saharienne (Khris, 2020)

Cependant, cette agriculture intensive a provoqué un déséquilibre piézométrique des nappes souterraines. Marqué par la remontée des nappes phréatiques dans certaines régions basses comme la vallée du Souf et par le tarissement d'autres nappes comme le cas de la région des Zibans et des oasis du Gourara. De plus, l'irrigation avec les eaux souterraines diversement minéralisées a entraîné une extension de la salure du sol dans plusieurs périmètres du Sud algérien notamment ; les périmètres céréaliers de Gassi Touil et d'Adrar, la vallée d'Oued Righ, la région des Zibans et la vallée du Souf (Daoud et Halitim, 1994 ; Ziza et al., 2012; Remini et Souaci, 2019; Abdenmour et al., 2020).



Figure 4 : Accumulation des sels dans les exploitations du Sud en monoculture (Bouznad, 2009)

Depuis les années 80, l'agriculture dans la région des Zibans (Wilaya de Biskra) ne cesse de prendre de l'ampleur, suite aux programmes étatiques de mise en valeur des terres et à l'émergence d'une nouvelle agriculture décrite par Daoudi et Lejars (2016) comme « Néo-agriculture Saharienne ».

L'origine de la salinisation des sols dans cette région est l'utilisation des eaux souterraines (CE Supérieure à 3 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$), la non utilisation du drainage ainsi que l'utilisation excessive des inputs chimiques surtout dans le maraichage. Dans la commune de Ghrouss qui couvre 3,2% des sols irrigués de la wilaya de Biskra, 88% des sols sont salés (Abdenmour et al., 2019).

- **La vallée d'Oued Righ**

La vallée d'Oued Righ est l'une des régions les plus anciennement cultivées dans le Sahara. Elle regroupe 50 Oasis hydrologiquement connectées à un canal de drainage ayant une longueur de 150 km et qui déverse les eaux de drainage des oasis vers chott Merouane au nord de la vallée (Koull et al, 2013).

Actuellement l'activité agricole dans cette vallée est bouleversée par le phénomène de salinisation des sols. Cette vallée est passée d'une agriculture oasisienne à étages à une monoculture du palmier dattier à cause de la salinisation des couches superficielles des sols et qui dépassent la tolérance en sels des cultures annuelles préalablement pratiquées entre les rangs des palmiers. Le palmier dattier connaît aussi un déclin de production très important dans les régions basses de la vallée.

Cette salinisation des sols est due principalement à l'eau d'irrigation fortement salée (4900 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 13440 $\mu\text{S}/\text{cm}$), d'autres facteurs s'y ajoutent comme la détérioration du réseau de drainage et le non-respect de la dose de lessivage (Belksier, 2017).

Ainsi, Oued Righ qui est le seul espace saharien qui a suscité l'intérêt de la colonisation agraire européenne se retrouve empêtré dans les problèmes d'assainissement et de salinité (Côte, 2002) .

- **Les périmètres céréaliers de Gassi Touil et Adrar**

Les céréales ont toujours été pratiquées dans l'oasis, entre les palmiers, traditionnellement et en petite quantité pour couvrir une partie des besoins. Face à la croissance démographique et la demande ascendante en cet aliment de base et la découverte du potentiel hydrogéologique du Sahara et l'avancement de la mécanisation agricole, l'Algérie s'est inspirée depuis le début des années quatre-vingt du modèle Californien (Pratiqué aussi en Arabie Saoudite) qui consiste à la pratique de la grande céréaliculture dans les régions arides irriguées par pivots et rampes mobiles (Cote, 2002).

Subventionnés par l'Etat dans le cadre de la concession, des investisseurs et commerçants venant parfois du Nord du pays, bénéficient de quelques dizaines à centaines d'hectares et soutenus par des crédits bancaires, tentent cette nouvelle agriculture saharienne qui est menacée par sa non-durabilité et sa non-subsistance (Daoudi et Lejars, 2016 ; Djili et al., 2003)

Dans la région d'Adrar, l'étude menée par Ziza et al. (2015) montre que la salinité dans l'horizon de surface augmente continuellement avec les années d'irrigation et dépasse le seuil de tolérance du blé dur après 4 années d'irrigation, la CE dans cet horizon passe de 2 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 12 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dans la même période (4 campagnes d'irrigation). La salinité constitue donc un des facteurs responsables de la diminution du rendement du blé dans la région d'Adrar où existent des surfaces importantes dédiées à la céréaliculture.

Des essais dans la région de Gassi Touil ont portés sur l'influence de la salinité de l'eau d'irrigation sur le rendement du blé dur et montrent que le rendement diminue de plus de 50% quand la concentration de NaCl est de 2 g/l et devient non-rentable si celle-ci atteint 4 g/l. Malgré la grande perméabilité des sols sableux de cette région, la salinité de la couche superficielle a été multipliée par 6 après uniquement 5 campagnes d'irrigation, ce qui provoque des baisses importantes du rendement du blé dur (Daoud et Halitim, 1994).

- **La vallée du Souf**

La vallée du Souf située dans l'Erg oriental est l'une des régions les plus productrices en Algérie. L'agriculture dans cette région est passée d'une agriculture oasisienne traditionnelle pratiquée dans des cuvettes appelées « Ghoutt » ayant des surfaces moyennes d'un demi hectare, à une agriculture irriguée basée sur les cultures maraichères et la céréaliculture (Ouldrebai et al., 2017). Cependant cette extension des surfaces irriguées qui dépassent 90 000 ha n'a pas été sans conséquences sur l'environnement (DSA, 2018).

Depuis la fin des années quatre-vingt et après la réalisation de plusieurs forages exploitant excessivement les nappes profondes CI (Continental Intercalaire) et CT

(Complexe Terminal) pour l'irrigation et l'AEP (Adduction d'Eau potable), le niveau de la nappe phréatique ne cesse d'augmenter et les zones hydromorphes fortement salées s'élargissent et contaminent les zones agricoles. Ainsi, 1 000 Ghoutts se retrouvent submergés et occupés par les plantes halophytes tandis que 150 000 palmiers sont morts par asphyxie. La zone touchée par ce problème s'étale sur 3 000 km² et englobe 18 communes de la wilaya d'El Oued. Pour y remédier, l'utilisation des eaux profondes pour l'irrigation a été limitée et remplacée par la nappe phréatique (Bouselsal et Belksier, 2018 ; Bouselsal et Kherici, 2014).

Actuellement la nappe phréatique de la vallée du Souf est exploitée avec plus de 30 000 puits et constitue la source d'irrigation pour la quasi-totalité des surfaces agricoles de la vallée (M.R.E., 2017, D.S.A, 2018).

Du fait que les eaux de la nappe phréatique soient très chargées en sels et inutilisables pour l'agriculture (CE entre 2700 µS/cm et 17 000 µS/cm) (Khechana et Derradji, 2011), les concentrations des ions toxiques comme le Chlore dépassent largement les normes de l'eau d'irrigation. L'irrigation avec les eaux de cette qualité favorisent le dépôt des sels et contribuent à la salinisation des sols (Ayers et Westcot, 1994).

II. Relation entre l'irrigation et la salinisation des sols

II.1. Définition de la salinité

La salinité d'une eau ou d'un sol est la mesure de la concentration de la somme de tous les sels solubles dans la solution (un échantillon d'eau ou une solution du sol), elle est généralement exprimée en CE, ou par la somme des concentrations des sels solubles (Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Cl⁻, SO₄²⁺, HCO₃⁻, CO₃²⁻, NO₃⁻) appelée TDS et exprimée en g/l, mg/l ou en ppm (Zaman et al., 2018).

La mesure de la conductivité électrique d'une eau, s'effectue directement avec un conductimètre ou un multi-paramètres, tandis que celle du sol est mesurée sur un extrait à pâte saturée ou sur un extrait aqueux d'un échantillon du sol à différents rapports : 1/1 ; 1 ; 2,5 ; 1/5...etc (l'extrait aqueux est plus utilisé pour les sols légers).

La conductivité électrique de l'eau est désignée par «EC_w» celle d'un sol mesuré par la méthode de la pâte saturée est désigné par «EC_e», par contre celle effectuée sur un extrait aqueux est désignée par «EC_x» où x est le rapport de dilution (sol/eau) utilisé pour la préparation de l'extrait aqueux (Richards, 1954).

II.2. Origines de la salinité du sol

La source majeure de la salinité dans les milieux naturels est la dissolution des roches sous l'effet de la pluie et les écoulements hydrologiques et hydrogéologiques. Ceci est effectué par le biais du processus de l'érosion chimique qui implique : l'hydrolyse, l'hydratation, la dissolution, l'oxydation et la carbonatation (Richards, 1954).

La pluie et le transport éolien sont aussi des facteurs importants de la migration et déposition des particules d'un milieu à un autre. Dans les milieux agricoles, la

principale source de la salinité est l'eau d'irrigation. Selon la figure 5, il existe trois origines majeures de la salinité au niveau du sol agricole ; deux origines naturelles et une origine anthropique due à l'irrigation (Rengasamy, 2006).

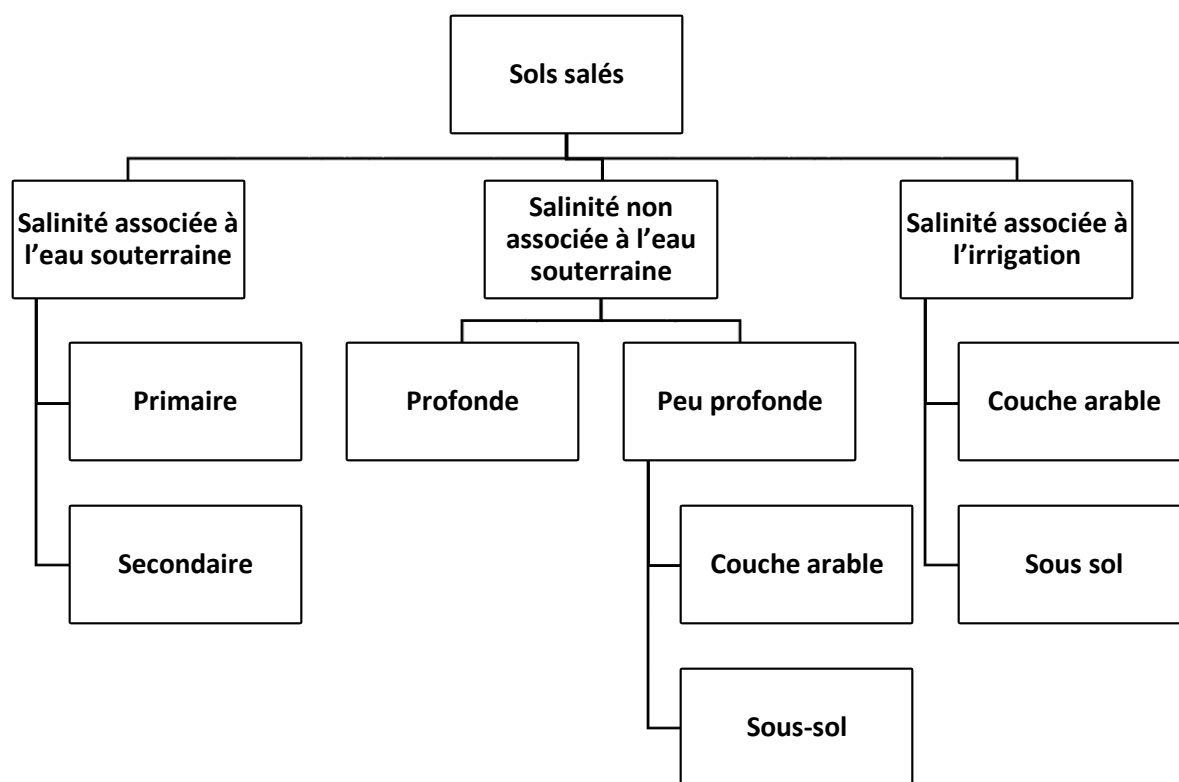


Figure 5 : Origines majeures de la salinité dans les sols (Rengasamy, 2006)

II.2.1. Salinité associée à l'eau souterraine

La salinité associée à l'eau souterraine dans les zones hydromorphes où la zone saturée continue jusqu'à la surface du sol. Le transport des sels dissouts de la nappe phréatique à la surface du sol se fait par les flux ascendants de l'eau provoqués par l'évaporation ou par l'évapotranspiration (remontée capillaire). Ce cas est fréquent dans les nappes phréatiques peu profondes. L'apport des sels est plus important quand la profondeur de la nappe est inférieure à 1,5 m, d'autres facteurs hydro pédologiques s'y ajoutent comme la perméabilité et la texture du sol (Rengasamy, 2006).

La salinité des nappes peu profondes affecte souvent la zone racinaire, les fluctuations du niveau piézométrique saturent les couches superficielles du sol qui se charge en sels après son dessèchement. La remontée capillaire due à l'évaporation et à la transpiration des cultures pérennes aux racines profondes est aussi un facteur important dans le transport vertical des sels solubles (Greene et al., 2016).

II.2.2. Salinité non-associée à l'eau souterraine

Ce type de salinisation des sols est due à la faible perméabilité du sol, qui limite à la fois l'infiltration de l'eau et le lessivage des sels, dans ce cas la nappe est profonde

ou elle n'interfère pas dans le bilan salin du sol. La profondeur des couches affectées par la salinité dépend de la position et l'épaisseur de la couche imperméable. Si celle-ci est peu profonde, elle peut affecter les cultures surtout les arbres fruitiers ayant une profondeur racinaire importante (Greene et al., 2016).

L'infiltration peut être limitée par les sols et les sous-sols sodiques (Dang et al., 2006), les sols à texture lourde ou par la présence où des formations géologiques imperméables comme les croutes rocheuses ou calcaires (Lambers, 2003).

II.2.3. Salinité due à l'irrigation

La salinité due à l'irrigation est le principal facteur de la salinisation secondaire (salinisation due à l'activité humaine). Ce type de salinité est considéré aussi comme un obstacle majeur de l'agriculture irriguée dans les zones arides et semi arides (Helming, 2014). La rareté de l'eau et la forte demande climatique dans les milieux arides et semi-arides font appel à l'utilisation des eaux souterraines, souvent chargées en sels. Alors que les eaux salées doivent être utilisées avec restriction et nécessitent plusieurs conditions : un pilotage d'irrigation approprié et un réseau de drainage fonctionnel (Shahid et al., 2018).

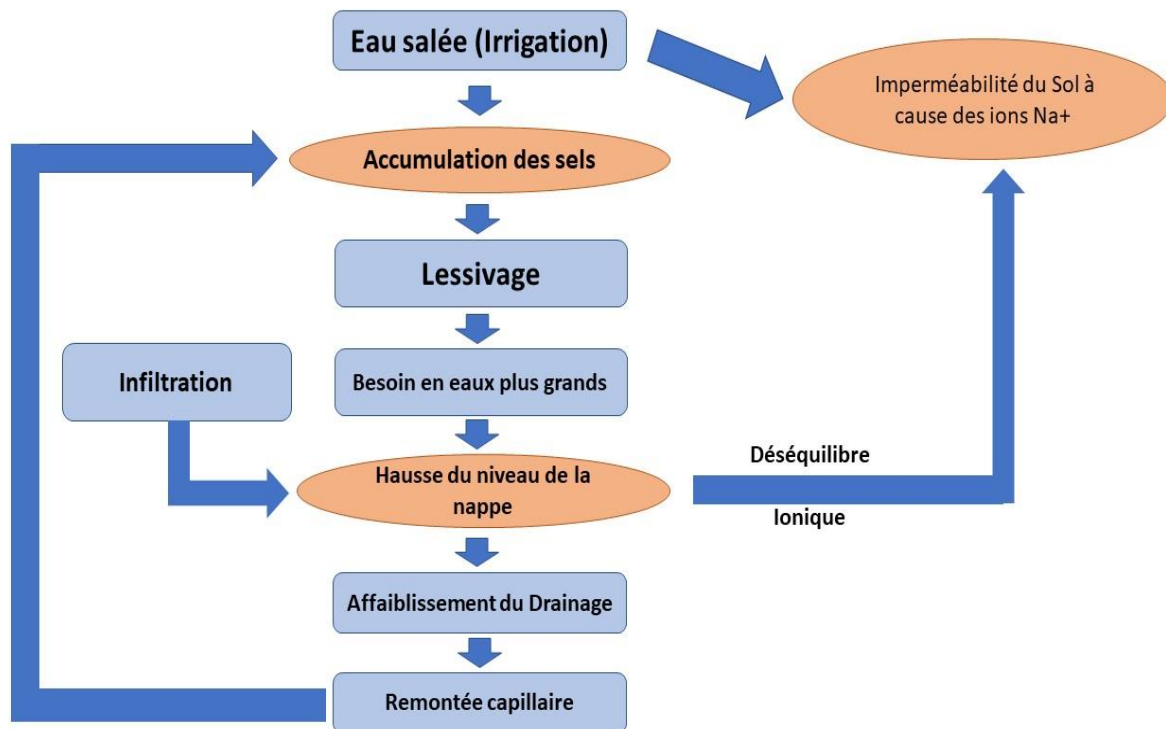


Figure 6 : Cycle Hypothétique de la salinisation des sols (Shahid et al., 2018)

Selon la figure 6, l'irrigation contribue aussi à la recharge en eau et en ions des nappes phréatiques par le drainage vertical, ce qui détériore la qualité de l'eau souterraine et qui induit les types de salinisation précédemment cités.

Ainsi, 77 Mha de sols agricoles subissent une salinisation sévère causée par l'irrigation (Munns et al. 1999, Sheng, 2008), ce chiffre ne cesse d'augmenter avec

une moyenne d'1 Mha par an à cause de l'extension des périmètres irrigués et l'intensification de l'irrigation (Heng, 2018). Actuellement entre 20% et 30% des surfaces irriguées sont affectées par ce problème (Shahid et al., 2018). Le tableau 3 établi par (Shahid et al., 2018) à partir des données de Ghassemi et al. (1995) et Marshali (1995), affiche les surfaces salinisées par l'irrigation dans les pays les plus touchés par la salinisation.

Tableau 3 : La salinisation secondaire dans les zones irriguées par pays (Shahid et al.,2018)

| Pays | Surfaces (Mha) | | |
|----------------|----------------|-----------|----------------------|
| | Cultivées | Irriguées | ^a Salines |
| Chine | 97 | 44,8 | 6,7 (15) |
| Inde | 169 | 42,1 | 7,0 (17) |
| Etats-Unis | 190 | 18,1 | 4,2 (23) |
| Pakistan | 20,8 | 16,1 | 4,2 (26) |
| Iran | 14,8 | 5,8 | 1,7 (29) |
| Thaïlande | 20 | 4 | 0,4 (10) |
| Egypte | 2,7 | 2,7 | 0,9 (33) |
| Australie | 47,1 | 1,8 | 0,2 (11) |
| Argentine | 35,8 | 1,7 | 0,6 (35) |
| Afrique du Sud | 13,2 | 1,1 | 0,1 (9) |
| Monde | 1474 | 227 | 45 (20) |

^a les valeurs entre parenthèses représentent les pourcentages des sols salins par rapport aux surfaces irriguées

II.3. Sols salins

Un sol salin est défini par Richards (1954) comme un sol ayant une conductivité électrique de l'extrait à pate saturée (CE_e) supérieure à 4000 $\mu S/cm$, reconnu visuellement par la présence des cristaux de sels (couleur blanche) sur la surface. Les sols salins représentent 40% des sols affectés par la salinisation des sols dans le monde (UNEP, 1992 ; FAO-ITPS-GSP, 2015).

Dans certains cas, on considère un sol comme salin lorsque les sels solubles présents dans la zone racinaire sont susceptibles d'affecter le développement et la croissance des cultures, car certaines cultures surtout les arbres fruitiers sont affectés par la salinité à partir d'une $CE = 2000 \mu S/cm$ (Shahid, 2018).

La conductivité électrique est le paramètre le plus couramment utilisé pour la classification des sols salins selon le degré de la salinité. Il existe plusieurs classifications basées sur ce paramètre, mais les plus utilisés dans le domaine agricole sont la classification USDA (Richards,1954) établie par le laboratoire USSL et la classification de Durand (1983). Les intervalles et les classes ont été définis selon l'impact sur des cultures (Tableau 4) mais les bornes de la première

classification sont basées sur EC_e tandis que la deuxième classification est basée sur $EC_{1/5}$.

Le tableau 4 affiche les deux classifications, les classes, les paramètres utilisés ainsi qu'une interprétation générique de l'impact des sols de la classe appropriée sur les cultures.

Tableau 4 :: Classification des sols selon la CE

| Degré de salinisation | ^a CE _e (μS/cm) | ^b CE _{1/5} | Impact sur les cultures |
|-----------------------|--------------------------------------|--------------------------------|---|
| Absent | < 2 000 | < 600 | Impact insignifiant |
| Faible | 2000-4 000 | 600-1200 | Rendement limité pour les cultures sensibles |
| Moyen | 4 000-8000 | 1200-2400 | Rendement limité pour plusieurs cultures |
| Sévère | 8 000-16 000 | 2400-6000 | Rendement satisfaisant uniquement pour les cultures tolérantes |
| Excessive | >16 000 | >6000 | Rendement satisfaisant uniquement pour les cultures très tolérantes |

II.4. Sols sodiques

Un sol alcalin ou sodique est défini comme un sol ayant un PSE supérieur à 15. Le pH de ce sol varie entre 8,5 et 10 et il peut même dépasser 11. Ces sols représentent 60% des sols affectés par la salinité, principalement localisés en Australie et au Sud de l'Asie (UNEP, 1992 ; FAO-ITPS-GSP, 2015).

L'accumulation des ions Na^+ dans le sol résulte de l'altération des minéraux alcalins, principalement les halites ($NaCl$) et Nahcolite ($NaHCO_3$), ou provenant de la saturation progressive par une solution saline dominée où Na^+ est dominant. Ceci influence les propriétés physiques des particules fines (dispersion des argiles) et les propriétés chimiques des sols tels que la précipitation des ions Ca^{2+} sous forme de carbonates de calcium ($CaCO_3$) dans un pH acide.

Le PSE, décrit par l'équation 1 est l'expression du sodium adsorbé sur la surface des particules du sol par rapport à la CEC du sol. Ce paramètre permet d'identifier les sols sodiques, de les classer et d'évaluer l'intensité de l'alcalisation du sol (Abrol et al., 1988).

$$PSE = \frac{\text{Na échangeable (me / 100 g du sol)}}{\text{Capacité d'échange cationique (me / 100 g du sol)}} \quad (1)$$

PSE = Pourcentage du Sodium Echangeable

meq = Milliéquivalent

Le tableau 5 présente les classes des sols sodiques selon le PSE, ainsi que les valeurs moyennes du pH appropriées à ses classes. La réponse des cultures à la concentration excessive diffère selon les propriétés physiologiques de la plantes et d'autres facteurs pédoclimatiques. Les plantes sensibles commencent à être affectées à partir du PSE= 15%, mais certaines cultures résistantes peuvent tolérer jusqu'à 70%.

Tableau 5 : Classification des sols sodiques selon le PSE

| PSE (%) | Classe sodique | pH moyen |
|---------|--------------------------|----------|
| <15 | Non à faiblement sodique | 8,0-8,2 |
| 15-30 | Légère à modérée | 8,2-8,4 |
| 30-50 | Modérée à élevée | 8,4-8,6 |
| 50-70 | Elevée à très élevée | 8,6-8,8 |
| >70 | Excessive | >8,8 |

Source (Abdrol et al.,1988)

III. Evaluation de la qualité de l'eau pour l'irrigation

La qualité de l'eau est le principal facteur causal de la salinisation des sols. Selon Ayers et Westcot (1985), « L'agriculture irriguée dépend de la qualité adéquate de l'eau d'irrigation ». L'évaluation de la qualité se réfère aux caractéristiques qui peuvent influencer la durabilité de l'agriculture au-delà des problèmes de salinité, sodicité, toxicité et pollution de l'eau souterraine (Zaman et al., 2018).

Les problèmes majeurs associés à la qualité de l'eau sont la salinité, la toxicité des ions et la pollution. Mais la salinité reste le problème le plus large et le plus cité dans la littérature (Mateo-Sagasta et Burke, 2011)

III.1. Paramètres utilisés pour déterminer la qualité de l'eau pour l'irrigation

L'évaluation de celle-ci est faite à partir de quatre paramètres : la salinité exprimée par la CE ou le TSS, le SAR, la concentration des ions toxiques ainsi que le sodium et carbonates résiduels (Richards, 1954, Zaman et al.,2018).

III.1.1. La CE

La salinité d'une eau est la somme des sels solubles dans celle-ci, elle est exprimée par plusieurs paramètres : La CE souvent en $\mu\text{S}/\text{cm}$ et le TDS exprimé en mg/l ou en ppm . Dans la littérature, il existe plusieurs normes d'interprétation et de classification des eaux d'irrigation selon la CE et le TSS, les plus utilisées sont affichées dans le tableau 6.

Table 6 : Classification des eaux selon la CE et le TSS (Daoud et Halitim, 1994)

| CE ($\mu\text{S/cm}$) | TSS (ppm) | Evaluation de la salinité | | |
|-------------------------|-----------|---------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|
| | | Evaluation USSL | Evaluation russe | Evaluation de Durand (1983) |
| < 250 | 200 | Faiblement salée | Bonne qualité | Non saline |
| 250 - 750 | 200-500 | Moyennement salée | | Salinité moyenne |
| 750- 2250 | 500-1500 | Fortement salée | Risque de salinisation | Forte salinité |
| 2250 - 5000 | 1500-3500 | Très fortement salée | | Très forte salinité |
| > 5000 | > 3500 | Salinité excessive | Ne peut être utilisée sans lessivage | Salinité excessive |

Les salinités de l'eau d'irrigation et du sol sont étroitement liées, surtout dans le cas d'un climat aride. La partie liquide de l'eau s'évapore et les sels se déposent dans la couche superficielle du sol et impactent les propriétés physiques et chimiques de ce sol. La salinité est considérée comme un facteur limitant menaçant la durabilité de l'agriculture irriguée dans les milieux arides (Daoud et Halitim, 1994).

III.1.2. Le SAR

Selon Richards (1954), « Le SAR (Sodium Adsorption Ratio) est un bon indicateur de l'alcalinité ». Il est un paramètre précis pour définir la composition d'une eau salée (Mathieu et al, 2003). Le SAR est calculé à partir des concentrations des ions (Na^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+}) par le biais de l'équation 2 :

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

Cette classification (Tableau 7) est basée principalement sur l'effet du sodium échangeable sur le sol, cependant les plantes sont affectées aussi par le sodium, dans le cas où sa concentration dans les tissus dépasse le seuil de tolérance de la plante concernée (Richards, 1954 ; Parida et Das, 2005).

Tableau 7 : Classification des sols selon le SAR (Richard, 1954)

| Classe | Intervalle du SAR | Evaluation |
|--------------------------|-------------------|---|
| S1 : Sodicité Faible | < 10 | Sans un grand risque |
| S2 : Sodicité Moyenne | 10 - 18 | Utilisable uniquement pour les sols grossiers |
| S3 : Forte sodicité | 18 - 26 | Un grand risque de sodisation |
| S4 : Très forte sodicité | >26 | Non convenable pour l'irrigation |

III.1.3. Le Résiduel Sodium Carbonates (RSC)

Les concentrations excessives des carbonates et bicarbonates (CO_3^{2-} et HCO_3^-) par rapport aux concentrations des ions alcalins bivalents (Ca^{2+} et Mg^{2+}) influencent la qualité des eaux d'irrigation (El-Rawy et al., 2019). Ceci provoque une précipitation des ions Ca^{2+} et Mg^{2+} sous la forme CaCO_3 (calcite) et $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ (dolomite).

La précipitation des ions Ca^{2+} et Mg^{2+} augmente le SAR et le PSE du sol, ce qui accentue l'effet de la sodisation des sols (Bradai et Douaoui, 2012 ; El-Rawy et al., 2019).

Ceci est connu sous le nom d'alcalinité résiduelle, définie par l'indice RSC défini par Eaton (1950) comme étant la différence entre l'alcalinité carbonatée (CO_3^{2-} et HCO_3^-) et les cations divalents (Ca^{2+} et Mg^{2+}), calculé par la formule indiquée dans l'équation 3. Le tableau 8 présente la classification des eaux d'irrigation selon l'indice RSC.

$$RSC = (HCO3 + CO3) - (Ca + Mg) \quad (3)$$

Le RSC et toutes les concentrations sont en meq/L

Tableau 8 : Classification des eaux selon l'indice RSC (Siddiqui, 2005)

| Intervalle du RSC | Classe | Evaluation |
|-------------------|----------------|---|
| < 1,25 | Sans effet | Sans effet remarquable sur le sol |
| 1,25 - 2,5 | Effet modéré | Peut affecter les sols fins peu perméables |
| >2,5 | Non utilisable | Les eaux de cette classe sont de qualité médiocre, dégradent la structure du sol à long terme |

III.1.4. Toxicité spécifique des ions

La concentration des ions toxiques notamment, les chlorures et le sodium, interfère dans l'évaluation de la qualité d'une eau pour l'irrigation. Les éléments toxiques peuvent affecter les plantes directement ou indirectement. Directement par l'accumulation des ions toxiques dans les différents tissus de la plante, indirectement par le déséquilibre ionique du sol et les interférences avec l'absorption des autres éléments nutritifs (Tester et Davenport, 2003).

L'effet des ions toxiques sur la culture dépend de la sensibilité de la plante, des conditions climatiques et de la technique d'irrigation utilisée (Bernstein, 1975 ; Parida et Das, 2005 ; Swaefy et El-Ziat, 2017). Le tableau 9 affiche la classification des eaux selon la concentration des ions Cl^- .

Tableau 9 : Classification des eaux selon la concentration du chlore (Maas, 1990)

| Classe | Cl (ppm) | Effet sur les feuilles |
|----------|----------|---|
| Bonne | < 70 | Sans effet négatif sur les plantes |
| Moyenne | 70-140 | Nécroses foliaires pour les plantes sensibles au Cl ⁻ |
| Médiocre | 140-350 | Nécroses foliaires pour les plantes moyennement tolérantes au Cl ⁻ |
| Mauvaise | >350 | Brulures sévères et inhibition de la croissance |

III.2. Classification des eaux d'irrigation

III.2.1. Diagramme de Riverside

- Principe

Le diagramme de Riverside établi par le Laboratoire Américain de Salinité (USSL), classe les eaux d'irrigation selon les risques de celles-ci à affecter les propriétés physiques et chimiques du sol dans les conditions normales et supposant que cette eau serait utilisée en respectant les conditions pédoclimatiques et la tolérance en sels des cultures (Wilcox,1955).

Ceci met en évidence les différentes relations entre le SAR, la CE de l'eau d'irrigation avec le PSE et la CE du sol. Cette méthode est largement utilisée dans des recherches récentes (El-Rawy et al., 2019 ; Abdennor, 2020 ; Shahid, 2018).

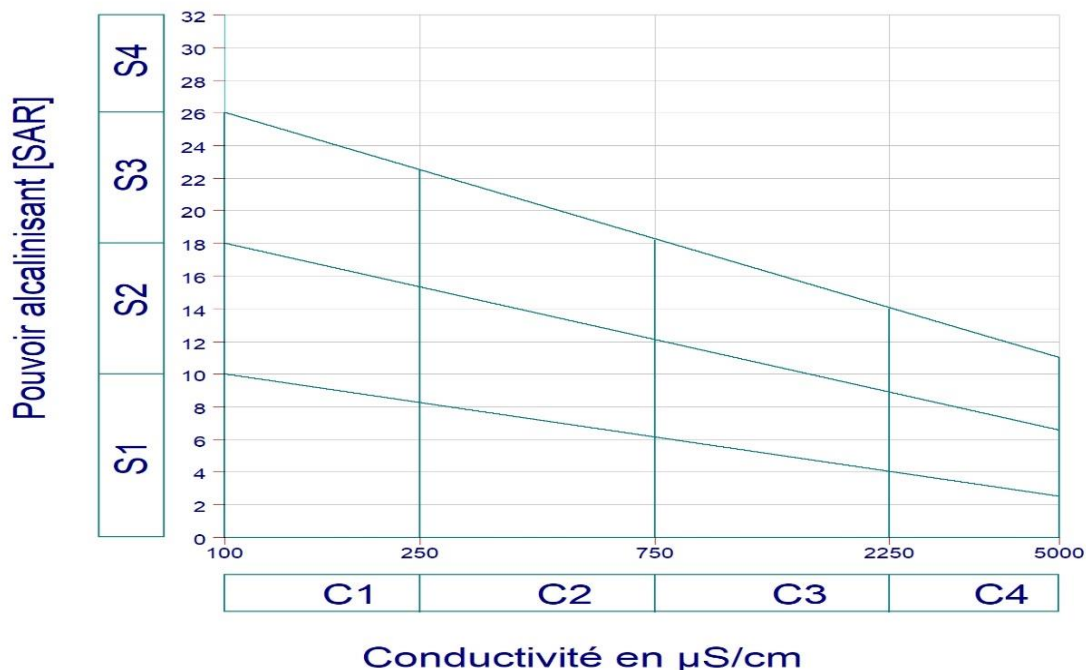


Figure 7 : Diagramme de Riverside (Richads, 1954)

Les eaux d'irrigation sont classées en 16 classes en combinant deux paramètres (4 modalités pour chaque paramètre). La CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) dans l'axe des abscisses divisé en quatre colonnes avec les bornes : 250, 750, 2250. Le SAR dans l'axe des ordonnées divisé en quatre lignes avec les droites décroissantes à cause de la dépendance du SAR de la CE (Figure 7) (Richards, 1954).

- **Classification selon la conductivité électrique**

- Classe C1 (faible salinité) : L'eau appartenant à cette classe peut être utilisée pour la majorité des sols et des cultures dans les conditions normales, sans risque d'une salinisation sauf pour les sols très-peu perméables
- Classe C2 (salinité moyenne) : L'eau de cette classe peut être utilisée pour les plantes ayant une tolérance modérée à la salinité sans pratiques spéciales. Mais nécessite un lessivage modéré pour les cultures sensibles à la salinité
- Classe C3 (salinité élevée) : Les eaux de cette classe ne peuvent être utilisées pour les sols peu-perméables. L'irrigation avec cette eau nécessite un pilotage spécial de l'irrigation pour le contrôle du niveau de salinité. Les cultures tolérantes aux sels doivent être sélectionnées pour les eaux de cette classe
- Classe C4 (salinité très élevée) : Les eaux de cette classe ne devraient pas être utilisées dans les circonstances ordinaires, mais peuvent être utilisées occasionnellement dans des circonstances spéciales. Les plantes très tolérantes en sels doivent être sélectionnées avec l'application des doses de lessivages convenables.

- **Classes selon le SAR**

- Classe S1 (faible sodicité) : Les eaux de cette classe peuvent être utilisées pour l'irrigation de tous les sols et les cultures avec un faible danger du développement d'un haut niveau du sodium échangeable. Cependant, les cultures sensibles comme certains arbres fruitiers peuvent être affectées surtout dans les sols lourds ayant une CEC élevée.
- Classe S2 (Sodicité moyenne) : Les eaux de cette classe peuvent être utilisées pour les sols grossiers et les sols organiques ayant une importante perméabilité. Cependant elles peuvent provoquer un appréciable P.S.E dans les sols à texture fine ayant une C.E.C fine, surtout dans les conditions de faible perméabilité.
- Classe S3 (Sodicité forte) : Les eaux de cette classe peuvent provoquer des niveaux nocifs du P.S.E pour la majorité des sols. Elles nécessitent une gestion spéciale du sol avec un bon drainage, l'application des doses de lessivage et l'assurance d'une bonne structure du sol. Les sols gypseux peuvent ne pas être détériorés par les eaux de cette classe. L'amendement chimique peut aussi corriger le P.S.E de ces sols, cependant il est déconseillé pour les sols ayant une CE élevée.

- Classe S4 : L'irrigation avec les eaux de cette classe est généralement insatisfaisante pour tous les sols, sauf dans le cas où la C.E. est faible. Dans ce cas, le P.S.E peut être corrigé par un amendement gypseux ou par un autre amendement chimique.

III.2.2. Standards et normes FAO

Les standards de l'évaluation de la qualité de l'eau affichés dans le tableau 10 sont un outil pour la gestion de l'irrigation vis-à-vis de la qualité de l'eau. Ces standards ont été établis par Ayers et Westcot (1985) à partir des résultats du comité de l'université de Californie (Ayers et Westcot, 1976) en coopération avec le laboratoire USSL, sur l'effet à long-terme de la faible qualité de l'eau sur les productions agricoles et sur le sol. Le tableau 11 présente les normes recommandées par la FAO pour l'utilisation de l'eau pour l'irrigation.

Tableau 10 : Standards de la FAO pour l'interprétation de la qualité de l'eau pour l'irrigation

| Paramètre (Unité) | | Degré de restriction d'utilisation | | |
|---------------------------------------|-----------------------|--|--|---|
| | | Aucune | Restriction modérée | Restriction sévère |
| EC ($\mu\text{S/cm}$) | | <700 | 700-3000 | >3000 |
| pH | | Plage normale (6,5-8,4) | | |
| SAR | 0-3 | EC > 700 EC > 1200 EC > 1900 EC > 2900 EC > 5000 | EC : 700-200 EC : 1200-300 EC : 1900-500 EC : 2900-1300 EC : 5000-2900 | EC < 200 EC < 300 EC < 500 EC < 1300 EC < 29000 |
| | 3-6 | | | |
| | 6-12 | | | |
| | 12-20 | | | |
| | 20-40 | | | |
| Na | Irrigation de surface | SAR < 3 | SAR : 3-9 | SAR >9 |
| | Aspersion | Na (meq/L) < 3 | Na (meq/L) > 3 | |
| Cl (meq/L) | Irrigation de surface | < 3 | 4-10 | >10 |
| | Aspersion | < 3 | >3 | |
| NO ₃ ⁻ (mg/L) | | < 5 | 5-30 | >30 |
| HCO ₃ ⁻ (meq/L) | | < 1,5 | 1,5-8,5 | >8,5 |

Source (Ayers et Westcot, 1985)

Tableau 11 : Normes de la FAO pour l'évaluation de la qualité de l'eau en agriculture

| Paramètres | Normes pour les eaux d'irrigation |
|--------------------------------|-----------------------------------|
| EC ($\mu\text{s}/\text{cm}$) | 0-3000 |
| pH | 6-8.5 |
| Ca^{2+} (meq/L) | 0-20 |
| Mg^{2+} (meq/L) | 0-5 |
| Na^+ (meq/L) | 0-40 |
| HCO_3^- (meq/L) | 0-10 |
| Cl^- (meq/L) | 0-30 |
| SO_4^{2-} (meq/L) | 0-20 |
| NO_3^- (meq/L) | 0-10 |
| K^+ (meq/L) | 0-2 |
| SAR | 0-15 |

Source (Ayers et Westcot, 1985)

IV. Impacts de la salinité sur les cultures

IV.1. Notion du stress salin

Les cultures font face à plusieurs facteurs abiotiques dépendants de l'écosystème, ces facteurs affectent parfois négativement de plusieurs façons le développement et la croissance des plantes. Le stress salin est l'ensemble des effets de la salinité du sol sur la culture, il est souvent associé aux milieux arides et semi-arides (Ahammed et al., 2020).

La salinité affecte les plantes de plusieurs manières : par le déséquilibre osmotique, la toxicité des ions et le déséquilibre de balance nutritionnelle (Zhu, 2007). L'intensité de ce stress est dépendante de plusieurs paramètres abiotiques (propriétés physico-chimiques du sol, conditions climatiques) et biotiques (Résistance de la culture, Stade végétatif) (Safdar et al., 2019). La figure 8 résume les principales interactions entre la salinité et les plantes.

Le stress salin est considéré comme le plus important et le plus ancien stress abiotique dans le monde, il inhibe la germination, la croissance et la production des cultures ainsi que plusieurs activités physiologiques des plantes comme la photosynthèse et l'absorption (Maas E.V., 1993).

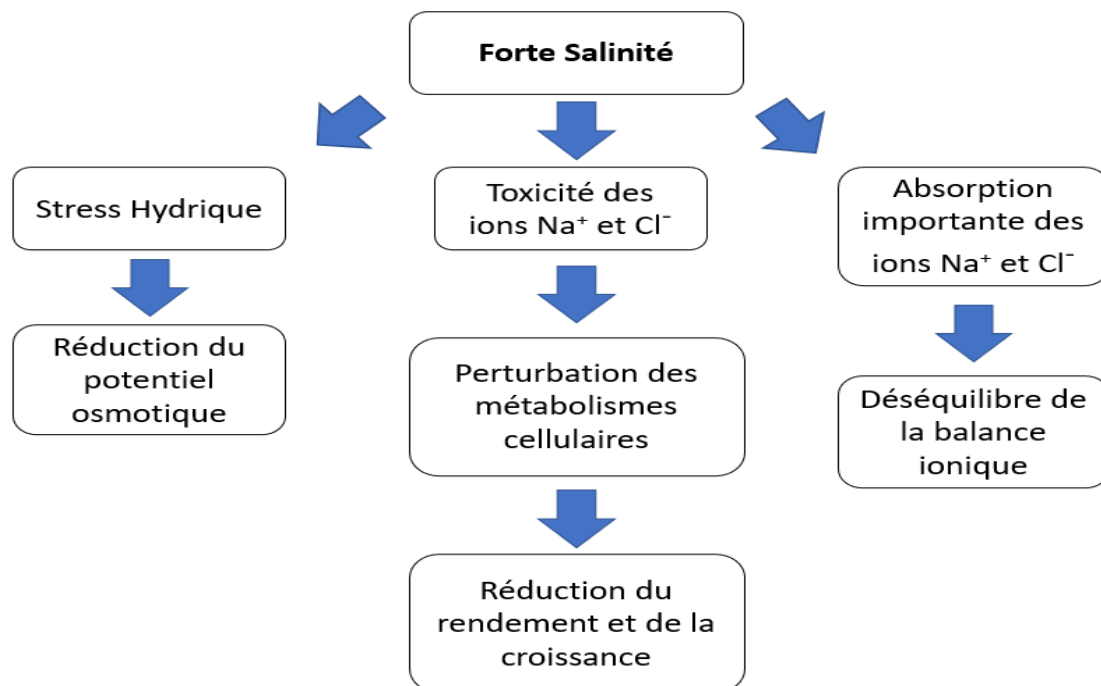


Figure 8 : Schéma des effets du stress salin sur la plante (Evelin et al., 2009)

IV.2. Effet de la salinité sur les activités physiologiques de la plante

IV.2.1. Effet hyper-osmotique (Effet non spécifique)

Les plantes absorbent l'eau et les éléments nutritifs de la solution du sol par osmose. Cependant, les sols salés sont hyper-osmotiques à cause des fortes concentrations des ions solubles. Dans ce cas, les plantes n'arrivent plus à absorber suffisamment d'eau, d'où le rapprochement des symptômes du stress salin avec ceux du stress hydrique (Munns et Tester, 2008). Le tableau 12 classe les cultures selon leurs résistances à la salinité du Sol.

Table 12 : Classification des cultures selon la résistance à la salinité totale du sol (EC_e)

| Sensibles (0-4 mS/cm) | Modérément sensibles (4-6 mS/cm) | Tolérantes (6-8 mS/cm) | Très tolérantes (8-12 mS/cm) |
|--------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| Carotte | Oignon | Blé | Betterave sucrière |
| Concombre | Laitue | Olivier | Orge |
| Pastèque | Melon | Tomate | Seigle |
| Fraise | Pomme de terre | Epinard | Palmier Dattier |
| Haricot | Riz | Tourne sol | |
| Radis | Sorgho | | |
| Céleri | Raisin | | |

Source (Galvani, 2007)

Pour maintenir l'absorption de l'eau, les plantes dites halophytes (tolérantes aux sels) absorbent et accumulent les sels dans leurs tissus, tandis que les plantes dites glycophytes (sensitives aux sels) synthétisent des solutés organiques afin de maintenir le potentiel osmotique de leurs cellules. Cependant, l'ajustement du potentiel osmotique par absorption des sels peut provoquer ou accentuer la toxicité à cause de l'accumulation des ions Cl^- et Na^+ , surtout dans les tissus foliaires (Sheldon et al., 2017).

IV.2.2. Toxicité des ions Cl^- et Na^+ (Effet spécifique)

Le sodium n'est pas vraiment un élément essentiel pour la majorité des cultures, mais il est bénéfique pour elles à une concentration modérée. Cependant à une concentration supérieure aux limites de tolérance de la culture comme mentionné dans le tableau 13, les ions Na^+ peuvent affecter la plante par la voie directe ou indirecte. Directe, par son accumulation dans les tissus qui se traduit par des nécroses, un jaunissement des feuilles ou par une défoliation dans les cas extrêmes. Indirecte par la détérioration des propriétés physiques du sol (affaiblissement de la perméabilité du sol), qui perturbe le fonctionnement correct des racines la plante par la suite (Grieve et al., 2012).

Tableau 13 : Tolérance des cultures au sodium échangeable dans les conditions non-salines

| Tolérance au sodium échangeable (PSE %) | Culture (Nom scientifique) | Réponse de la culture dans les conditions de plein champ |
|---|---|---|
| Extrêmement sensible (PSE = 2-10) | Citronnier (<i>Citrus sp</i>) Avocat (<i>Persea americana</i>) | Symptômes de toxicité même à un PSE faible |
| Sensible (PSE - 10-20) | Haricots (<i>Phaseolus vulgaris</i>) | Retard de croissance à ces valeurs PSE même si les conditions physiques du sol sont bonnes. |
| Tolérance modérée (PSE - 20-40) | Trèfle (<i>Trifolium sp</i>) Avoine (<i>Avena saliva</i>) Fétuque (<i>Festuca arundinacea</i>) Riz (<i>Oryza saliva</i>) | Retard de croissance dû à la fois à des facteurs nutritionnels et à des conditions défavorables du sol. |
| Tolérante (PSE - 40-60) | Blé tendre (<i>Triticum aestivum</i>) Cotton (<i>Gossypium hirsutum</i>) Alfalfa (<i>Medicago sativa</i>) Orge (<i>Hordeum vulgare L.</i>) Tomates (<i>Lycopersicon esculentum</i>) Betterave (<i>Beta vulgaris</i>) | Retard de croissance généralement dû à des conditions physiques défavorables du sol. |
| Très tolérante (PSE > 60) | L'herbe de rhodes (<i>Chloris gayana</i>) | Retard de croissance généralement dû à des conditions physiques défavorables du sol. |

Source (Pearson, 1960)

Le chlore est aussi toxique quand il est accumulé à une concentration élevée. Il provoque des nécroses foliaires, une inhibition de la croissance et des chutes importantes de la production (Maas,1986).

Dans le cas des eaux salées, l'effet de la toxicité des chlorures et du sodium peut être accentués par l'irrigation par aspersion (surtout l'irrigation en plein jour), car l'aspersion favorise l'adsorption des sels sur la surface foliaire, ce qui augmente leurs concentrations dans le tissu foliaire. Ceci se traduit par une réduction supplémentaire du rendement à celle causée par la salinité du sol (Benes et al., 1996).

Le tableau 14 présente la susceptibilité de certaines cultures aux blessures foliaires en fonction des concentrations des ions Na^+ et Cl^- dans les eaux d'irrigation par aspersion. Cependant ces valeurs peuvent varier en fonction des conditions environnementales, le climat aride accentue la toxicité des ions Na^+ et Cl^- (Maas et Grattan, 1999).

Tableau 14 : Susceptibilité des cultures aux blessures foliaires pour l'irrigation par aspersion

| Concentrations des Ions Na^+ ou Cl^- mmol/L | | | |
|---|----------------|-----------|--------------------|
| <5 | 5-10 | 10-20 | >30 |
| Amandier | Vigne | Alfalfa | Chou-fleur |
| Abricotier | Haricots | Orge | Coton |
| Citronnier | Pomme de terre | Mais | Betterave sucrière |
| Prunier | Tomate | Concombre | Tournesol |
| | | Carthame | |
| | | Sésame | |
| | | Sorgho | |

Source (Maas and Grattan, 1999)

IV.3. Effet de la salinité sur le rendement

La salinité diminue le rendement quand elle dépasse le seuil de tolérance de la culture, elle interfère directement ou indirectement sur plusieurs activités physiologiques de la plante : l'absorption, la photosynthèse et la circulation de la sève (Safdar et al. 2019).

Le rendement est le paramètre quantitatif le plus représentatif pour exprimer la tolérance ou la sensibilité d'une culture à la salinité. Celle-ci affecte négativement le rendement, mais il est difficile de quantifier cet effet dans une relation absolue. Cependant, il peut être relativement estimé en fonction de la salinité du sol (Maas, 1993). Le tableau 15 présente les seuils de tolérance de certaines cultures ainsi que les chutes de rendement prévisibles en fonction de la conductivité électrique du sol. Ces valeurs peuvent varier selon plusieurs facteurs relatifs à la culture (variétés,

adaptation à la salinité), au sol (composition chimique, état physique) et aux pratiques agricoles (pilotage de l'irrigation).

Tableau 15 : Seuil tolérance des cultures aux sels (Maas et Grattan, 1999)

| Culture (Nom scientifique) | ^a Seuil de tolérance ECe (dS/m) | ^b Pente de la chute du rendement (% par (dS/m)) |
|--|--|--|
| Pomme de terre (<i>Solanum Tuberosum</i>) | 1,7 | 12 |
| Tomate (<i>Lycopersicum esculentum</i>) | 2,5 | 9,9 |
| Blé tendre (<i>Triticum durum</i>) | 2,1 | 2,5 |
| Orge fourrager (<i>Hordeum vulgare</i>) | 6,0 | 7,1 |
| Palmier dattier (<i>Phoenix dactylifera</i>) | 4,0 | 3,6 |
| Poivron (<i>Capsicum annum</i>) | 1,5 | 14 |
| Oignon (<i>Allium cepa</i>) | 1,21 | 16 |
| Ail (<i>Allium Sativum</i>) | 3,9 | 14,3 |
| Arachides (<i>Arachis hypogea</i>) | 3,2 | 29 |
| Betterave Sucrière (<i>Beta vulgaris</i>) | 7,0 | 5,9 |
| Mais (<i>Zea mays</i>) | 1,8 | 7,4 |

^a Le seuil de ECe a partir duquel le rendement commence à diminuer, pour les sols gypseux ce seuil est plus grand avec une différence de 2 dS/m

^b La pente de la droite qui exprime le rendement (%) en fonction de la CE (dS/m)

IV.4. Effet de la salinité sur la qualité de la production

L'impact de la salinité sur la production agricole ne se limite pas à l'aspect quantitatif uniquement, la qualité aussi peut être détériorée et dévalorisée au marché (De Pascale, 2001).

Selon El Sabagh (2020), le stress salin affecte significativement les propriétés nutritionnelles et la qualité des produits agricoles à cause de l'altération physiologique et biochimique de la plante à différents stades, qui par la suite se traduit par l'activation de certains mécanismes pour acquérir une tolérance vis-à-vis de la salinité. Cette adaptation modifie la synthèse des protéines, des sucres et des antioxydants et aussi la distribution des ions toxiques. Le stress salin est souvent accompagné par une réduction de la taille et de la teneur protéique des céréales (notamment le blé, le maïs et le riz), de la teneur des acides gras pour les cultures oléagineuses.

V. Gestion et amélioration des sols salins

V.1. Diagnostic

Pour une gestion durable des sols agricoles vis à vis du problème de la salinisation, il est essentiel de procéder à un diagnostic de l'état physique et chimique du sol, selon les méthodes présentées dans le chapitre 2. Le diagnostic permet de caractériser l'état chimique et physique du sol ainsi que sa vulnérabilité afin de tracer les lignes directrices et des recommandations pour sa gestion durable ou son amélioration (Zamman et al., 2018).

Il existe plusieurs méthodes pour la gestion et l'amélioration des sols salins et sodiques, certaines sont liées à l'irrigation et à la qualité de l'eau, d'autres liées aux pratiques agricoles et à la fertilisation. Le choix de la méthode dépend de l'intensité du problème, des caractéristiques physico-chimiques du sol et de l'eau d'irrigation ainsi qu'aux facteurs socio-économiques. Le tableau 16 affiche les principales méthodes utilisées pour la gestion durable des sols salins et sodiques (Vargas et al., 2018).

Tableau 16 : Techniques pour l'amélioration des sols salins et sodiques

| Groupe | Type | Techniques |
|--------------------------------|--|--|
| Amélioration hydrotechnique | Systèmes d'irrigation (Lessivage) | Aspersion Irrigation de surface (rigole, inondation) Goutte-à-goutte Irrigation souterraine |
| | Systèmes de drainage | Irrigation combinée au drainage horizontal Irrigation combinée au drainage vertical |
| Amélioration chimique | Amendements et corrections chimiques | Répartition globale Compensation Locale Combinée |
| Amélioration agro technique | La régulation de l'eau de surface | Mise à niveau Traçage des rigoles |
| | La régulation de l'eau souterraine | Labour profond Cassement de la croûte |
| Amélioration Phytobiotechnique | Plantation et couverture du sol | Paillage Rotation des cultures Plantation des phyto-améliorants Engrais verts |
| Aménagement de la parcelle | Amélioration du profil hydrologique de la parcelle | Enlèvement de la pierre Enlèvement des bosses et des obstacles |

Source (Vargas et al., 2018)

V.2. Méthodes hydrotechniques

V.2.1. Lessivage

V.2.1.1. Définition

Les sols salins ou alcalins (riches en sels solubles) peuvent être renouvelés par la dissolution des sels et leurs évacuations en dehors de la zone racinaire par le lessivage. Ceci peut être naturel par les eaux de pluies ou provoqué par le biais de l'irrigation (Zaman et al., 2018).

Selon Oster (1994), «La clé pour le contrôle de la salinité est le lessivage». Cette technique consiste à l'application d'une quantité d'eau supplémentaire à la surface du sol afin d'entraîner les sels solubles en dehors de la zone racinaire. Ceci permettra par la suite de maintenir un niveau de salinité faible garantissant une production satisfaisante (Vargas et al., 2018).

V.2.1.2. Les besoins de lessivage

Selon Valles (1983), l'irrigation avec des eaux salées nécessite l'apport d'une fraction d'eau supplémentaire pour lessiver les sels. Cette quantité d'eau dépend de plusieurs facteurs relatifs aux propriétés géochimiques du sol, à l'hydrochimie de l'eau d'irrigation et au seuil de tolérance de la culture.

La fraction supplémentaire minimum pour le contrôle de la salinité en dessous du seuil de tolérance des cultures peut être calculée par la formule de Rhoades (1974), décrite par l'équation 4 :

$$LR = \frac{EC_{iw}}{5EC_e - EC_{iw}} \quad (4)$$

LR : Fraction de lessivage minimum

EC_e : Salinité de l'extrait à pâte saturée du sol tolérée par la culture (μS/cm)

EC_{iw} : Salinité de l'eau d'irrigation

Les besoins minimums d'eau pour effectuer un lessivage (équation 5) sont calculés à partir des besoins en eau des cultures et de la fraction minimum de lessivage LR par la formule suivante (Ayers and Westcot, 1985) :

$$AW = \frac{ET}{1-LR} \quad (5)$$

AW : Besoins minimums en eau pour le lessivage (mm)

ET : Besoin en eau de la culture

LR : Fraction de lessivage minimum

V.2.1.3. Rôle de la technique d'irrigation dans le lessivage

Le lessivage est influencé par la technique d'irrigation utilisée ainsi que par les propriétés physiques du sol. Selon Oster (1994), le goutte à goutte est la technique la plus adaptée pour l'irrigation avec des eaux salées, elle permet de maintenir une faible salinité dans la zone racinaire en appliquant une quantité d'eau inférieure par rapport aux autres techniques grâce aux flux continus, cependant l'évacuation des

sels est très faible à cause de la faible percolation de l'eau pour cette technique d'irrigation.

L'étude comparative des sols irrigués avec une eau salée par 3 techniques d'irrigation : l'aspersion, l'irrigation à la raie et le goutte à goutte a montré que cette dernière technique est la plus efficace. Elle couvre partiellement le sol donc une salinisation partielle des parcelles, elle consomme moins d'eau et la salinité dans la zone racinaire est plus faible. Cependant la concentration des sels à la surface du sol et aux extrémités du bulbe humide est significativement supérieure, d'où l'hétérogénéité de la composition chimique des sols irrigués avec le goutte à goutte. Cependant elle peut être diffusée vers la zone racinaire par la remontée capillaire lors d'une irrigation à faible fréquence (Paliwal, 1986).

V.2.2. Le dessalement et la déminéralisation de l'eau d'irrigation

L'amélioration de la qualité de l'eau semble une alternative garantissant une production satisfaisante et durable, surtout dans les pays arides et semi arides où les ressources en eaux de bonne qualité sont rares. Le dessalement de l'eau de mer et la déminéralisation de l'eau saumâtre peuvent garantir la production d'une eau de bonne qualité à des fins agricoles. Cependant le coût initial et la demande en énergie sont élevés, d'où la nécessité d'une gestion optimale de l'eau produite et de l'orientation vers des cultures à haute valeur ajoutée afin de rentabiliser l'investissement (Kumar et al., 2019).

Le coût du dessalement est 3,5 fois plus cher que le pompage d'une eau naturelle. Actuellement, l'Espagne est le pays le plus utilisateur du dessalement pour l'irrigation, sur une production de 1,4 millions de m³/jour il y'a 22% qui sont utilisés en agriculture (Desaldata, 2012). En agriculture, les techniques les plus utilisées sont les techniques à membrane, parmi lesquelles on cite : L'osmose inverse et la nano filtration. Le choix de la technique dépend de plusieurs facteurs relatifs à l'efficacité de la technique vis-à-vis de la qualité de l'eau ainsi qu'à des facteurs socio-économiques comme le coût et la maîtrise de la technique (Dare, 2018).

Le dessalement ne sépare pas uniquement les sels indésirables dans l'eau, mais élimine aussi les ions essentiels pour les cultures d'où la nécessité d'un post-traitement pour l'équilibre et l'enrichissement de l'eau en éléments nutritifs (Kumar et al., 2018).

V.2.2.1. Osmose inverse

L'osmose inverse est la technique la plus utilisée au monde, elle produit 61% de l'eau dessalée. Cette technique consiste à l'application d'une pression excessive avec une pompe à haute pression afin d'inverser le flux osmotique, ceci permet à l'eau de passer d'un milieu concentré à un milieu moins concentré en sels à travers une membrane semi perméable (Nair, 2012).

Cependant l'eau produite devrait être contrôlée et traitée, car la déminéralisation des ions peut provoquer l'augmentation du SAR (déminéralisation des cations bivalents)

et l'altération de la membrane peut contaminer l'eau produite avec les ions toxiques. Les sels filtrés se concentrent dans une solution extrêmement salée (saumure) qui atteint 60% de l'eau traitée dans le cas du dessalement de l'eau de mer. La saumure est rejetée dans la mer pour la station de dessalement côtière ou desséchée et exploitée pour des fins industrielles (Burn et al., 2015).

V.2.2.2. Nano filtration

La nano filtration est considérée comme la méthode la plus efficace pour la production d'une eau de qualité supérieure grâce à la finesse des pores de la membrane utilisée. Cette méthode est utilisée pour le dessalement, également pour le traitement des eaux issues de l'osmose inverse (Burn et al., 2015). Selon Eriksson et al. (2005), la nano filtration permet de réduire le TDS d'une eau excessivement salée de 45,46 mg/l à 28,26 mg/l donc une élimination de 47% des sels solubles, une élimination des sulfates arrivant jusqu'à 99%, une élimination des cations bivalents entre 80 et 95% et une économie d'énergie entre 20 et 30% par rapport à l'osmose inverse (Tanninen et al., 2005). La meilleure performance de la nano filtration a été démontré par Bunani et al., (2013) avec une réduction du TDS de 3150 mg/l à 340 mg/l, soit une élimination de 90% des sels solubles.

V.3. Méthodes chimiques

L'amélioration chimique des sols consiste en l'ajout des amendements et additifs chimiques afin de corriger la composition chimique d'un sol. Cette méthode a pour fin de réduire le PSE par l'ajout des autres cations tel le calcium et le magnésium ou par l'ajout des solutions qui provoquent la précipitation du sodium sous forme minérale (NaCl et Na_2SO_4) tels l'acide hydrochlorique (HCl) et l'acide sulfurique ($\text{H}_2\text{SO}_4^{2-}$) (Shahid et al., 2018). Cependant, cette technique n'est pas utilisable pour les sols salins car c'est une source supplémentaire de sels solubles.

V.4. Méthodes physiques

Selon Richards (1954), il existe une relation étroite entre la salinité et les propriétés physiques du sol, l'impact de la salinité serait moindre dans les sols perméables. Les sols peu perméables sont plus vulnérables à la salinisation, à cause de la faible percolation de l'eau, les sels s'accumulent dans la couche arable et affectent les racines. L'amélioration physique est prépondérante pour les sols peu perméables dans le cas d'une irrigation avec une eau salée. Plusieurs méthodes sont utilisées pour l'amélioration de la structure et la texture du sol, parmi lesquelles on cite l'amendement du sable, le labour profond et le nivellement du sol.

V.5. Phytoremédiation des sols

La phytoremédiation des sols salins consiste à l'utilisation des plantes hyper accumulatrices des sels (halophytes) pour le dessalement des sols salins et sodiques. Cette technique a été recommandée par Qadir et Oster (2002) ainsi que par Kumar et al. (2019) pour les zones arides où les ressources en eaux sont insuffisantes pour effectuer un lessivage des sols.

Cette technique permet d'exporter une quantité importante des sels dont le sodium et le chlore pour réduire la CE du sol ainsi que le PSE. De plus elle contribue à la dissolution des minéraux calciques et la libération des ions Ca^{2+} par l'acidification du milieu (Kumar et al. (2019)). Ceci offre un avantage pour les sols salins-sodiques où l'utilisation des méthodes chimiques est restreinte. L'efficacité du para-grass (*Brachiaria mutica*) est comparable à une application de 12,5 T de gypse (Kumar et Abrol, 1984).

Le tableau 17 affiche les plantes les plus utilisées pour la phytoremédiation des sols salins et sodiques ainsi que leurs efficacités.

Tableau 17 : Quantité de sels accumulés par quelques plantes halophytes

| Nom scientifique | Ion absorbé (Quantité absorbée en T/ha) | Référence |
|--------------------------------|---|-----------------------|
| <i>Suaeda salsa</i> | NaCl (2,79) | Zhao et al. (2005) |
| <i>Kalidium folium</i> | NaCl (2,29) | Zhao et al. (2005) |
| <i>Suaeda maritima</i> | NaCl (0,50) | Ravindran et al. 2007 |
| <i>Suaeda portulacastrum</i> | NaCl (0,47) | Ravindran et al. 2007 |
| <i>Sesuvium portulacastrum</i> | Na^+ (1,0) | Rabhi et al. 2010 |
| | NaCl (2,5) | Zorrig et al. 2012 |

Source (Kumar et al. 2019)

Chapitre 2 :

Présentation de la région d'étude

I. Situation géographique

La vallée du Souf est localisée dans la wilaya d'El Oued à l'Est de l'Algérie, au Nord-Est du Sahara (Figure 9), précisément aux frontières avec la Tunisie. Cette région qui appartient au Grand Erg Oriental couvre une surface de 11 738 km² qui est comprise entre les longitudes 6,40 et 7,35, les latitudes 32,5 et 34,30 et les altitudes 64 m et 120 m. Elle est composée de 18 communes dont le Chef-lieu de la Wilaya. Elle est limitée au Nord par le Chott Melrhir, au Sud et au Sud-Ouest par la wilaya de Ouargla, au Nord-Ouest par la vallée d'Oued Rhir et à l'Est par les frontières algéro-tunisienne (Voisin, 2004). Cette vallée abrite une population de 500 000 habitants, soit la majorité des habitants de la wilaya (ONS, 2008).

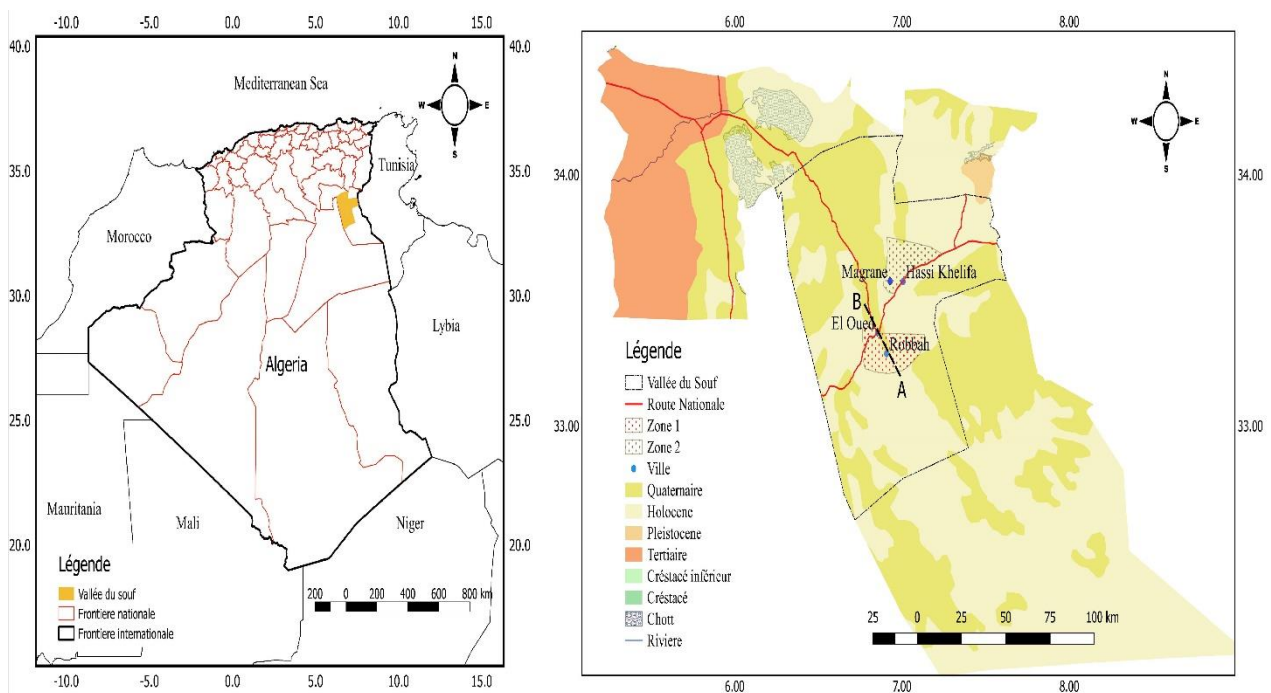


Figure 9 : Situation géographique de la Vallée du Souf

II. Topographie

La Vallée du Souf est caractérisée par un relief relativement homogène. La géomorphologie dominante dans cette vallée est de type Erg (Erg oriental) qui est représentée par des grandes dunes de sable au Sud et au centre de la vallée (Najah, 1971 ; Cote, 2002). Dans le Nord de cette vallée, les dunes disparaissent progressivement et laissent place aux étendues de sable gypseux à proximité de la zone des chotts (BNEDER, 2014).

L'altitude diminue du Sud vers le Nord de la vallée. Au sud, l'altitude varie entre 64 m et 120 m avec une moyenne de 80 m et une pente comprise entre 0,2% et 1,5% orientée du Sud au Nord (ANRH, 2005 ; Bouselsal, 2016). Au nord le relief est plus aplati, l'altitude moyenne est de 20 m, la pente du terrain est très faible avec une orientation vers les chotts (Guendouz et al., 2006).

III. Hydrogéologie

La Vallée du Souf appartient à la géologie de la plateforme saharienne et plus précisément à sa partie nord qui est frontalière avec la Tunisie. Les formations géologiques sont pratiquement toutes d'origine sédimentaire. En surface, seuls les terrains d'âge quaternaire et mio-pliocène sont présents. D'un point de vue hydrogéologique, le Souf s'inscrit dans le système aquifère du Sahara Septentrional (OSS, 2003). Il est connu par deux principaux aquifères ; le CI et le CT. En surface, la nappe phréatique, moins importante que les deux aquifères précédents (CI et CT) est logée dans les formations géologiques récentes et se trouve largement exploitée, en particulier, dans le secteur agricole. Les descriptions géologique et hydrogéologique de ces aquifères se résument, comme suit :

- Le CI

La nappe du CI est contenue dans les formations continentales du Crétacé inférieur (Barrémien et Albien) dont la lithologie est à dominance détritique (sable et grès), très peu carbonatée et argileuse. La nappe est captive et délimitée à la base par un substratum imperméable formé d'argiles du Néocomien et du Portlandien, vers le haut par un toit argileux et marneux du Cénomanién. Dans le Souf, l'épaisseur utile moyenne est de 400 m alors que sa profondeur moyenne est de 1700 m. Il s'agit d'un réservoir hydrogéologique important du Sahara puisque son extension dépasse les 600 000 Km². Outre, les grandes quantités d'eau stockées durant le Quaternaire, la qualité de cette ressource s'avère meilleure que celle des autres aquifères.

- Le CT

Le CT regroupe deux systèmes aquifères : la nappe des sables et la nappe des calcaires. A la base, nous avons la formation carbonatée qui est d'âge Sénono-Eocène alors qu'au sommet se rencontre la formation sablo-argileuse du Mio-Pliocène. Dans le Souf, le Mio-Pliocène est représenté par des sables et graviers attribués au Pontien avec une épaisseur moyenne de 50 m. Parfois, les deux aquifères sont en contact lorsque l'Eocène moyen lagunaire qui les sépare est complètement érodé.

- La nappe phréatique

Dans le Souf, l'aquifère superficiel attribué au quaternaire, objet de notre étude, est compris dans des dépôts sableux fins de type éolien dans lesquels, localement, sont intercalées des lentilles d'argiles sableuses et gypseuses. Les sables argileux sont localisés selon certains endroits en particulier vers la partie nord-est de la région. Nous dénotons l'existence d'une croûte sablo-gypseuse ou grésogypseuse, en surface, localisée vers le NE du Souf. La nappe est libre et les données de la prospection géophysique (ENAGEO, 1993) des forages montrent des épaisseurs variables allant de quelques mètres à quelques dizaines de mètres (figure 10). Sous cette couche sableuse, succèdent à des grés à ciments gypseux friables qui se biseautent et laissent place à des argiles sableuses. Le substratum imperméable est de nature argileuse et se situe vers une profondeur avoisinant les 60 m. Cette nappe représente une source principale en eau d'irrigation pour les palmeraies, exploitée

par plus de 30 000 points d'eau (MRE, 2017). La profondeur du substratum dans la région du Souf est comprise entre 50 et 90 m (ENAGEO, 1993). La circulation des eaux souterraines se fait du sud vers le nord. La perméabilité des couches sableuses est d'autant plus élevée que les fractions argileuses ou lentilles gypseuses sont peu importantes. La réalimentation de cet aquifère s'opère à partir des pluies torrentielles, les retours des eaux d'irrigation et de l'infiltration des eaux domestiques sous les zones urbaines. La CE de cette nappe varie entre 2700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 17000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Bouselsal and Belkesier, 2018).

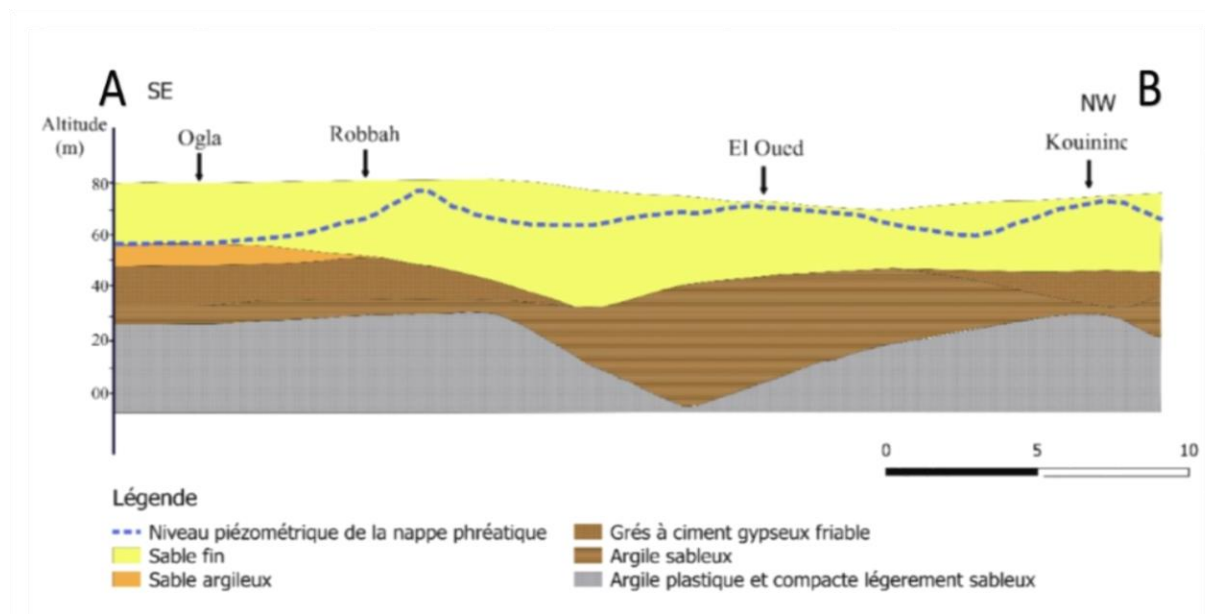


Figure 10 : Coupe hydrogéologique de la section A-B (Figure 9), modifiée de Bouselsal (2016)

IV. Climat

La Vallée du Souf est située dans la région du Sahara Septentrional, dans la wilaya d'El Oued gouvernée par un climat Saharien connu par les fortes températures et par la rareté des précipitations. La commune d'El Oued est située à 305 km de la mer méditerranéenne (Cote de Gabes en Tunisie), à 1100 km au Nord du tropique du Cancer et à 3700 km de l'Equateur.

La description des composantes climatiques est faite à partir des données climatiques prises par la station météorologique de Guemar (Tableau 18) pour une série de 25 ans (1990-2015).

Tableau 18 :Cordonnées de la station météorologique de Guemar

| Station | Latitude | Longitude | Altitude |
|-----------------|-----------|-----------|----------|
| Aéroport Guemar | 33° 30' N | 06° 47' E | 62 m |

Source : ONM (2015)

Les valeurs mensuelles des paramètres climatiques suivants : Précipitations (mm), Température minimale ($^{\circ}\text{C}$), Température maximale ($^{\circ}\text{C}$), Température Moyenne ($^{\circ}\text{C}$), Humidité relative (%), Vitesse du vent (m/s), Evapotranspiration (mm) et

Insolation (h/j) durant la période comprise entre 1990 et 2015 sont présentées dans le tableau 19.

Tableau 19 : Répartition mensuelle des précipitations durant la période 1990-2015

| Mois | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D |
|-----------------------------|------|------|------|-----|-----|------|------|------|-----|-------|------|------|
| P (mm) | 17,5 | 2,9 | 7,5 | 6,6 | 4,8 | 0,9 | 0,4 | 2,2 | 7,0 | 6,5 | 7,5 | 8,1 |
| T_{min} (C°) | 7,6 | 6,7 | 10,6 | 14 | 19 | 23,7 | 26,5 | 26,5 | 23 | 17,5 | 10,7 | 6,4 |
| T_{max} (C°) | 19,8 | 19,5 | 23,8 | 28 | 33 | 38,3 | 41,4 | 40,8 | 36 | 30,14 | 23,3 | 18 |
| T_{moy} (C°) | 13,8 | 12,9 | 17 | 21 | 26 | 31,2 | 34,1 | 33,7 | 29 | 23,5 | 16,6 | 11,6 |
| H (%) | 64 | 53 | 47 | 41 | 35 | 31 | 29 | 32 | 43 | 50 | 58 | 64 |
| V_v (m/s) | 2,2 | 2,7 | 3,3 | 4 | 4,2 | 4 | 3,5 | 3 | 2,9 | 2,3 | 2,3 | 2,2 |
| ETP (mm) | 41 | 67 | 122 | 169 | 222 | 244 | 257 | 231 | 170 | 111 | 59 | 38 |
| Insolation (h/j) | 7,6 | 8,5 | 8,6 | 9,4 | 10 | 11,2 | 11,5 | 10,9 | 8,9 | 8,2 | 7,8 | 7,2 |

Source : ONM (2015)

IV.1. Précipitations

D'après le tableau 19, la hauteur annuelle moyenne des précipitations est de 71,9 mm. Janvier est le mois le plus pluvieux avec 17,5 mm, tandis que le mois le plus sec est celui de juillet avec 0,4 mm. Ces résultats indiquent que les précipitations sont très faibles (inférieures à 100 mm) et la région est considérée comme une région aride (Dubief, 1965).

La distribution annuelle des précipitations montre une irrégularité au niveau de celle-ci et indique un régime saisonnier de type HAPE (Hiver-Automne-Printemps-Eté), avec la prédominance des précipitations d'hiver et d'automne.

IV.2. Températures

D'après le tableau 19, les températures moyennes mensuelles oscillent entre 11,6°C au mois de Décembre et 34,1°C au mois de juillet, la température moyenne annuelle est de 23°C. La température maximale correspond au mois de juillet avec 41,4°C tandis que la température minimale correspond au mois de décembre avec 6,4°C.

Ces températures indiquent que la région d'étude est soumise à un climat chaud en été, doux en hiver avec une amplitude thermique importante, surtout en hiver. Cette grande amplitude thermique fait l'une des caractéristiques du climat saharien est l'un des facteurs de la formation des sols par thermoclastie (Soleilhavoup, 1977).

IV.3. Humidité relative

L'humidité relative de l'air correspond au rapport entre la pression partielle de la vapeur d'eau contenue dans l'air sur la pression de vapeur saturante à la même température. Elle indique le contenu en vapeur d'eau de l'air par rapport à sa capacité maximale dans les mêmes conditions.

D'après le tableau 19, l'humidité relative est à sa valeur maximale (64%) durant le mois le plus pluvieux qui est le mois de janvier, puis elle diminue progressivement au mois le plus chaud et le plus sec qui est le mois de Juillet où elle atteint sa valeur minimale qui est 29%.

IV.4. Le vent

Les vents de direction Est et Nord-Est prédominent, puis à moindre fréquence ceux de direction Ouest et Sud-Ouest, caractérisés par le sirocco. Généralement c'est au printemps que les vents sont les plus forts, ils sont chargés de sables éoliens donnant au ciel une teinte jaune et peuvent durer jusqu'à trois jours consécutifs avec une vitesse allant de 40 à 50 Km/h (Bouselsal, 2016). Le vent provoque une augmentation de l'ETP et un assèchement des sols, surtout les vents chauds.

D'après le tableau 19, la vitesse du vent est plus importante à la fin du printemps et début d'été où elle atteint 4,2 m/s. Durant les mois pluvieux, la vitesse du vent est plus faible, elle atteint la valeur la plus faible aux mois de décembre et janvier avec une valeur de 2,2 m/s.

IV.5. Evapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration potentielle est un paramètre important dans la gestion de l'irrigation des cultures, il permet d'identifier la demande climatique dans la région étudiée.

D'après le tableau 19, l'évapotranspiration est très forte dans la région du Souf, elle atteint 1731 mm/année. Les valeurs les plus importantes correspondent au mois de juillet (257 mm) qui est le mois plus chaud et le plus sec. Cependant la valeur la plus faible correspond au mois de décembre avec 38 mm.

IV.6. Insolation

D'après le tableau 19, l'insolation journalière dans la région d'étude est forte, elle varie entre 7,2 h/j au mois de décembre et 11,5 h/j au mois de juillet avec une moyenne annuelle de 9,2 h/j. L'insolation représente un potentiel énergétique important mais elle intensifie le phénomène de l'évaporation et augmente les besoins en eau des cultures.

IV.7. Synthèse climatique

IV.7.1. Diagramme ombro-thermique de Gaussen

Le diagramme ombrothermique de Gaussen (Gaussen et Bagnouls, 1952) est l'une des méthodes les plus utilisées pour la caractérisation d'un climat. Ce diagramme tient compte des températures (T en °C) et des précipitations (P en mm) pour la détermination de la période sèche durant laquelle $P < 2T$. La figure 11 qui présente le

diagramme ombrothermique pour la station de Guemar durant la période 1990-2015, montre que la période sèche s'étale sur toute l'année.

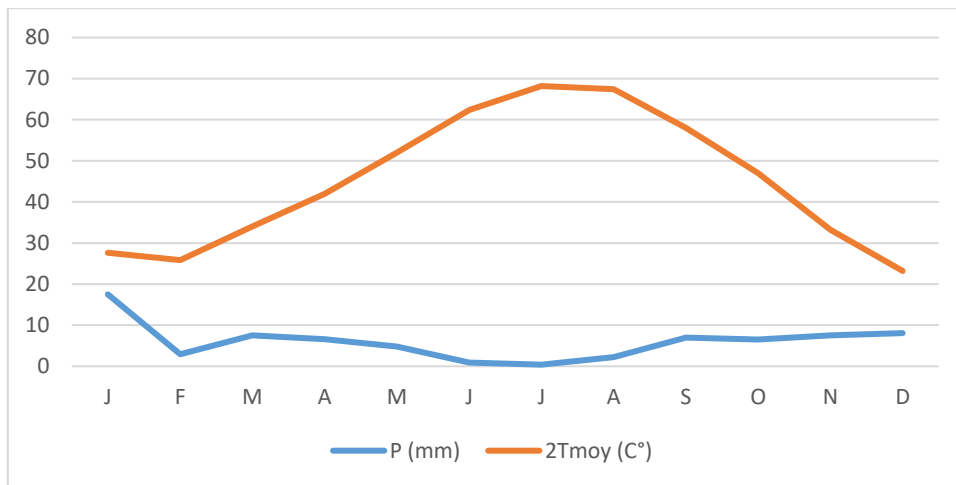


Figure 11 : Diagramme Ombro-thermique de la région d'étude

IV.7.2. Diagramme d'Emberger

La projection du quotient pluviométrique d'Emberger (1955), calculé par l'équation 6 sur le diagramme présenté dans la figure 12 permet de déterminer le type de climat d'une région. Ce quotient (Q) est calculé à partir de la précipitation moyenne annuelle, température du mois le plus froid et la température maximale du mois le plus chaud.

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

Q : Quotient d'Emberger

P : Pluviométrie annuelle (mm)

M : Moyenne des maximas du mois le plus chaud

m : Moyenne des minimas du mois le plus froid

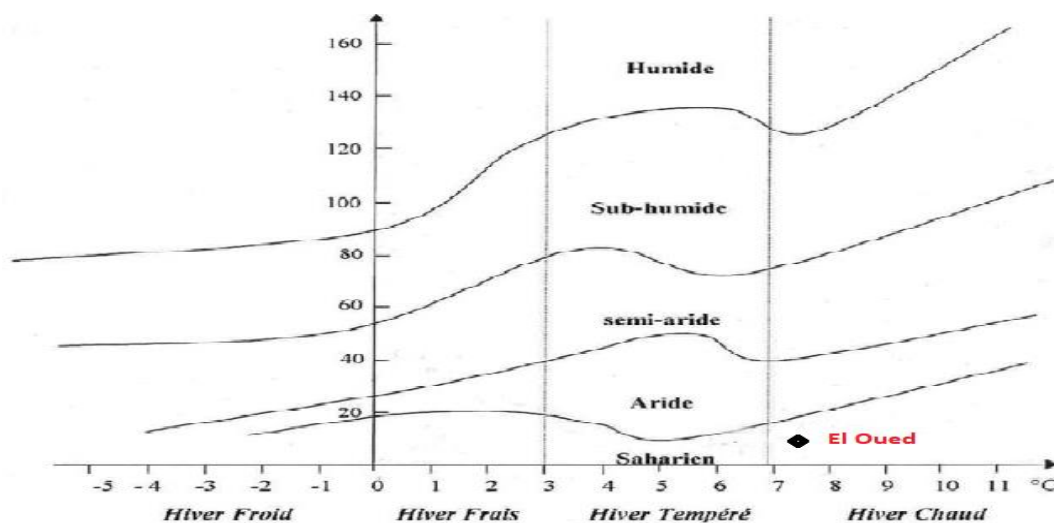


Figure 12 : Diagramme d'Emberger de la région d'études

La valeur calculée du quotient d'Emberger est égale à 7,2. D'après la figure 12, la valeur précédente indique que la région d'El Oued appartient à l'étage climatique Saharien.

V. Etat des lieux de l'Agriculture dans la Vallée du Souf

La vallée du Souf est considérée comme un pôle agricole et parmi les régions les plus productrices à l'échelle nationale. Auparavant, l'agriculture dans cette vallée s'est limitée uniquement à la phoeniculture traditionnelle pratiquée dans des petites oasis ayant des surfaces entre 0,5 à 1 hectares appelées Ghout (Cote, 2006).

Depuis le début des années 90, suite à l'émergence des techniques d'irrigation sous pression (pivot artisanal), une nouvelle agriculture prend place dans cette vallée et suscite l'intérêt de la population locale et des investisseurs à l'échelle nationale (Ould rebai, 2017).

V.1. Systèmes agraires de la Vallée du Souf

V.1.1. Agriculture oasienne

Dans la Vallée du Souf l'agriculture oasienne existe depuis des siècles. La naissance de ces oasis au milieu du désert grâce à un système d'irrigation ingénieux appelé Ghout, considéré comme le seul système d'irrigation algérien inscrit dans la liste SIPAM (FAO, 2011). Cette technique endémique consiste à creuser des dépressions d'une surface comprise entre 0,5 ha à 1 ha, par le transport du sable sur le dos des paysans (Rammal) ou à l'aide des ânes (Remini, 2019). La plantation du palmier (culture de base) dattier dans le Ghout lui permet de puiser l'eau directement de la nappe phréatique, se trouvant à une très faible profondeur. Le palmier dattier sert aussi comme un ombrage pour d'autres cultures vivrières (cultures maraichères et céréalières irriguées par des puits artisanaux) ainsi qu'aux étables d'élevage (caprin et ovin).

Cependant, ce système agraire oasien est très sensible face aux fluctuations de la nappe phréatique provoquées par l'exploitation des nappes profondes pour l'irrigation et pour l'AEP. Au début des années 90, le nombre de Ghouts inondés par la remontée des eaux s'élevait à 500. Actuellement, sur les 9562 Ghouts de la vallée du Souf, 915 sont inondés, 2100 sont humides et plusieurs deviennent des décharges sauvages (Boumaada et al., 2021). La DSA (2018) compte près de 1500 hectares réellement cultivés par ce système agraire dans la Vallée du Souf.



Figure 13 : Système oasien de type Ghout dans la Vallée du Souf (FAO, 2011)

V.1.2. Agriculture conventionnelle

V.1.2.1. Phoeniciculture moderne

La phoeniciculture conventionnelle est apparue à El Oued durant l'époque coloniale (début des années 50) après la réalisation du premier forage profond dans la région de Houba au nord de la vallée, dans le cadre du CAPER (Bataillon, 1960).

Depuis, les palmeraies modernes (monoculture) ont connu une grande extension avec le développement des techniques d'irrigation (séguia en plâtre, techniques d'irrigations sous pression) encouragées par les programmes étatiques pour la promotion de l'agriculture saharienne durant les années 70, 80 et au début des années 2000 (Messae, 1996 ; Chreit et al., 2012). Actuellement la wilaya d'El Oued compte 37,000 ha de palmeraies et près de 4 millions de palmiers dattiers, dont 2,7 millions appartiennent à la variété Deglet Nour (DSA, 2018).

V.1.2.2. Cultures maraichères

Auparavant, les cultures maraichères occupaient une importance mineure, cultivées dans de petits carrés entre les palmiers et qui servent comme cultures vivrières. Ce n'est qu'au début des années 90 que sont apparues les premières parcelles de pomme de terre, irriguées par des techniques artisanales conçues à partir du recyclage des grands pivots mis en place lors du programme de mise en valeur des régions Sahariennes (PNDA).

La création du pivot artisanal au milieu des années 90 par un artisan de la région de Ghamra au nord du Souf a été comme le facteur propulsant de l'agriculture maraichère dans la Vallée du Souf, grâce à son adaptation aux conditions biophysiques et socioéconomiques de la région (Bioud, 2017). Depuis, les cultures maraichères sont passées d'une surface inférieure à 5000 ha en 1999 à près de 50000 ha en 2018, soit une multiplication par 10 (DSA, 2018).

Actuellement, la vallée du Souf devient un pôle de maraichage par excellence et participe en grande partie à la production nationale, soit 1,13 millions de tonnes de pomme de terre (30%

de la production nationale) cultivée jusqu'à 3 saisons par année (DSA, 2018). Le tableau 20 présente les principales cultures maraichères de la wilaya d'El Oued.

Table 20 : Surfaces et productions des principales cultures maraichères dans la wilaya d'El Oued

| | 2003 | | 2018 | |
|----------------|-----------------------|----------------|-----------------------|----------------|
| | Surface cultivée (ha) | Production (q) | Surface cultivée (ha) | Production (q) |
| Pomme de terre | 2563 | 568880 | 36200 | 11360000 |
| Tomate | 276 | 37450 | 3130 | 2163100 |
| Ail | 424 | 19800 | 1800 | 180000 |
| Oignon | 862 | 172150 | 1520 | 446250 |

Source : (DSA, 2018)

V.2. Techniques d'irrigation dans la vallée du Souf

Actuellement la wilaya d'El Oued dispose d'une surface équipée de 100 000 ha, dont 60 000 ha localisés dans la vallée du Souf (MRE, 2017 ; DSA, 2018). Cette surface totale équipée est alimentée ainsi : 25 000 ha alimentés par 520 forages des aquifères CT et CI, tandis que 75 000 ha sont alimentés par 38 000 puits qui s'alimentent de la nappe phréatique.

Les techniques d'irrigations les plus utilisées dans la wilaya d'El Oued sont : l'aspersion avec 39 235 (37,2%) ha dont le pivot artisanal couvre près de 37 000 ha, le gravitaire avec 32 534 ha (32,5%) et le goutte à goutte 28 231 ha (28,2%). Cependant dans la vallée du Souf, l'aspersion est la technique d'irrigation la plus utilisée (60% de la surface équipée) suivie par le goutte à goutte (31,5% de la surface équipée), tandis que la séguia occupe une place minime avec 8,5% de la surface équipée de la vallée.

Le choix de la technique d'irrigation dépend des conditions biophysiques ainsi que la culture pratiquée. La technique d'irrigation avec pivot central conventionnel a échoué dans la région durant les années 80 à cause de la topographie dunaire de la région, ainsi qu'à la non maîtrise de la technologie par les agriculteurs de la région (Bouaziz et al., 2018).

Chapitre 3 :

Matériels et méthodes

I. Démarche générale de l'étude

La salinisation des sols est un phénomène dépendant de plusieurs facteurs liés au milieu naturel ainsi qu'à des facteurs anthropiques. Puisque ce phénomène est très peu étudié dans la vallée du Souf, il fallait orienter notre étude sur les trois volets principaux :

- L'état des lieux de l'irrigation et de la salinisation des sols dans la vallée du Souf
- La caractérisation hydro-chimique de l'eau d'irrigation
- L'étude de l'impact de l'irrigation sous pression sur les propriétés physicochimiques du sol

Pour bien analyser ces trois aspects, notre l'étude a été réalisée en trois parties, dont les résultats de chaque partie servent à la conception de la suivante:

- Enquête qualitative qui décrit l'état des lieux de l'irrigation dans la région d'études et qui identifie le problème étudié, son ampleur et ses conséquences sur le sol et les cultures,
- Campagne d'analyse de l'eau d'irrigation, sa composition chimique et l'évaluation des risques de la salinisation secondaire des sols,
- Etude de l'évolution des propriétés physicochimiques d'un sol irrigué avec différentes techniques d'irrigation sous pression.

La figure 14 présente un schéma général du déroulement de l'étude et les relations entre les différentes étapes de l'étude.

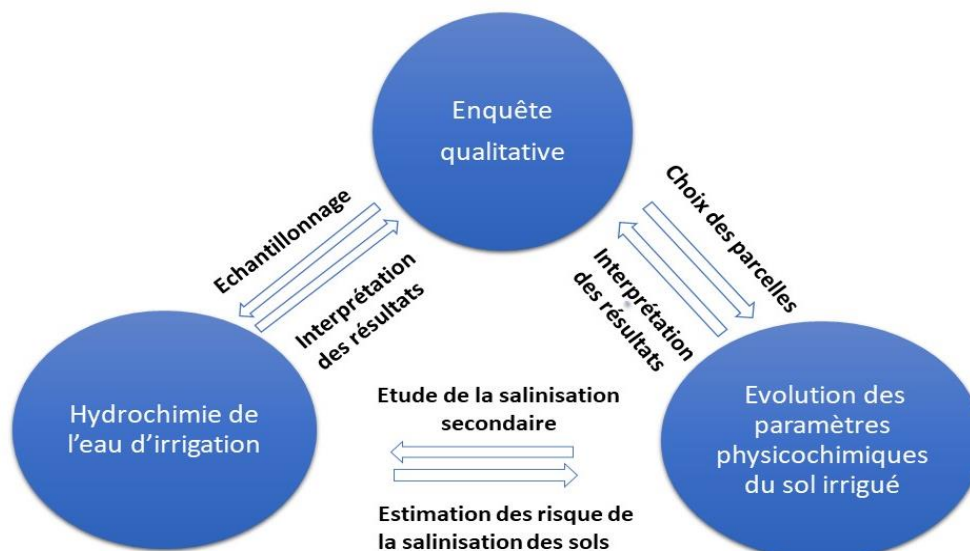


Figure 14 : Démarche générale de l'étude

Les trois parties de l'étude sont liées par une relation de continuité. Les résultats de chaque partie serviront à la planification et à la conception de l'étape suivante, à l'interprétation où la confirmation de l'hypothèse posée dans la partie précédente. Dans la suite de ce chapitre nous présenterons chaque partie de l'étude, sa méthodologie et les matériels utilisés.

II. Méthodologie de l'enquête

Pour l'identification du problème de la salinisation des sols dans la Vallée du Souf, sa localisation géographique ainsi que ses causes et ses conséquences, nous avons procédé à deux enquêtes qualitatives où les résultats de la première enquête ont servi à la conception de la deuxième.

II.1. Première enquête

La première enquête est menée avec les acteurs du secteur de l'eau et de l'agriculture afin de faire l'état des lieux et l'historique de l'irrigation dans la vallée du Souf. Les entretiens de cette enquête sont effectués avec les responsables des services de forages et de l'hydraulique agricole administrés par la DRE de la wilaya d'El Oued. Les responsables des services de mise en valeur des terres et des statistiques agricoles administrés par la DSA de la wilaya d'El Oued, les deux responsables du laboratoire d'analyse de l'eau de l'ADE de la wilaya d'El Oued et du Laboratoire privé FATILAB qui est très fréquenté par les agriculteurs d'El Oued. Le schéma général et les objectifs visés par chaque entretien sont présentés dans la figure 15.

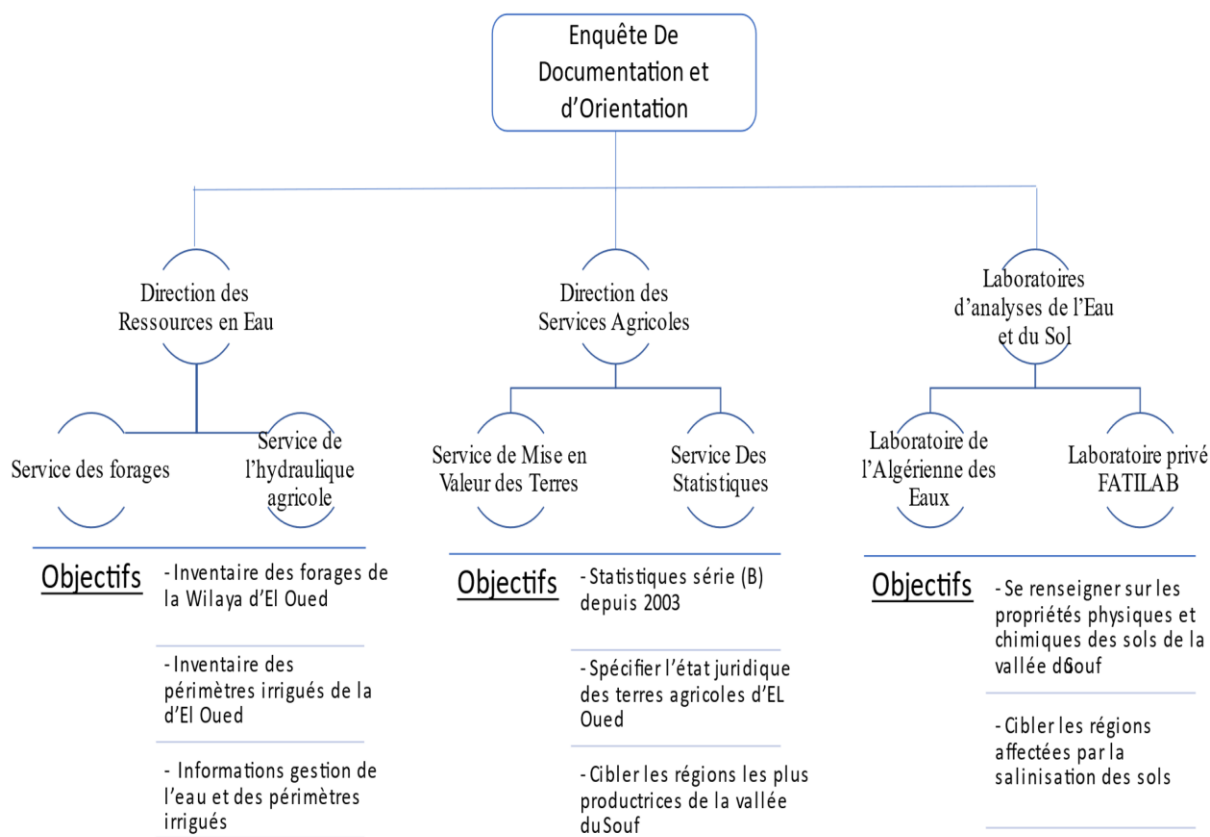


Figure 15 : Conception de la première enquête

II.2. Deuxième enquête

La deuxième enquête a été conçue en se référant aux objectifs de notre étude et par rapport aux résultats acquis lors de la première enquête. Deux régions ont été sélectionnées pour faire l'objet de la deuxième enquête. La première région comprend les périmètres irrigués situés au sud de la vallée du Souf (communes de Robbah, El Bayada et El Ogla), la deuxième région regroupe les périmètres irrigués situés au nord de la vallée du Souf (communes de Hassi Khalifa et Margane). Le facteur commun entre les deux régions est leurs vocations agricoles tandis que les facteurs distincts de ces deux régions sont : la topographie du milieu, la texture du sol, les proportions entre les techniques d'irrigation utilisées et les cultures pratiquées. Cette deuxième enquête est partagée en deux volets : le premier concerne le volet hydrotechnique et le deuxième porte sur le volet agricole.

II.2.1. Volet hydrotechnique

Le volet hydrotechnique de la deuxième enquête est orienté essentiellement sur les systèmes d'irrigation utilisés de chaque région (forages et matériel d'irrigation). Les différents entretiens ont été effectués avec des techniciens et ingénieurs de chaque région ayant une expérience supérieure à 5 ans dans leur profession. Le schéma de cette partie de l'enquête ainsi que les objectifs de chaque entretien sont présentés dans la figure 16.

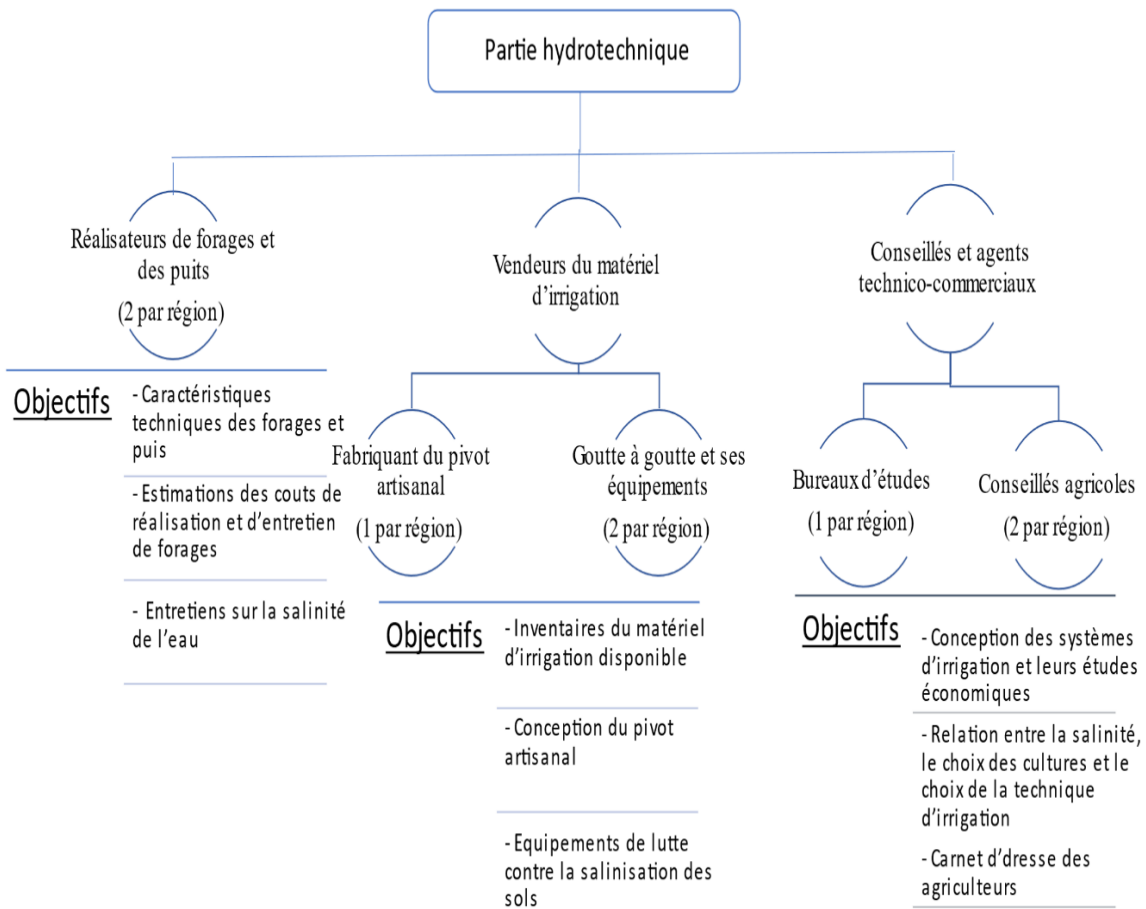


Figure 16 : Conception de deuxième l'enquête (partie hydrotechnique)

II.2.1. Volet agricole

La partie agricole de la deuxième enquête se focalise essentiellement sur l'impact de la salinisation sur le rendement des cultures, la gestion de l'irrigation dans les sols affectés par ce phénomène ainsi que le rôle de la technique d'irrigation dans la préservation des sols vis-à-vis de la salinité.

Le tableau 21 présente les critères de choix et les différentes classes de la population enquêtée dans chaque région. La population enquêtée est formée d'agriculteurs, pris au hasard raisonné en combinant deux critères (facteurs) : le premier facteur est la technique d'irrigation utilisée par l'enquêté (pivot artisanal, goutte à goutte et pivot + Goutte à goutte), le deuxième facteur est l'ancienneté de l'exploitation.

Tableau 21 : Population d'agriculteurs concernés par la deuxième enquête

| | | Facteur 1 : Technique d'irrigation | | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|-----------------|-------------------------|-------|
| | | Pivot artisanal | Goutte à goutte | Pivot + goutte à goutte | Total |
| Facteur 2 : Age de l'exploitation | Nouvelle exploitation (<5ans) | 3 | 3 | 3 | 9 |
| | Ancienne exploitation (>5 ans) | 3 | 3 | 3 | 9 |
| | Total | 6 | 6 | 6 | 18 |

III. L'analyse de l'eau

L'eau souterraine est associée dans certains cas à une salinité élevée et elle représente la cause majeure de la salinisation des sols, surtout dans les régions arides et semi arides (Qadir et al., 2014). Le dépôt des sels dans les couches superficielles du sol est accentué par la rareté des pluies et par l'évaporation intense. D'autres facteurs anthropiques s'y ajoutent dans le cas de l'agriculture intensive à cause de la gestion des ressources naturelles à court terme (Shahid et al., 2013). Cette partie de la thèse a pour objectif de caractériser les propriétés physicochimiques de la nappe phréatique du Souf, évaluer sa qualité pour l'irrigation et estimer les risques sur le sol et le rendement des cultures.

La gestion durable de l'irrigation dans les régions arides exige l'évaluation de la qualité de l'eau utilisée, la connaissance de son statut hydrochimique ainsi que l'étude des processus géochimiques qui agissent sur cette ressource (Iqbal et al., 2018).

III.1. L'échantillonnage

Deux zones agricoles ont été sélectionnées pour l'échantillonnage (Figure 17). La première zone est située au sud de la vallée, elle comprend les trois périmètres irrigués appartenant à trois communes (El Biadha, Robbah et El Ogla). La deuxième

est localisée au nord-est de la vallée (Figure 17), elle comprend deux périmètres irrigués localisés dans deux communes (Hassi Khelifa et Magrane).

On a procédé à un échantillonnage de 36 points d'eau (forages et puits) au total réparti entre la première zone (18 échantillons) et la seconde (18 échantillons). Tous les points d'eau captent la nappe phréatique à différentes profondeurs et sont utilisés en permanence pour l'irrigation. La profondeur de ces forages et puits varie entre 20 m et 42 m tandis que leurs débits de pompage varient entre 15 et 32 m³/h. La période d'échantillonnage et d'analyses est comprise entre le 1^{er} et le 21 janvier 2019.

Les coordonnées des forages sont prises grâce au système GPS (Global Positioning System) et la profondeur de l'eau dans le puits est mesurée par la sonde électrique. Ensuite, les échantillons sont pris dans un récipient en polyéthylène rincé à l'eau distillée et rempli à ras bord afin de ne pas laisser des bulles d'air à l'intérieur. Les échantillons sont transportés au laboratoire dans une glacière à une température inférieure à 4°C durant une période inférieure à 24 h. Pour avoir des échantillons d'eau représentatifs de la nappe, nous avons procédé à un pompage de 30 minutes avant la prise de l'échantillon.

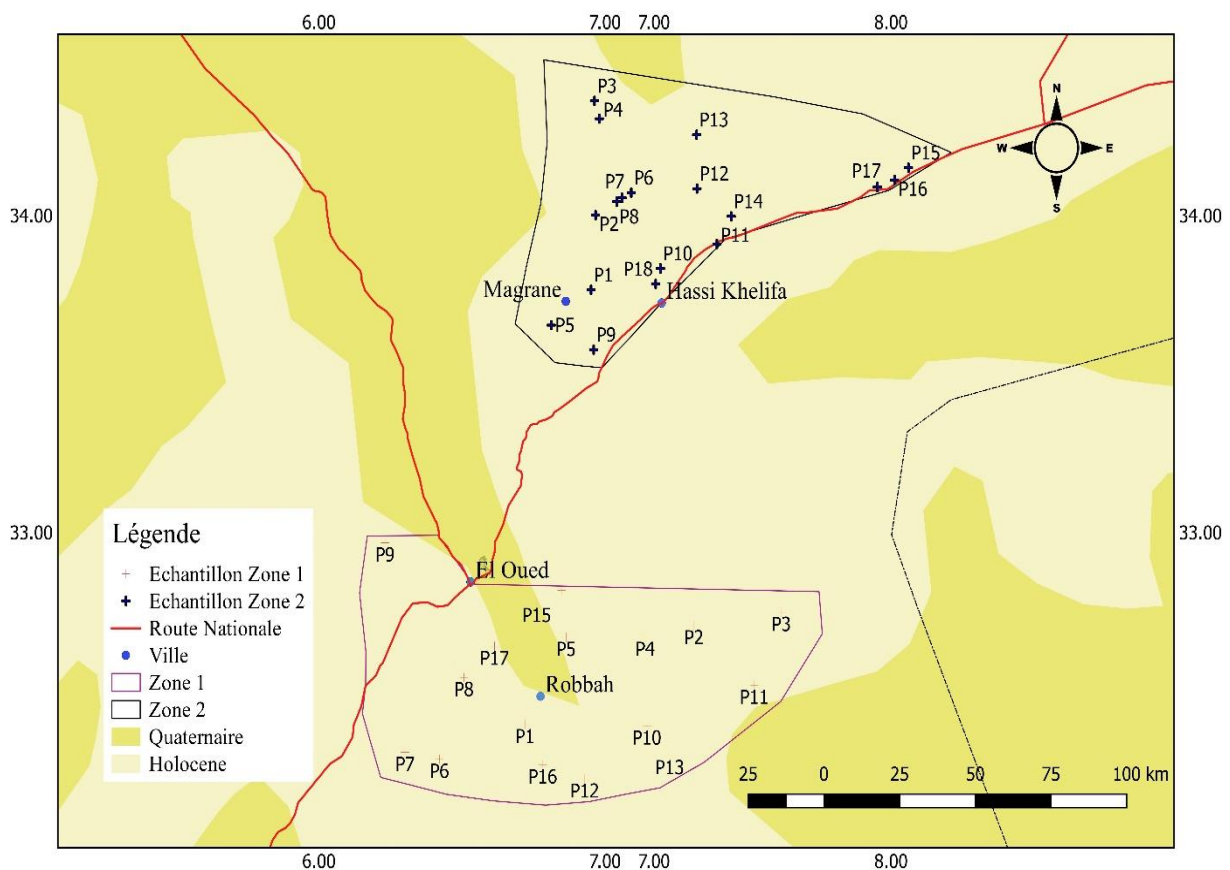


Figure 18 : Zones d'échantillonnage et positions des échantillons

III.2. L'analyse et le traitement des résultats

Les mesures de CE, du pH et de la température de l'eau sont faites in-situ après trois essais par un multi paramètres (Hanna HI 991301). Les concentrations des ions majeurs sont mesurées au laboratoire de l'Algérienne des Eaux situé dans la Ville

d'El Oued selon les méthodes adoptées par l'Association Américaines de la Santé Publique (Eaton et al., 2005). Les concentrations des ions calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}), bicarbonate (HCO_3^-), et chlorure (Cl^-) sont mesurées par la titration volumétrique. Celles du sodium (Na^+) et du potassium (K^+) sont mesurées par un photomètre à flamme. Cependant, celles des Sulfates (SO_4^{2-}) et des Nitrates (NO_3^-) sont mesurées par un spectrophotomètre.

III.3. L'interprétation

Les faciès chimiques des échantillons analysés sont déterminés par leurs projections sur le diagramme de Piper (1953), les processus géochimiques qui influencent les eaux de cette nappe sont déterminés par la projection des échantillons analysés sur le diagramme de Gibbs (1970). Les interactions des eaux avec le milieu géologique sont étudiées par les indices de saturations (SI) des différents minéraux (Li et al., 2016), ainsi que par les indices chloro-alcalins CAI-1 et CAI-2 proposés par Schoeller (1965). La qualité de l'eau pour l'irrigation est évaluée par les indicateurs suivants : Na %, MH %, PS, CE, SAR, TH, Cl^- ainsi que la projection des résultats sur les diagrammes de Riverside et Wilcox (Ali et al., 2020 ; Amiri et al., 2021).

IV. Evolution des paramètres physico-chimiques du sol

L'évolution de l'état physicochimique des sols irrigués est étudiée à l'échelle d'une exploitation représentative de la région d'étude. Le prélèvement et l'analyse des échantillons des sols irrigués avec les deux différentes techniques d'irrigation et pour différentes périodes permet de caractériser l'évolution de la salinité du sol et d'étudier l'effet de la technique d'irrigation sur la salinité du sol.

IV.1. Présentation de l'exploitation

L'exploitation Messaoudi Laid présentée dans la figure 18 est localisée dans la commune de Magrane, dans le périmètre irrigué d'El Oued El Maleh. Cette exploitation agricole se trouve à 11 km de distance du chef-lieu de la commune de Magrane et à 33 km de la ville d'El Oued.

Le choix de cette exploitation comme site expérimental est fait selon des critères ci-dessous, préalablement fixés afin de répondre aux objectifs de notre étude :

- Surface suffisante afin de procéder à l'échantillonnage sur différentes parcelles
- L'utilisation des deux techniques d'irrigation sous pression (le goutte à goutte et le pivot artisanal)
- Une nouvelle exploitation et qui possède des parcelles irriguées durant 1 année, 2 ans
- La salinité de l'eau est proche de la salinité moyenne de la région d'études
- La possibilité de l'accès permanent à l'exploitation

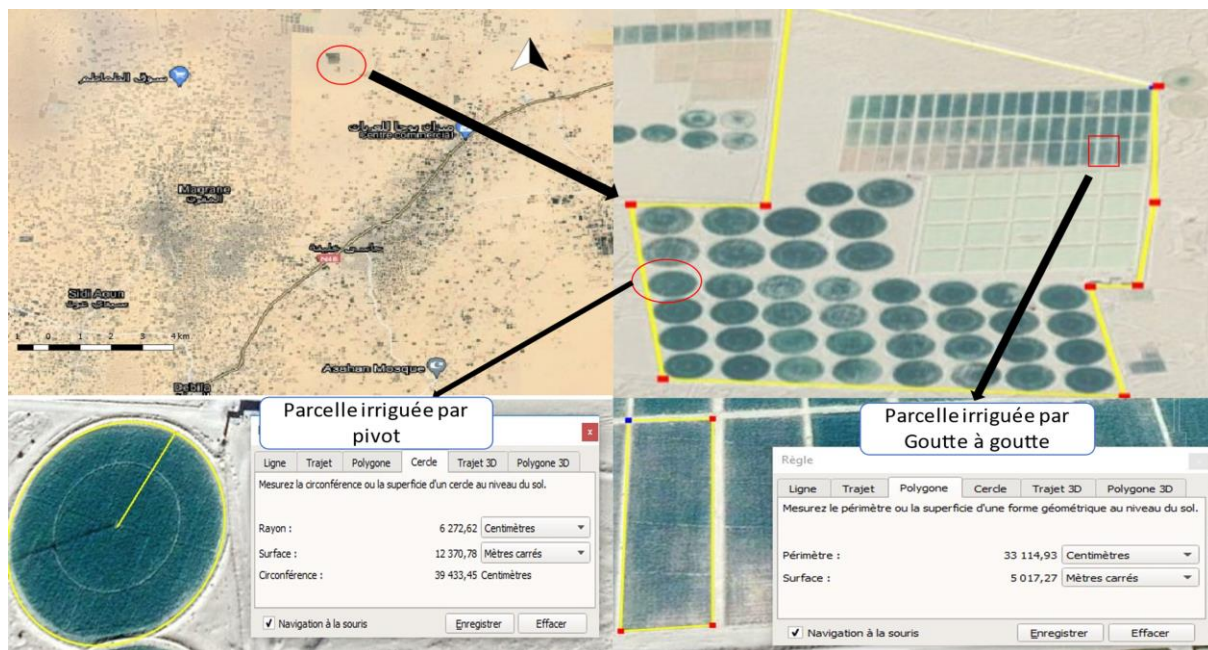


Figure 19: La position et le plan de l'exploitation Messaoudi et Frères (Google Imagery, WGS 84)

Cette exploitation dispose de 46 parcelles-pivot et 54 parcelles Goutte-à-Goutte destinées à la monoculture de la pomme de terre. Lors de l'échantillonnage, 16 pivots et 39 parcelles de Goutte à Goutte sont à leur deuxième année et les autres parcelles ont servi pour une seule année. Le tableau 22 présente une fiche technique de l'exploitation choisie comme site expérimental.

Tableau 22 : Fiche technique de l'exploitation Messaoud

| Mode de faire valoir | Concession d'investissement | |
|-----------------------------------|-------------------------------|--------------------|
| Nom du propriétaire | Messaoudi Laid | |
| Situation géographique | Commune | Magrane |
| | Wilaya | El Oued |
| Cordonnées | X | 6.9747 |
| | Y | 33.6497 |
| | Z | 37 m |
| Surfaces | Surface Totale | 182 ha |
| | Surface cultivée | 103 ha |
| | Surface équipée | 103 ha |
| Techniques d'irrigation utilisées | Goutte à goutte | 27 ha |
| | Pivot artisanal | 56 ha |
| | GAG sous serre | 20 ha |
| Forages | 45 forages (Nappe phréatique) | |
| Cultures pratiquées | Plein champs | Pomme de terre |
| | Sous serre | Tomate et pastèque |

V.2. Mise en place du protocole expérimental

Afin d'étudier l'évolution des propriétés physico-chimiques des sols sous les deux techniques d'irrigation, nous avons sélectionné 4 parcelles irriguées par deux forages ayant des propriétés hydrochimiques similaires. Les 4 parcelles sont présentées dans la figure 19, les parcelles GAG 1 et Pivot 1 sont à leur première année tandis que les parcelles GAG 2 et Pivot 2 sont à leur deuxième année. Les témoins 1 et 2 sont pris comme référence pour comparer les résultats à l'état d'un sol non irrigué.

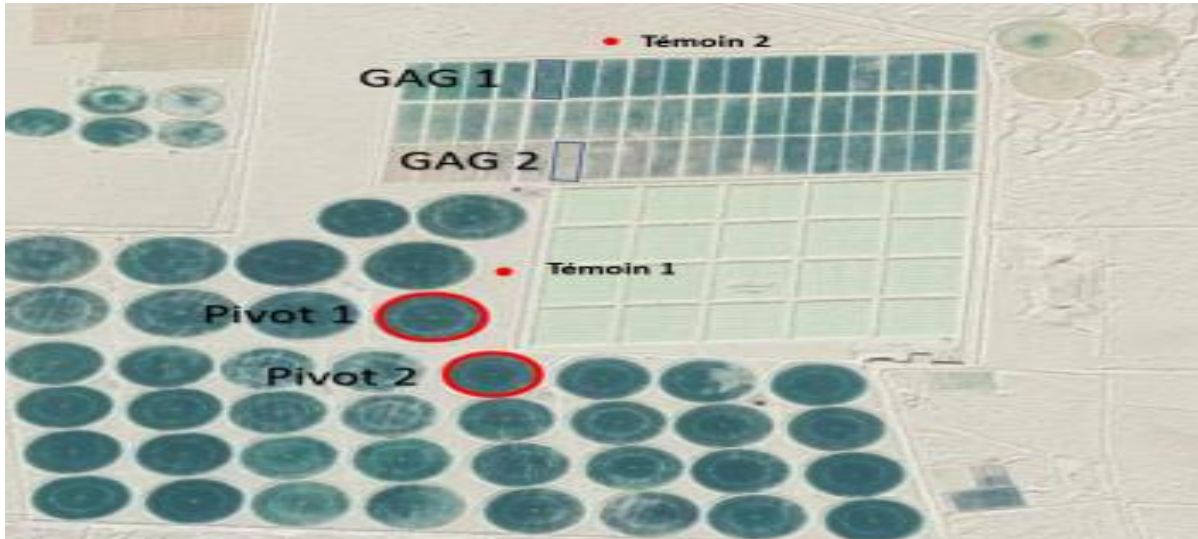


Figure 20 : Position des parcelles expérimentales

V.2.1. Etude hydrotechnique des parcelles

V.2.1.1. Indicateurs techniques

Les indicateurs techniques sont liés aux dimensions, matériaux, consommation d'énergie des différentes composantes des deux systèmes d'irrigation, du forage jusqu'aux diffuseurs d'eau.

V.2.1.2. Indicateurs hydrauliques

Les indicateurs sont les mesures liées à la circulation de l'eau dans les conduites et sa diffusion sur la parcelle. Les indices de circulation : Débit, Section et pression sont mesurés respectivement par : la méthode volumétrique (calcul du temps nécessaire pour le remplissage d'un récipient à volume connu), le manomètre, le pieds à coulisse. Les indicateurs de l'uniformité de l'irrigation sont mesurés par les protocoles expérimentaux présentés en Annexe 1 et Annexe 2, respectant la méthode ISO 11545 pour le pivot et le protocole Cemagref (1992) pour le goutte à goutte.

- L'uniformité de l'irrigation par pivot est calculée par le coefficient de Christiansen (1942) présenté par l'équation 7.

$$CU (\%) = 100 \times \left[1 - \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\|hi-hm\|}{hm} \right] \quad (7)$$

CU (%) = Coefficient d'uniformité

hi= hauteur d'eau ou pluviométrie au niveau du collecteur « i » (mm)

hm= hauteur d'eau ou pluviométrie moyenne appliquée sur la zone arrosée (mm)

n= nombre de collecteurs (pluviomètres)

- L'uniformité de l'irrigation par goutte à goutte est calculée par le coefficient d'uniformité Cemagref (1990), calculé par l'équation 8.

$$CU (\%) = (Q_{\min} // Q_{\text{moy}}) \times 100 \quad (8)$$

CU % = Coefficient d'uniformité ;

Qmin = Moyenne des quatre débits les plus faibles ;

Qmoy = Moyenne des débits mesurés (16 valeurs).

V.2.2. Echantillonnage et analyse du sol

L'échantillonnage du sol a été fait en deux campagnes, la première début septembre 2019 (J7 de la culture) et la deuxième à la fin de décembre 2019 (J110 de la culture). Le plan d'échantillonnage est composé de 4 points de prélèvements pour chaque parcelle, dont chaque point de prélèvement est formé de 9 échantillons de sol remanié, et 3 échantillons de sol non-remanié (pour la mesure de la porosité). Au total 36 échantillons de sol remanié et 9 échantillons de sol non-remanié sont pris pour chaque parcelle à chaque campagne d'échantillonnage.

Pour le pivot artisanal les points de prélèvements ont été choisis par la combinaison de deux variables : le rayon et l'angle. Pour la parcelle GAG, les points ont été choisis par la combinaison des deux variables X et Y. Des distances égales à 10% du rayon du pivot, de la largeur et de la longueur de la parcelle GAG qui séparent les points périphériques afin d'éviter l'effet de borne. Les positions des points de prélèvements sont présentées dans la figure 20.

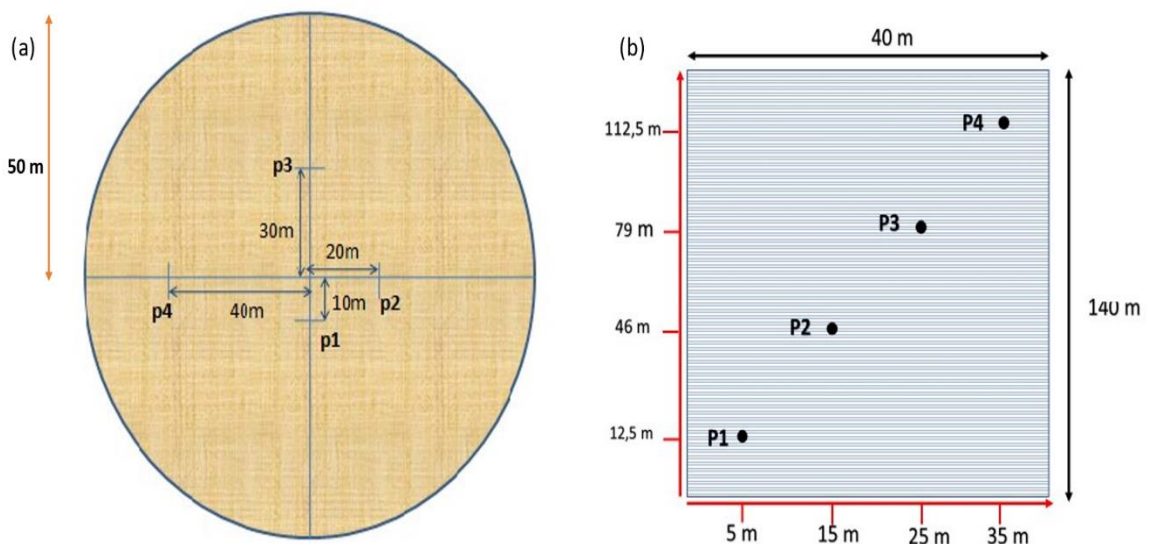


Figure 21 : Position des points de prélèvementS du sol pour les parcelles pivot (a) et pour les parcelles goutte à goutte

Pour le sol remanié, chaque point présenté sur la figure 20, est composé d'une matrice de 9 échantillons répartis selon la profondeur et l'axe perpendiculaire aux sillons. Trois profondeurs qui représentent de la petite à la plus grande : la zone de surface, la zone racinaire et la zone sous-racinaire. Trois positions axiales : -25 cm qui représente le billon 1, 0 qui représentent le sillon, +25 qui représente le billon 2. La figure 21 présente la position des échantillons dans un point de prélèvement. Les échantillons ont été prélevés 24 h après l'irrigation, soigneusement à l'aide d'une tarière. Les échantillons sont transportés dans un sac en polyéthylène au laboratoire dans une durée inférieure à 3 jours.

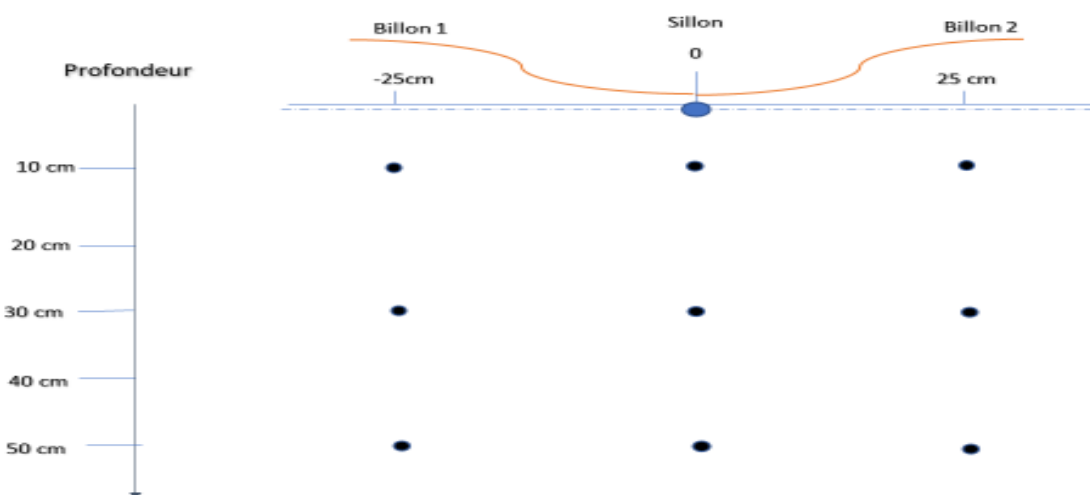


Figure 22: Coupe transversale d'un point de prélèvement du sol

Pour le sol non-remanié, chaque point de prélèvement est composé de 3 échantillons à trois différentes profondeurs : 10 cm, 30 cm et 50 cm. Les échantillons sont pris à l'aide des cylindres de burger : 63 mm de diamètre et 80 mm de hauteur.

V.2.3. Méthodes d'analyses

V.2.3.1. Paramètres chimiques

Les échantillons du sol sont séchés à l'air libre durant 48 h, puis tamisés à l'aide d'un tamis de 2 mm de diamètre. Les analyses du sol sont effectuées au niveau du laboratoire du CRSTRA (Centre de Recherche Scientifique et Technique des Régions Arides). L'extrait aqueux (1/5) est préparé sur un agitateur à plateau pour une durée d'1 h d'agitation. Les ions : Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , Cl^- sont analysés par titrimétrie. Les ions Na^+ et K^+ sont analysés par un photomètre à flamme. Les ions SO_4^{2-} sont analysés par un spectrophotomètre. La conductivité électrique et le pH sont mesurés par un multi paramètre de laboratoire (Hanna HI83303).

V.2.3.2. Paramètres physiques

- La porosité (P%) :
Elle est calculée par l'équation 11, à partir des valeurs de la densité apparente (D_a) et la densité réelle (D_r).

- La Densité apparente (D_a) :

$$D_a = \frac{m_{\text{sec}}}{V_{\text{tot}}} \quad (9)$$

m_{sec} (g) = poids du sol en place séché à 105°C durant 48 h.

V_{tot} = volume du sol et des pores (ml), il correspond au volume du cylindre

- La Densité réelle (D_r) :

$$D_r = \frac{M_{\text{sec}}}{V_{\text{sol}}} \quad (10)$$

m_{sec} (g) = poids du sol en place séché à 105°C durant 48 h.

V_{sol} = volume des particules solides (ml),

- La Porosité totale (P) :

$$P (\%) = \frac{D_r - D_a}{D_r} \times 100 \quad (11)$$

- Infiltration

L'infiltration est mesurée in situ par la méthode du double anneau, suivant la norme ASTM D3385-09. Pour des intervalles de temps allant de 30 secondes au début de l'opération à 5 min à la fin de l'opération, la durée totale de l'opération est 2 h. Les mesures de l'infiltration sont effectuées sur 4 points (même position que les points de prélèvement du sol) pour chaque parcelle au début de la saison et avant la récolte. La vitesse d'infiltration est calculée par l'équation 12.

$$V_{\text{in}} (\text{mm /s}) = \frac{h_0 - h_i}{d_i} \quad (12)$$

V_{in} (mm/s) = Vitesse d'infiltration en mm/s ;

h_0 (mm) = lame d'eau initiale ;

h_i (mm) = lame d'eau après infiltration ;

d_i (s) = intervalle de temps en secondes.

V.2.4. Méthodes d'interprétation

V.2.4.1. Lecture des résultats

- Conversion de CE_e à $CE_{1/5}$

Afin de faciliter la lecture et l'interprétation des mesures de la $CE_{1/5}$ par rapport aux normes universelles, les résultats obtenus par la méthode de l'extrait aqueux préalablement décrite sont convertis par les équations 13 (Richards, 1954) et 14 (Ozcan, 2006), qui donnent une estimation de ce paramètre mesuré par la méthode de la pâte saturée (CE_e) pour le sol sableux (Shahid et al., 2013).

$$EC_e = EC_{1:5} \times 4,81 \quad (13)$$

$$EC_e = EC_{1:5} \times 5.97 - 1170 \quad (14)$$

Chapitre 4 :

Résultats et Discussion

I. Etat des lieux de l'irrigation et de la salinisation des sols dans la vallée du Souf

I.1. Introduction

L'agriculture dans la Vallée du Souf a persisté durant des siècles grâce à l'agriculture oasienne, basée sur un système d'irrigation ingénieux appelé Ghout. L'agriculture oasienne assurait aux habitants de la vallée du Souf des productions vivrières de dattes, céréales ainsi que certaines cultures maraichères et elle garantit en même temps un équilibre entre les ressources naturelles et les besoins alimentaires des habitants (Boumaada, 2021). Cependant, cette région a connu une mutation agroéconomique depuis l'application des programmes étatiques de la mise en valeur des régions sahariennes. Ceci a fait passer la région d'une agriculture traditionnelle vivrière à une agriculture de marché (Dubost, 1986).

Ce passage a eu lieu grâce à la découverte du potentiel hydrogéologique de la vallée du Souf, exploité par la suite par des centaines de forages et puits. Cependant, cette transition d'une agriculture oasienne basée sur le Ghout à une agriculture intensive basée sur le pompage de l'eau souterraine n'a pas été sans conséquences sur l'environnement Soufi qualifié comme très fragile à cause de son hydrologie enclavée (bassin endoréique). Parmi les conséquences soulignées nous distinguons: les fluctuations du niveau piézométrique de la nappe phréatique, la pollution du milieu par les intrants chimiques et la salinisation des sols dans les périmètres irrigués.

Dans ce chapitre nous allons présenter les lignes suivantes :

- L'état des lieux de l'irrigation dans la vallée du Souf ;
- La description du phénomène de la salinisation des sols, ses causes et conséquences ;
- La relation entre l'irrigation sous pression et la salinisation des sols dans la vallée du Souf.

I.2. Etat des lieux de l'irrigation dans la vallée du Souf

I.2.1. Les terres irriguées

Depuis les années 80, la vallée du Souf bénéficiait des programmes étatiques de la mise en valeur des terres afin de promouvoir l'agriculture saharienne. Commencant par le programme d'Accès à la Propriété Privée de l'Etat (APPA), selon la loi 83-18, votée en 1983. Grace à cette loi, 13 852 ha ont été attribuées entre 1983 et 1997 (DSA, 2006). Cette cession est ensuite remplacée par le programme GCA en 1997, portant le nom de l'entreprise qui s'en charge (Générale des Concessions Agricoles). Dans ce cadre, les terres sont exploitées suivant des contrats de concession sur une durée de 40 ans (Daoudi et al., 2021). Selon la DSA (2019), 980 ha ont été attribués aux jeunes chômeurs et leur offre le statut d'agriculteur.

Un autre programme étatique décrit par la circulaire ministérielle n° 108 en 2011, visant à créer des exploitations entrepreneuriales à superficie supérieure à 50 ha organisées dans des périmètres irrigués où les voies d'accès et l'électricité sont assurées par les autorités locales. Sous le titre de la concession de mise en valeur, ses programmes sont financés par des crédits bancaires. La figure 22 présente les

valeurs de la SAU irriguée dans la vallée du Souf pour les années 2003, 2008, 2013 et 2018.

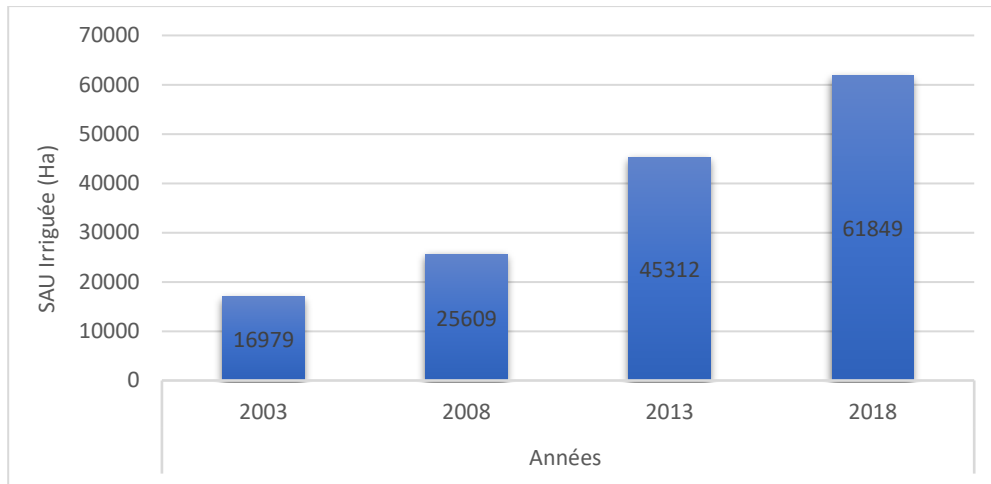


Figure 23 : La SAU irriguée dans la vallée du Souf (DSA, 2019)

D'après la figure 22, nous remarquons que la SAU irriguée à presque quadruplé en 15 ans, elle est passée de 16 979 ha à 61 849 ha, soit une augmentation moyenne de 2991 ha par année. Cette augmentation est expliquée à la fois par les programmes étatiques de la mise en valeur des régions sahariennes, par la réussite des cultures maraîchères dans la vallée du Souf comme cultures rentables ainsi que par l'apport de la population locale en termes d'innovation comme l'adaptation des techniques d'irrigation sous pression aux conditions locales (Ould-rebai, 2017).

Après l'échec des pivots conventionnels mis en place lors du programme PNDA durant les années 80, les artisans de la vallée du Souf ont réussi à construire et commercialiser un modèle de pivot adapté aux conditions biophysiques et socio-économiques de la région notamment : une surface moyenne de 1 ha, une facilité de pilotage et un faible coût d'investissement (Bioud, 2017 ; Ould-rebai, 2017). Selon les acteurs des services de l'agriculture et de l'eau, le pivot artisanal fut la première technique d'irrigation par aspersion accessible aux agriculteurs de la vallée du Souf, suivie par la technique du micro-jet (utilisée pour l'arboriculture) au début des années 2000. En outre, la technique du goutte-à-goutte à gaine souple a été introduite dans la région vers la fin de la décennie 2000-2010 après plusieurs tentatives d'adaptation aux conditions locales, d'après nos investigations dans le terrain.

Afin d'apprécier le potentiel agricole à une échelle communale, nous présentons les SAU irriguées par communes pour la même période que dans la figure 23.

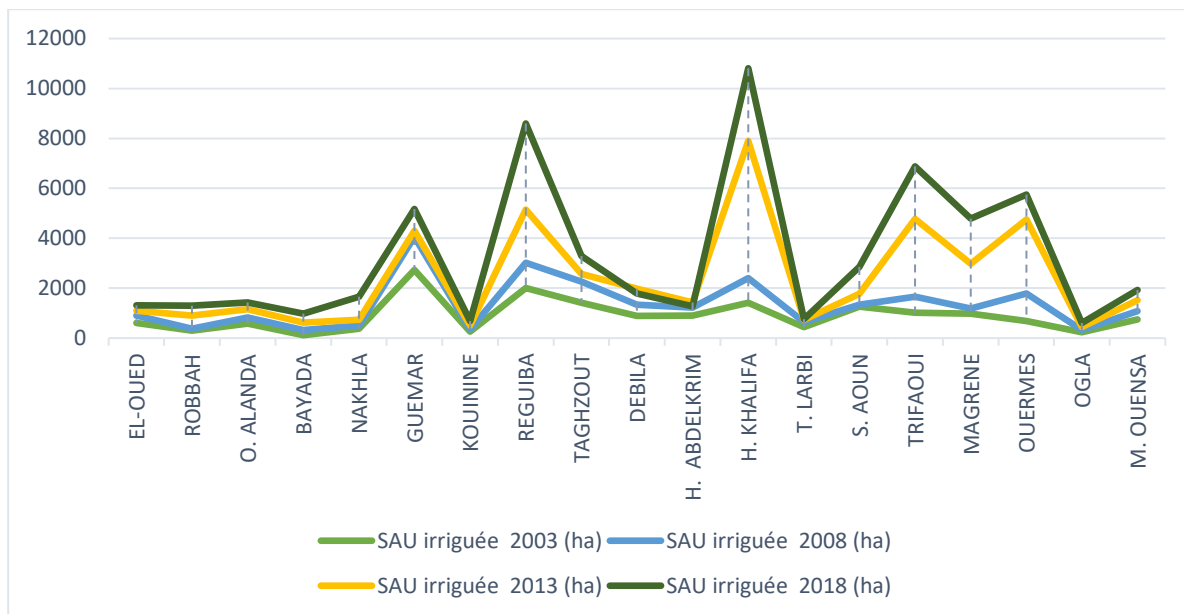


Figure 24 : SAU irriguée des communes de la vallée du Souf pour les années 2003, 2008, 2013, 2018 (DSA, 2019)

D'après la figure 23, on remarque d'une manière générale que les surfaces irriguées sont inégalement réparties entre les communes de la vallée et que les surfaces irriguées ont augmenté pour toutes les communes mais avec des taux d'augmentation différents.

Pour la série de 2003, les surfaces irriguées par commune ne dépassaient pas 2500 ha, la majorité des surfaces sont occupées par la phoeniciculture avec 62%, tandis que les cultures maraichères occupaient uniquement 28% de la SAU irriguée. Les communes à vocation phoenicicole avaient le plus grand potentiel agricole durant les années 2003-2006, notamment les communes de Guemar, Reguiba.

Depuis 2003, on remarque une augmentation des surfaces irriguées d'une façon inégale entre les communes. L'augmentation est plus remarquable dans les communes à vocation maraichère telles les communes de Hassi Khalifa, où la SAU irriguée a quintuplé. Les surfaces dédiées aux cultures maraichères irriguées par les techniques d'irrigations sous pression et qui prenaient 28% de la SAU irriguée en 2003, ont atteint 77% en 2018.

L'augmentation des surfaces dédiées à l'irrigation sous pression est accompagnée par un passage de la vallée du Souf d'un pôle phoenicicole à un pôle maraicher qui approvisionne tout le territoire national. A titre d'exemple, la vallée du Souf a produit à elle seule 30 % de la production nationale en pomme de terre (DSA, 2018).

I.2.2. Les sources de l'eau d'irrigation

La vallée du Souf étant une région saharienne où les ressources hydrologiques (eau de surface) sont inutilisables en agriculture, cependant elle renferme d'importantes réserves hydrogéologiques. L'agriculture dans la vallée du Souf est entièrement basée sur l'exploitation des ressources souterraines. Le tableau 23 présente les sources d'eau pour l'agriculture.

Tableau 23 : Sources d'eau pour l'agriculture dans la Vallée du Souf

| Ouvrage de prise d'eau | Nombre | Surface Irrigué (ha) | Pourcentage par rapport à la surface équipée | Surface moyenne irriguée par un seul ouvrage (ha) |
|------------------------------|--------|----------------------|--|---|
| Forage du CT | 25 | 856 | 1,4 | 34,24 |
| Puits de la Nappe Phréatique | 32133 | 60948 | 98,6 | 1,90 |
| Total | 32158 | 61804 | 100 | 1,92 |

Source : DRE (2018)

D'après le tableau 23, on constate que l'irrigation dans la vallée du Souf est alimentée par deux types d'ouvrages de prise d'eau : les forages du complexe terminal (25 forages) et les puits de la nappe phréatique (32 133 puits).

Les forages du Complexe terminal ayant une profondeur comprise entre 272 m et 495 m avec un débit moyen de 54,2 m³/h, alimentent uniquement les surfaces arboricoles aux alentours de la ville d'El Oued et Kouinine avec une surface totale de 856 ha (34,24 ha par 1 forage), soit uniquement 1,4 % de la SAU équipée. Les puits de la nappe phréatique alimentent la majorité des surfaces irriguées : 60 948 ha qui représentent 98,6 % de la SAU équipée. Les puits de la nappe phréatique ont un faible potentiel par rapport aux forages du CT, un puits irrigue en moyenne 1,90 ha, avec un débit moyen de 25 m³/ha, mesuré au niveau de 38 puits.

Le nombre important des puits de la nappe phréatique reflète l'individualisme agraire des exploitations de la vallée du Souf. Ceci complique les interventions de la gestion de cette ressource naturelle et la régularisation de l'eau d'irrigation.

I.2.3. Les systèmes d'irrigation

I.2.3.1. Secteur arboricole

Afin d'étudier la répartition spatiale des techniques d'irrigation selon la région ainsi pour le secteur de l'arboriculture, on présente les surfaces irriguées par techniques d'irrigation et pour chaque commune dans la figure 24.

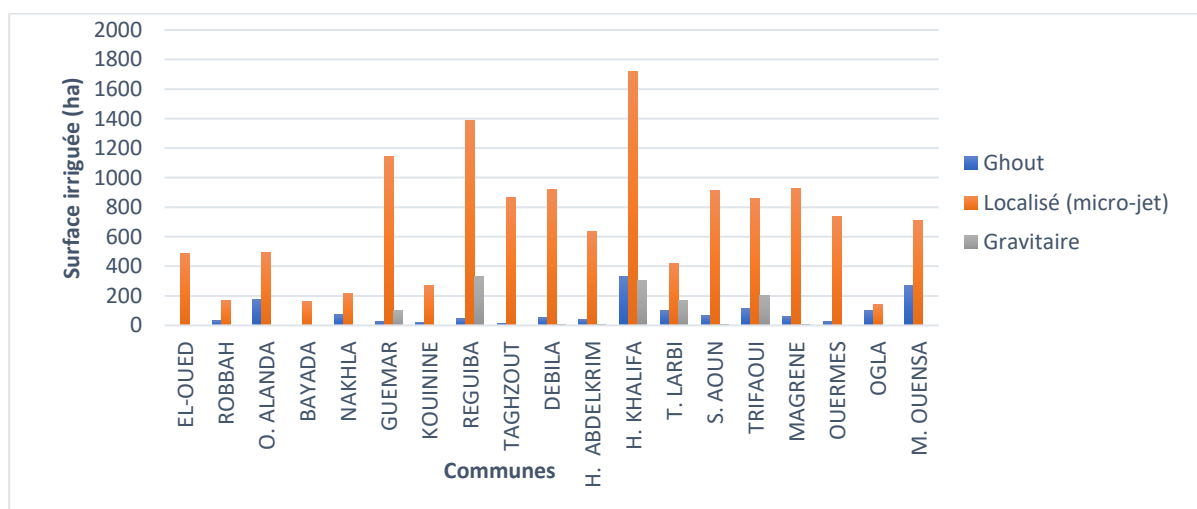


Figure 25 : Surfaces irriguées par technique d'irrigation pour chaque commune (DSA,2019)

D'après la figure 24, il existe trois techniques d'irrigation en arboriculture avec des proportions inégales : le micro-jet, le Ghout et le gravitaire (Seguia). La technique d'irrigation par micro-jet est la technique d'irrigation la plus utilisée dans la vallée du Souf pour le domaine arboricole avec 13174 ha, soit 83% des surfaces arboricoles dont les principales cultures sont le palmier dattier et l'olivier. Le Ghout est la technique d'irrigation la moins utilisée, elle occupe 10 % des surfaces arboricoles.

Selon les résultats de notre enquête, les agriculteurs favorisent la technique d'irrigation par micro-jet grâce à sa facilité de pilotage ainsi que pour sa forte efficacité en eau par rapport à l'irrigation par Séguia. La technique d'irrigation par Ghout qui est une technique ancestrale devient de plus en plus fragile face aux fluctuations de la nappe phréatique : une remontée de la nappe dans les zones basses et un tarissement dans les zones de pompage. La majorité des Ghout fonctionnels sont localisés au sud de la vallée du Souf, dans les communes de Nakhla, Ogla, Mih Ouensa, Oued El Alanda ainsi qu'au Sud-Est de la commune de Hassi Khelifa. Le gravitaire est la technique la moins utilisée dans la vallée du Souf avec uniquement 1123 ha, soit 7% des surfaces arboricoles.

Pour bien comprendre la répartition spatiale des techniques d'irrigation des cultures pérennes, la figure 25 présente les pourcentages des techniques d'irrigation par rapport à la surface arboricole par commune.

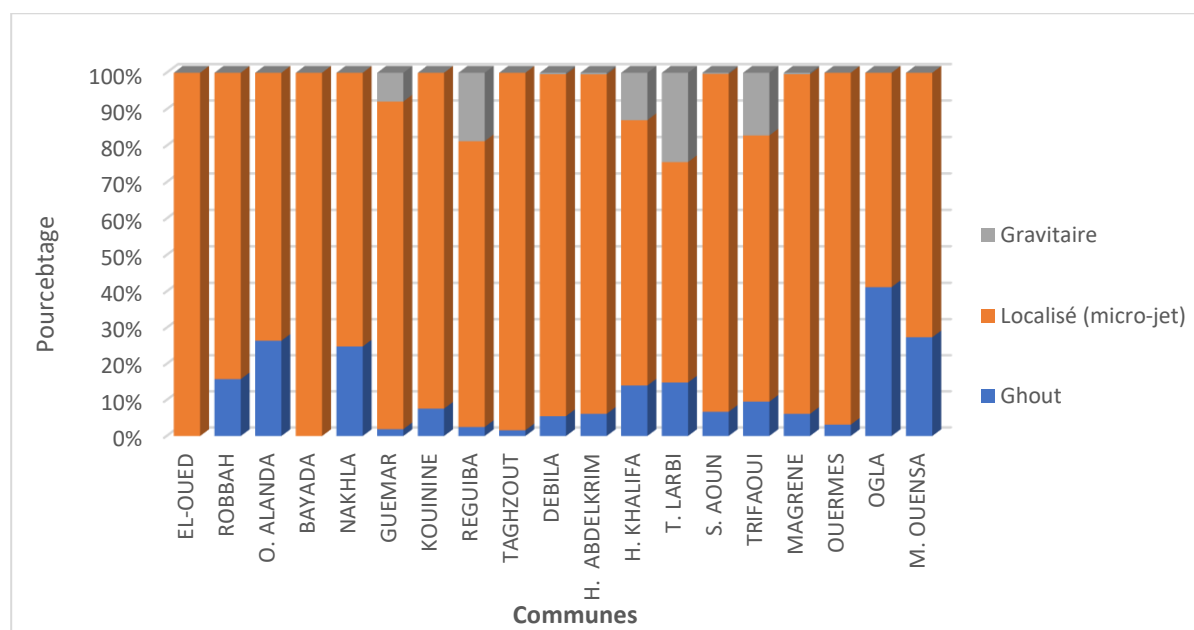


Figure 26 : Pourcentages des techniques d'irrigation par rapport aux surfaces arboricoles par communes (DSA, 2019)

D'après la figure 25, nous remarquons que les proportions des techniques d'irrigation sont hétérogènes. La dominance de la technique du micro-jet est visible pour toutes les communes. Cependant, les proportions du Ghout et de l'irrigation gravitaire sont opposées entre le Nord et le Sud de la vallée. On remarque d'importantes proportions du gravitaire au Nord et au centre de la vallée qui sont caractérisés par un sable meuble et par une salinité élevée (les communes de Trifaoui, Taleb Laarbi, Guemar, Reguiba, Kouinine), mais inutilisable dans le Sud

de la vallée. Dans le cas opposé, les proportions du Ghout sont plus importantes au Sud de la vallée (communes de Oгла, Nakhla, Mih Ouansa).

Cette répartition explique une forte influence des caractéristiques pédologiques et hydrogéologiques de la région sur le choix de la technique d'irrigation pour l'arboriculture. La technique d'irrigation par micro-jet étant la technique la plus efficace dans le sol sableux très perméable, ce qui fait d'elle la technique la plus utilisée pour l'arboriculture. D'autre part le gravitaire est inutilisable dans les zones dunaires du Sud de la vallée à cause de la forte perméabilité du sol, cependant il est utilisable uniquement dans les basses régions aux sols sablonneux-gypseux au centre et au Nord de la vallée du Souf.

Par ailleurs, la technique du Ghout qui est basée sur l'équilibre du niveau piézométrique a pu subsister dans les zones de recharge de la nappe qui se trouvent en amont où la densité des puits est moins importante et loin des zones urbaines.

I.2.3.2. Cultures annuelles

Actuellement, les cultures annuelles sont irriguées uniquement avec les techniques d'irrigation sous pression dans la vallée du Souf à l'exception des petites parcelles de cultures vivrières. La figure 26, présente la répartition des surfaces irriguées par technique d'irrigation et par commune.

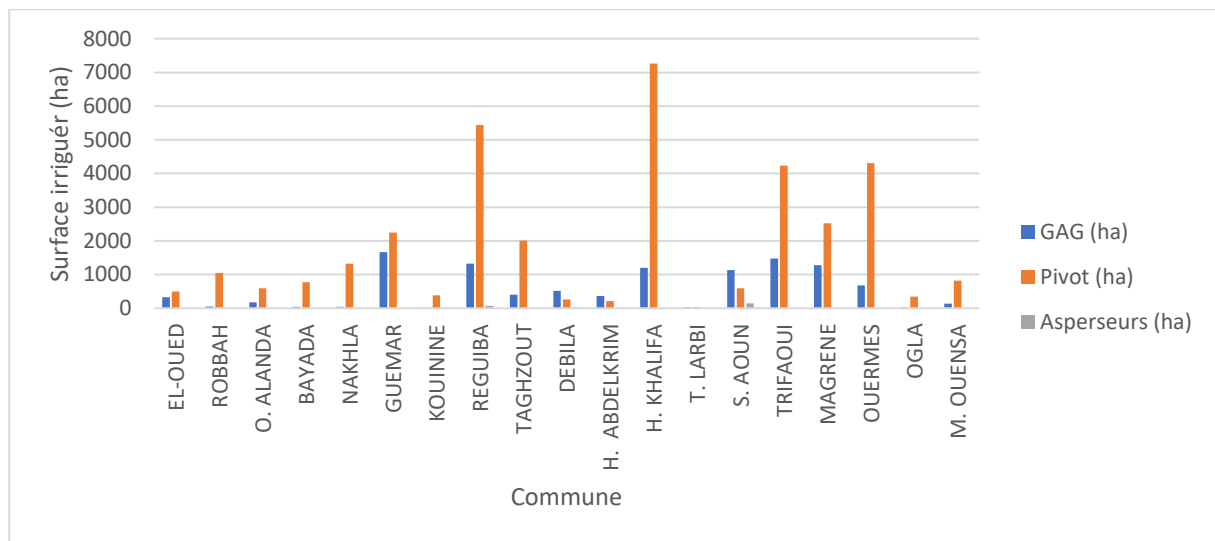


Figure 27 : Surfaces irriguées par technique d'irrigation et par commune (DSA,2019)

Selon la figure 26, il existe trois techniques d'irrigation des cultures annuelles dans la Vallée du Souf: le pivot artisanal, le goutte-à-goutte et l'aspersion (asperseurs). Le pivot artisanal occupe près de 35 000 ha, soit 74% de la surface totale des cultures annuelles. Suivie par le G.A.G qui occupe 10 855 ha, soit 23% de la surface en cultures annuelles. L'aspersion est la technique d'irrigation la moins utilisée et elle occupe uniquement 1% de la surface des cultures pérennes.

D'une manière générale, le pivot artisanal est la technique dominante dans la vallée du Souf, mais les pourcentages d'occupation diffèrent selon la région. Afin de comprendre la répartition spatiale des techniques d'irrigation annuelles, la figure 27

présente les proportions des techniques d'irrigation par rapport à la surface dédiée aux cultures annuelles par commune.

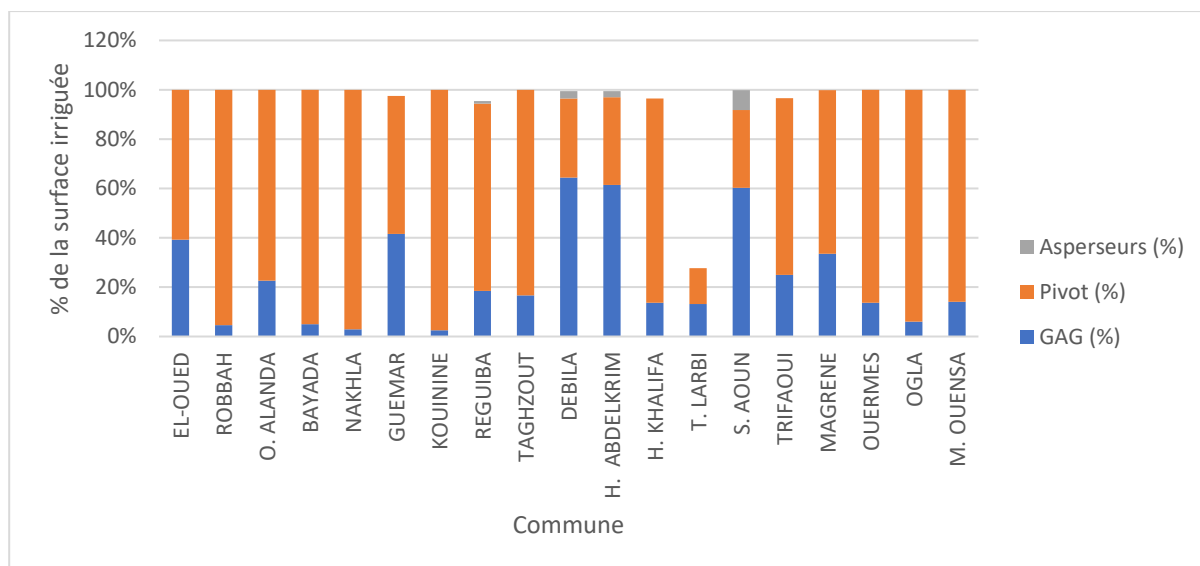


Figure 28 : Pourcentages des techniques d'irrigations par rapport aux surfaces maraichères par commune (DSA, 2019)

D'après la figure 27, on remarque une hétérogénéité des pourcentages des surfaces irriguées par le goutte-à-goutte et par le pivot artisanal selon les régions. Les pourcentages du goutte-à-goutte sont plus importants dans les communes du centre et du nord de la vallée du Souf (Hassani Abdelkrim, Débila, Sidi Aoun el Guemar), cependant le pivot artisanal est plus important dans le sud et l'est de la vallée (la zone dunaire).

Cette variation des proportions des deux techniques d'irrigation est très remarquable sur le terrain. D'après les entretiens effectués dans le cadre d'enquête, la répartition spatiale des techniques d'irrigation des cultures annuelles est liée à deux principaux facteurs : le premier facteur correspond à la topographie du terrain tandis que le deuxième est lié à la qualité de l'eau d'irrigation.

La topographie agit sur la technique d'irrigation par la morphologie du terrain ainsi que par le type de sol. Comme nous l'avons cité dans le chapitre précédent, il existe dans la vallée du Souf deux géomorphologies différentes : les masses dunaires au Sud de la vallée et les étendues de formations sableuses et gypseuses au nord. Les masses dunaires du Sud de la vallée du Souf sont défavorables à l'installation de la technique du goutte-à-goutte qui exige des surfaces planes afin d'avoir l'uniformité d'irrigation souhaitée tandis que le pivot artisanal est un système à rampe mobile qui est plus adapté. D'autre part, le transport solide, dans le cas des vents de sable sont plus importants dans les masses dunaires, la gaine du goutte-à-goutte est parfois remblayée par le sable.

La qualité de l'eau joue un rôle très important dans le choix de la technique d'irrigation selon les rendements que les agriculteurs obtiennent à la fin. La technique du goutte-à-goutte permet d'obtenir des rendements supérieurs dans les régions à forte salinité en évitant le contact entre l'eau d'irrigation avec les feuilles. Dans certaines exploitations au nord de la vallée du Souf, le

goutte-à-goutte permet d'obtenir jusqu'à 200 qx/ha de pomme de terre de plus que le pivot artisanal.

D'autre parts, les agriculteurs dans les régions préalablement cités justifient le choix de la goutte à goutte par le contact eau-feuilles dans le cas de l'irrigation avec le pivot artisanal. Ceci provoque des dépôts de sel et de calcaire sur la surface foliaire, qui se traduit par la suite par des nécroses et des brûlures foliaires.

I.2.4. Composition des systèmes d'irrigation par aspersion dans la vallée du Souf

I.2.4.1. Ouvrage de prise d'eau

Comme mentionné précédemment, toutes les surfaces irriguées sont alimentées par les eaux souterraines, 99% des surfaces sont alimentées par des puits de la nappe phréatique tandis que 1% est alimenté par des forages conventionnels puisant l'eau du complexe terminal. Les puits sont réalisés par des artisans foreurs de la région du Souf selon le savoir ancestral et en utilisant des machines de forages des années 1970-1990. Dans la vallée du Souf il existe deux types d'ouvrages de prise d'eau : puits-forage et forage, présentés dans la figure 28.

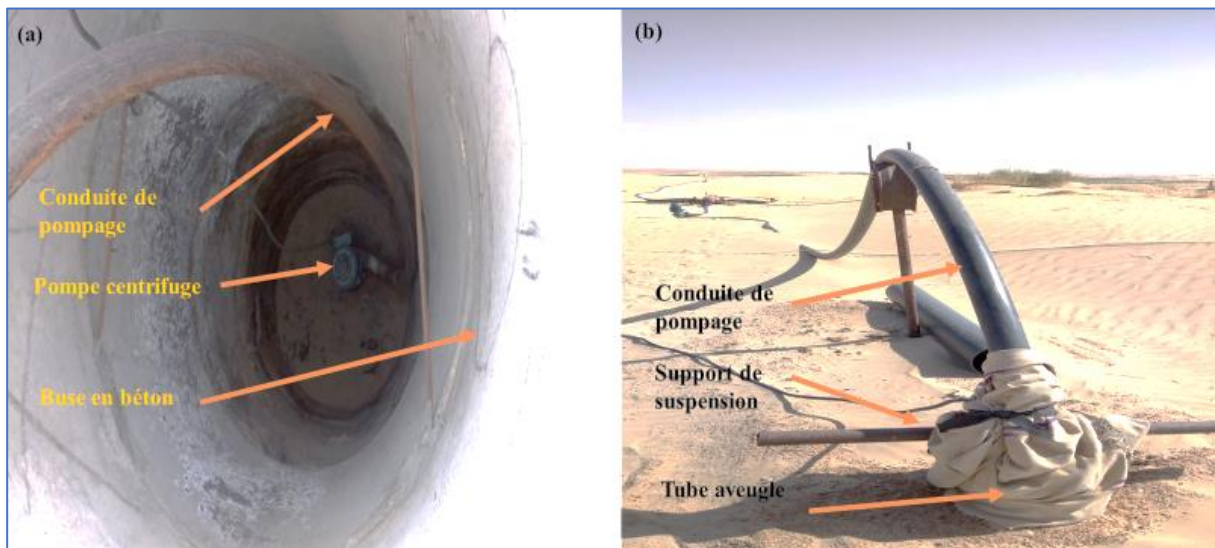


Figure 29 : (a) forage mixte, (b) forage

a) Forage mixte

Le forage mixte qui est plus fréquent au Sud de la vallée, réalisé en deux parties : une partie libre contenant une pompe centrifuge sur sa base et une partie immergée contenant une conduite PHD de 180 mm de diamètre, imprégnée dans la zone saturée de la nappe phréatique. Cette conduite collectrice d'eau possède des ouvertures sous formes de fentes afin de permettre le remplissage du puits. La profondeur de ce type de puits est comprise entre 15 et 35 m. Ils sont équipés d'une pompe centrifuge d'une puissance de 5 CV qui permet d'extraire un débit compris entre 18 et 32 m³/h, selon la profondeur à laquelle se situe la pompe.

Ce genre de puits facilite l'accès à la pompe afin d'effectuer l'entretien nécessaire, cependant ils sont fragiles aux fluctuations de la nappe : un fort rabattement augmente la hauteur d'aspiration de la pompe centrifuge au-delà de sa capacité et

une remontée de la nappe peut provoquer un endommagement par court-circuit. Le schéma du puits mixte est présenté dans la figure 29.

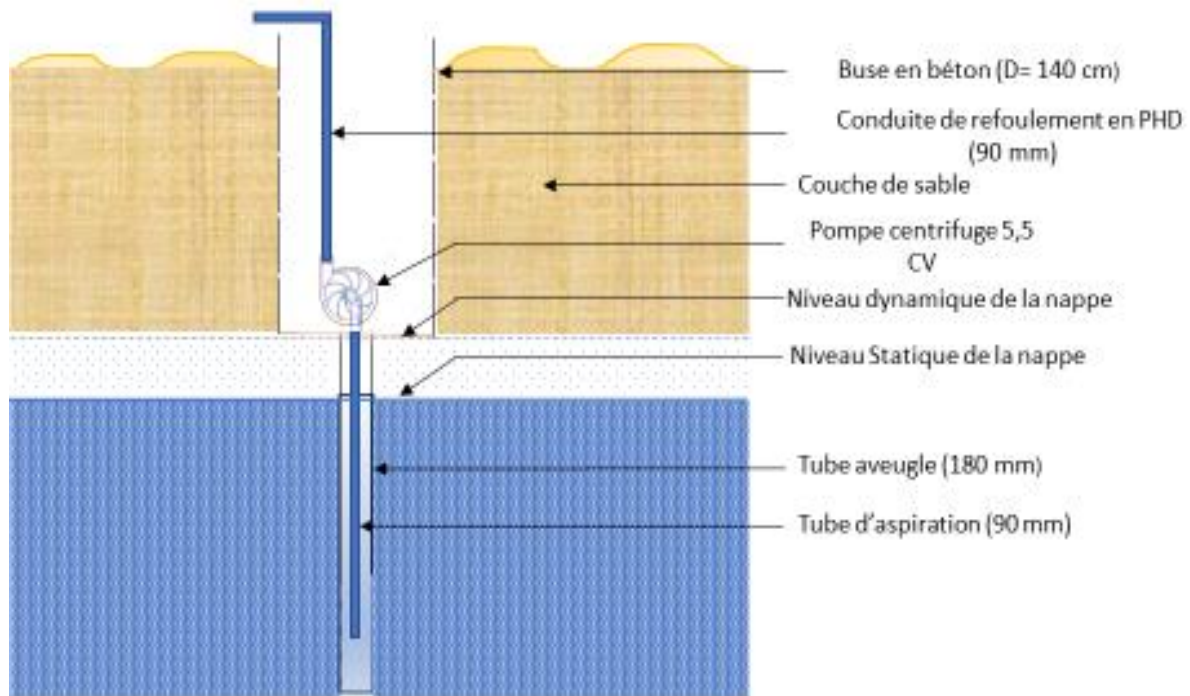


Figure 30 : Schéma du forage mixte

a) Forage

Le forage est similaire au forage conventionnel, sauf que sa réalisation est artisanale, sa composition et les matériaux utilisés sont primaires. Ce type de puits est plus fréquent au nord de la vallée du Souf où la nappe phréatique est moins profonde et le sol est plus compact. Sa profondeur totale est comprise entre 20 m et 45 m, ils sont équipés d'une pompe immergée d'une puissance de 7,5 CV qui permet d'extraire un débit compris entre 15 m³/h et 35 m³/h. La figure 30 présente le schéma de ce type de puits.

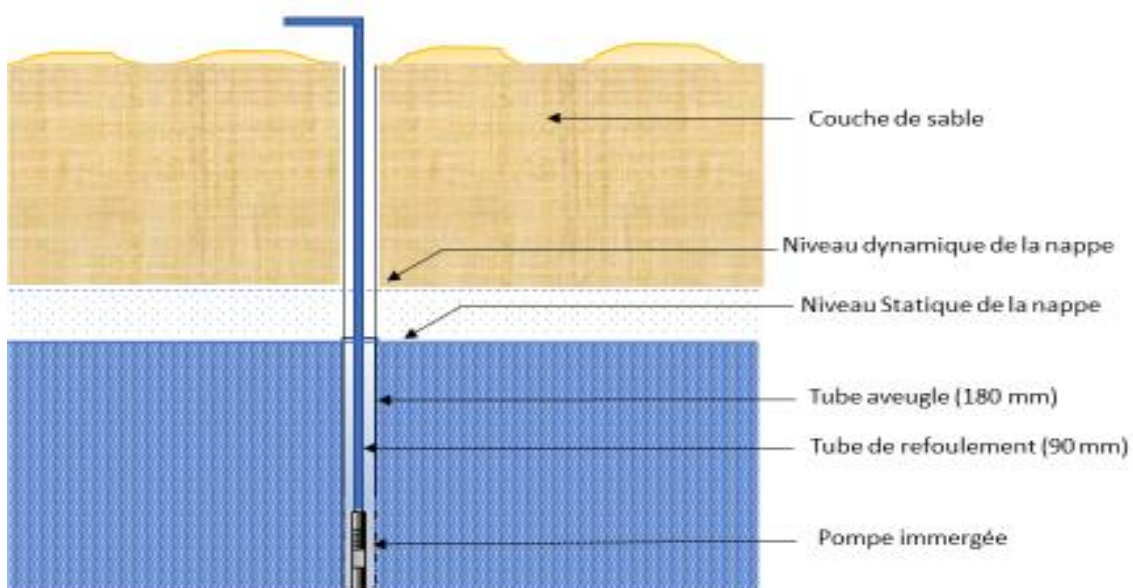


Figure 31 : Schéma du puits-forage

IV.1.1.1. Station de tête

Selon Tiercelin et Vidal. (2006), la station de tête est une pièce maitresse dans un système d'irrigation. Elle regroupe les appareils et les éléments qui garantissent un bon fonctionnement du système, une sécurité du modérateur et une protection de l'environnement.

Dans la vallée du Souf la station de tête ne suscite pas l'importance des agriculteurs. Les 40 exploitations visitées lors de l'enquête possèdent des stations de tête très primaires. Elles sont composées uniquement de vannes manuelles et des disjoncteurs coupe-courant ainsi qu'un filtre à entonnoir (fabriqué localement). Ceci est un indicateur de la gestion rudimentaire de l'irrigation, surtout que la région est située dans un contexte climatique aride où l'eau est souvent le facteur déterminant dans l'agriculture. La figure 31 présente les composants des stations de tête dans la vallée du Souf.

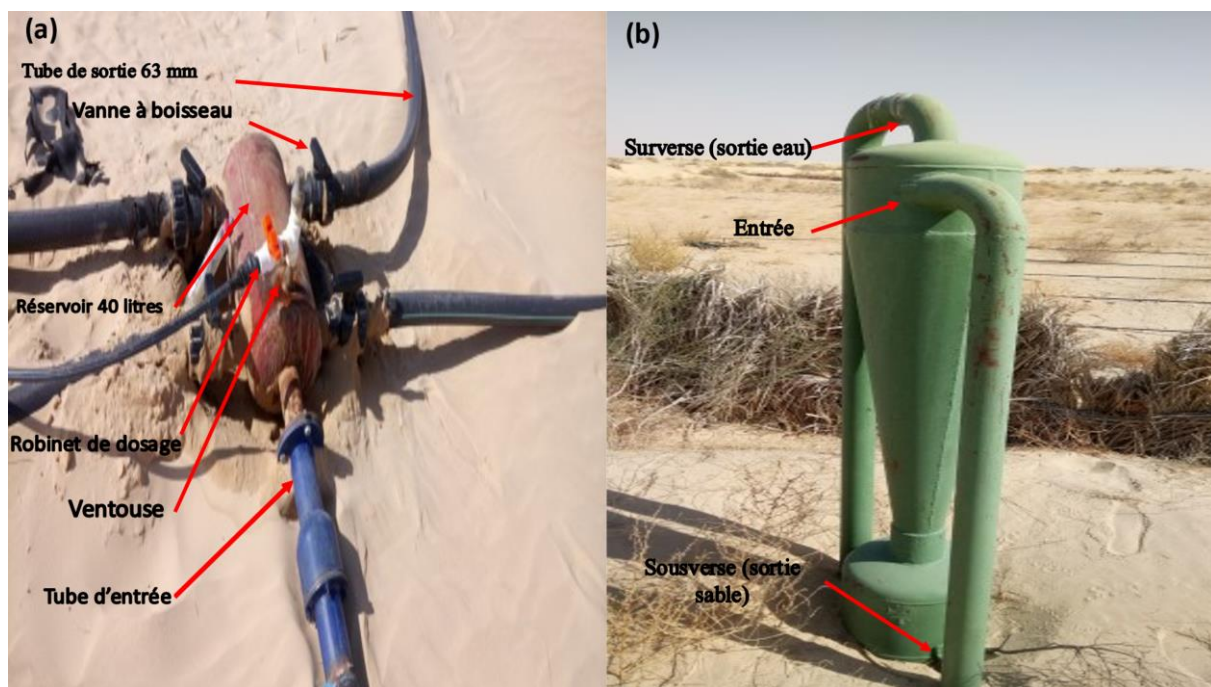


Figure 32 :(a) Multi-vannes, (b) filtre à sable hydrocyclone

Les composantes de la station de tête présentées dans la figure 31 sont fabriquées localement par des artisans ferrailleurs à la demande des agriculteurs. La multi-vanne permet d'irriguer simultanément plusieurs parcelles (2 à 4 parcelles) et d'appliquer en même temps les engrais solubles grâce au robinet de dosage. Cependant cette technique de dosage est très imprécise en absence des appareils de mesures hydrauliques : le débitmètre et le manomètre. L'hydrocyclone permet de séparer les particules solides, notamment les sables en suspension. Cependant cette technique est très consommatrice en eau. Selon nos mesures sur le site, le débit moyen est de 0,2 l/s en continu, mesuré au niveau de la sous-verse (sortie de sable).

IV.1.1.2. Technique d'irrigation

a) Le pivot artisanal

Le pivot artisanal est la technique la plus utilisée dans la vallée du Souf. Il est adapté aux conditions biophysiques et socio-économiques de la région du Souf : faible budget, pilotage facile petites surfaces (0,8 ha à 1,2 ha). Malgré les avantages qu'il présente pour la population locale, le pivot artisanal est un instrument rudimentaire et il présente des faibles performances hydrauliques. Parmi les inconvénients de cet instrument, on site: la faible uniformité d'irrigation, le tassement de la couche superficielle du sol sableux et la toxicité chlorurique et sodique dans le cas d'une eau saline suite à l'humidification des feuilles.

Le pivot artisanal est utilisé généralement pour l'irrigation de la pomme de terre, les céréales, l'ail, l'oignon, les arachides et les légumineuses. Le schéma du pivot artisanal est présenté dans la figure 32.

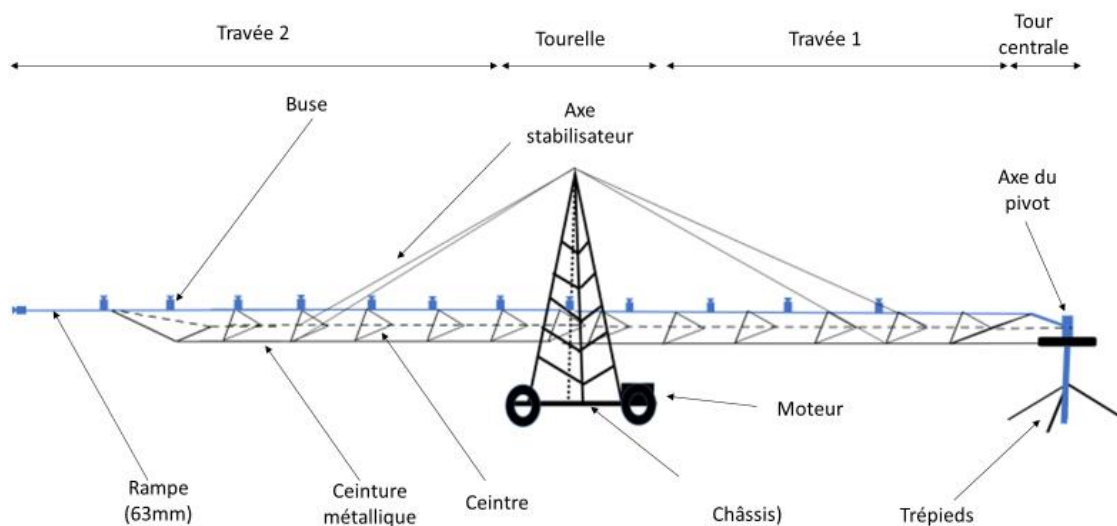


Figure 33 : Schéma du pivot artisanal

b) La technique goutte à goutte

Le goutte à goutte à gaine souple prend de la place de plus en plus dans la vallée du Souf depuis son introduction dans la région au milieu de la décennie 2000-2010. Cette technique fréquente au Nord de la vallée qui est caractérisée par des sols sablonneux-gypseux. Selon les agriculteurs de la vallée du Souf, le goutte-à-goutte permet d'obtenir des rendements supérieurs au pivot artisanal dans les régions connues par leur salinité excessive.

Le goutte à goutte à gaine souple est utilisé pour l'irrigation des cultures maraichères de pleins champs où sous serre. Cependant le colmatage des goutteurs par le calcaire et le sable sont très fréquents. Le schéma général de l'installation du goutte-à-goutte le plus utilisé dans la vallée du Souf est présenté dans la figure 33, les fiches techniques des gaines les plus utilisées dans la vallée du Souf sont présentées dans l'Annexe 3.

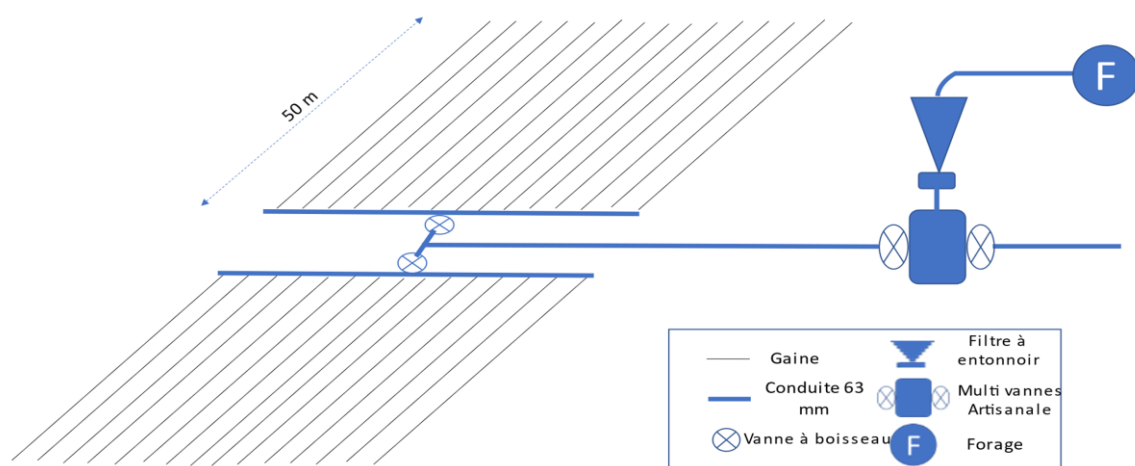


Figure 34 : Schéma de la composition du système goutte à goutte dans la vallée du Souf

I.2.4. Relation entre le milieu biophysique, la qualité et la technique d'irrigation

Afin de comprendre les critères de choix de la technique d'irrigation nous avons pris la culture de la pomme de terre comme référence, étant la culture dominante de la vallée du Souf et irrigable avec les deux techniques d'irrigation (pivot artisanal et goutte à goutte). La figure 34 présente les critères soulevés par les agriculteurs pour le choix des deux techniques d'irrigation

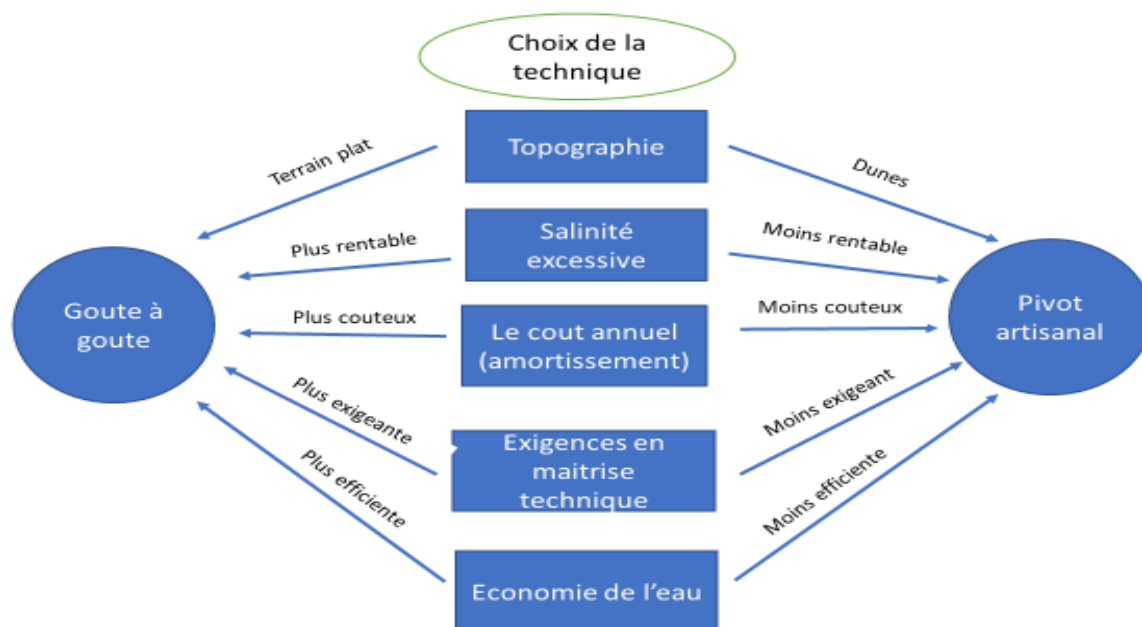


Figure 35 : Les critères du choix de la technique d'irrigation par les agriculteurs

D'après les résultats des entretiens, les critères de choix de la technique d'irrigation ont trois principales origines : facteurs naturels, facteurs techniques et d'autres socio-économiques. Les conditions naturelles jouent un rôle important dans le choix de la technique d'irrigation. La

topographie dunaire qui caractérise le Sud et le centre de la vallée du Souf favorise le système pivot, étant plus adaptée aux terrains à pente. D'autre part, les régions à topographie dunaire sont connues pour être sous l'effet des vents de sables intenses qui peuvent remblayer les conduites de la goutte à goutte posées sur terre.

La salinité (eau et sol) aussi joue un rôle primordial dans le choix entre le pivot artisanal et le goutte à goutte : le pivot artisanal est moins utilisé au nord de la vallée, caractérisé par des sols sablonneux-gypseux et calcaires ayant une forte salinité (région proche des chotts). Le goutte-à-goutte donne un rendement plus important dans les régions à forte salinité, en évitant le contact de l'eau salée (chargée en ions toxiques : Cl^- et Na^{2+}).

Les conditions socio-économiques font de sorte que l'agriculteur doit confronter son budget et son plan d'investissement aux coûts et performances de chaque technique. Le pivot artisanal offre un coût d'investissement plus faible grâce aux accords agriculteurs-artisans pour le paiement par tranche. Le coût amorti du pivot est plus faible grâce à la durée de vie considérable du pivot (10 ans en moyenne). D'autre parts le goutte à goutte est un matériel à utilisation annuelle ou bisannuelle, cependant il garantit des rendements qui peuvent atteindre 200 qx/ha de plus que le pivot artisanal dans le cas d'une salinité élevée. D'autre parts, le goutte à goutte est un matériel non-durable qui est payé à l'achat. Les conditions techniques favorisent le goutte à goutte étant une technique moderne, efficiente en eau et en énergie électrique et elle permet d'atteindre une bonne uniformité d'irrigation.

I.4. Etat des lieux de la salinisation des sols dans la vallée du Souf

I.4.1. Symptômes

Pour l'identification du phénomène de la salinisation dans la vallée du Souf on s'est basé en premier lieu sur les entretiens avec les agriculteurs et les acteurs du secteur agricole effectués dans le cadre de l'enquête et sur l'observation dans les 40 exploitations visitées.

D'après les résultats de l'enquête, certains symptômes du phénomène apparaissent dès la première saison de la mise en culture mais son effet sur les cultures ne devient considérable qu'après 3 à 5 campagnes d'irrigation. Ce phénomène est plus intense dans le nord et dans les régions basses du centre de la vallée (à proximité des zones de décharges de la nappe phréatique).

Les agriculteurs ont enregistré des réductions importantes du rendement (allant de 10% à 30%) qui augmentent d'une saison à l'autre jusqu'à ce que les parcelles irriguées deviennent très faiblement productives (chute de rendement qui peut atteindre 50%). Ces réductions du rendement affectent plus les cultures vulnérables à la salinité telle la pomme de terre et ils sont plus importants dans les parcelles irriguées par pivot. La figure 35, présente les symptômes de la salinisation des sols dans la vallée du Souf.



Figure 36 : Dépôts de sels sur les feuilles (a), sur le sol (b) et sur les parties mouillées du pivot (c)

La figure 35 (a), montre les dépôts de sels sur une feuille de la pomme de terre irriguée par pivot. Le dessèchement des parties mouillées après l'irrigation par aspersion provoque une précipitation des sels dissous dans l'eau salée. Ceci peut affecter l'état sanitaire de la feuille par la toxicité des ions Cl^- et Na^+ ou par le colmatage des stomates foliaires par les dépôts calcaires et gypseux (Miyamoto, 2006).

La précipitation des sels sur le sol et sur les parties mouillées du matériel d'irrigation sont rapportées dans la figure 35 (c). La précipitation des sels sur la surface des sols est favorisée par le climat évaporant de la région qui provoque une remontée des sels par capillarité (Shahid et al., 2013). Ceci donne aux sols affectés par la salinité une couleur blanchâtre visible à l'œil nu. Les dépôts de sels sont aussi observés sur la rampe du pivot et à proximité des goutteurs.

L'ensemble des observations préalablement cités supposent que la source de la salinisation des sols dans la vallée du Souf est la qualité médiocre de l'eau d'irrigation. La forte salinité de l'eau de la nappe phréatique a été annoncée par Khechana et Darradji (2011), dans les zones basses du centre de la vallée du Souf. Cependant, la qualité de cette eau reste non-étudiée dans les zones agricoles de la vallée, où la majorité des agriculteurs utilisent les anciennes méthodes pour l'appréciation de la qualité de l'eau d'irrigation, tel le goût et la précipitation chimique sous forme de taches blanches après évaporation.

I.4.2. Impact sur l'agriculture

Les sols affectés par la salinité sont reconnus par l'apparition d'une couche blanchâtre sur leurs surfaces à leurs dessèchements. Cette couche est formée par l'accumulation de sels dissous de l'eau d'irrigation après l'évaporation de la partie liquide, les sels se précipitent sous forme minérale. La figure 36 présente deux sols affectés par la salinité, figure 36 (a) est irriguée par la technique du goutte-à-goutte cependant Figure 36 (b) est irriguée par pivot.



Figure 37 : La salinisation des sols irrigués par le goutte-à-goutte (a) et par le pivot artisanal (b)

Dans sols irrigués par goutte à goutte, la précipitation des sels est dans les sillons en formant des lignes blanches dans la même direction de la ligne des goutteurs. Cependant les sols irrigués par pivot sont reconnus par l'apparition d'une croûte superficielle de 5-10 mm à la surface du sol. Cette croûte est formée par un mélange de sels minéraux (halite, gypse et calcite) avec les grains de sable. La figure 36 (b) présente l'impact d'un coup de couteau sur la surface d'un sol irrigué par pivot artisanal. Cet encroustement de la surface du sol est formé par la cristallisation des sels, endurcis par l'impact du jet d'aspersion sur le sol sableux (Bioud, 2017).

L'augmentation progressive de la salinité au niveau du sol réduit sa productivité, jusqu'à ce que l'investissement devient non-rentable. Dans ce cas, le propriétaire ou le locataire abandonne la parcelle endommagée. La figure 37 présente des parcelles équipées abandonnées à cause de la salinisation.

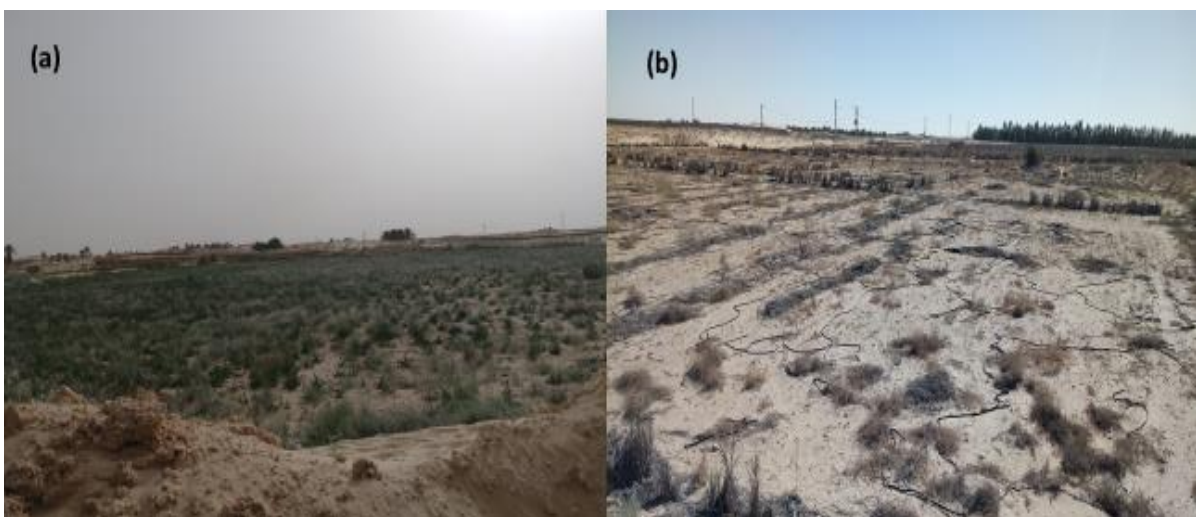


Figure 38 : Parcelle pivot (a) et parcelle goutte-à-goutte (b) abandonnées à cause de la salinisation des sols

I.5. Pratiques culturales pour la lutte contre la salinisation des sols

I.5.1. Travail du sol

Afin de lutter contre la salinité, les agriculteurs de la vallée du Souf ont développé deux techniques de travail du sol afin de renouveler la couche superficielle affectée par la salinité. Deux principales techniques : le labour profond et le sillonnage.

Le labour sert à renverser et remanier le sable afin de mélanger la couche 10-40 cm par le sous-sol 40-60 cm. Cette technique est facilitée par la texture sableuse du sol de la région qui est facile à travailler et par la disponibilité du matériel agricole à forte puissance. Le mélange de ces deux couches permet d'adoucir le niveau de salinité.

Le sillonnage présenté dans la figure 38 consiste à réaliser des ouvertures de 40 à 60 cm (sillons) perpendiculaires à la direction du vent. Les vents qui transportent du sable des grandes dunes remplissent ces sillons avec un sable non-irrigué qui est ensuite mélangé au sable affecté par la salinité. Ceci permet d'adoucir la salinité du sol en le mélangeant avec un sable à faible salinité.

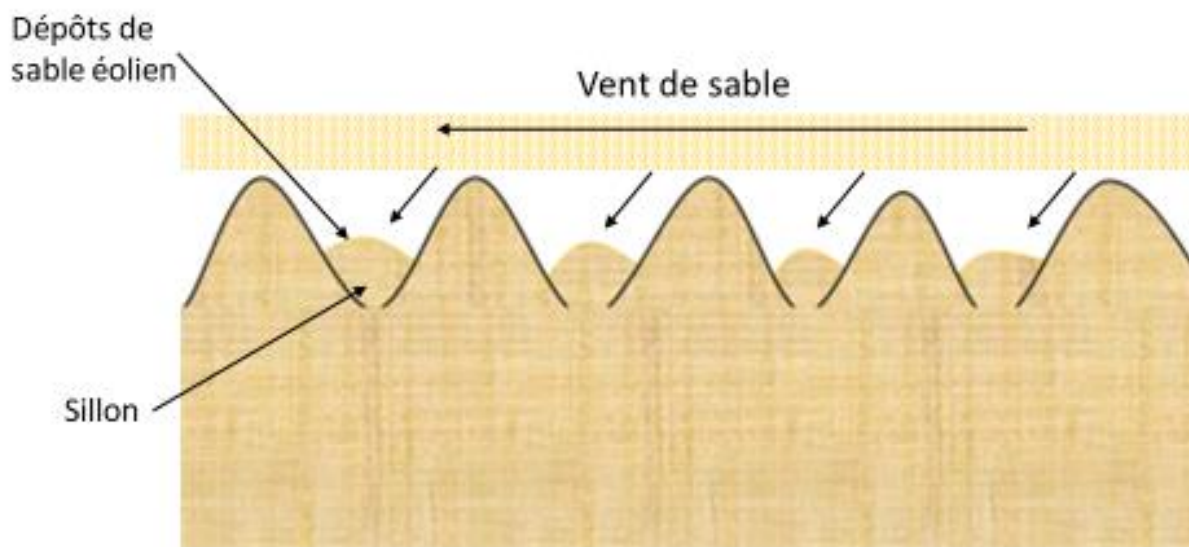


Figure 39 : Schéma de la technique du sillonnage

I.5.2. La jachère

La jachère est une des techniques qui permettent d'éviter la dégradation sévère des sols. Cette technique consiste à cultiver la parcelle durant 1 à 5 ans et la laisser se reposer durant une période équivalente à la première. La jachère permet de lessiver les sols salinisés par les précipitations orageuses, et permet de renouveler une partie du sol par le transport éolien.

Le premier mode de la jachère consiste à cultiver une partie de l'exploitation et laisser la deuxième partie pour l'année suivante. L'alternance entre les parcelles permet de cultiver d'une façon continue et réduire l'effet de la salinisation des sols. Le second mode consiste à cultiver toute la surface de la parcelle pour des années successives jusqu'à ce que la salinité affecte la rentabilité des cultures, ensuite

migrer à une nouvelle exploitation. Ce mode est pratiqué souvent par les locataires. La figure 39 présente une parcelle-pivot laissée en jachère



Figure 40 : Parcelle-pivot en jachère

I.6. Conclusion

La vallée du Souf a connu un changement radical dans le secteur agricole depuis les programmes de mise en valeur des régions sahariennes. La région est passée de l'agriculture vivrière oasisienne basée sur les techniques d'irrigation traditionnelles (Ghout et Séguia) à une agriculture intensive du marché basée sur les techniques d'irrigation sous pression. Pour l'agriculture pérenne représentée majoritairement par le palmier dattier, le choix de la technique d'irrigation est basé sur le type de sol. Pour les cultures annuelles, le choix techniques d'irrigation sous pression dépendent de plusieurs facteurs naturels telle la topographie et la qualité de l'eau d'irrigation, ainsi que d'autres facteurs socioéconomiques liés à l'agriculteur.

L'extension de l'irrigation sous pression dans la vallée a engendré un impact écologique important, surtout que la vallée du Souf est un milieu endoréique, qualifié comme très fragile face aux problèmes écologiques (Cote, 2005). Plus que la remontée des eaux dans les régions basses, nous avons pu identifier après une enquête dans 40 exploitations agricoles que la région est menacée par le phénomène de la salinisation des sols. Ce phénomène survient dans les surfaces irriguées par les techniques d'irrigation sous pression, il a provoqué des réductions importantes de rendements et un abandonnement des terres équipées dans plusieurs régions de la vallée.

D'après les résultats présentés, nous supposons que la qualité médiocre de l'eau d'irrigation est le principal facteur causal de ce problème. Afin de confirmer les résultats, nous avons effectué une campagne d'analyse hydro-chimiques de l'eau de la nappe phréatique dans 38 points d'eau réparties sur deux zones agricoles, la première est située au Sud de la vallée et la deuxième au nord de la vallée. Les résultats de cette campagne et les principales relations eau-sol-plante seront présentés sous le titre suivant.

II. Evaluation de la qualité de l'eau d'irrigation et son impact sur le sol et les cultures

II.1. Introduction

Comme mentionné dans le chapitre 1, 98,6% des surfaces irriguées de la vallée du Souf se ressource de la nappe phréatique. Les résultats de notre enquête ont supposé que l'eau d'irrigation soit le facteur causal de la salinisation des sols. Même si, l'eau est l'axe principal de l'agriculture dans les régions arides, sa qualité et ses paramètres hydrochimiques dans les périmètres irrigués de la vallée du Souf restent non-étudiée.

L'eau souterraine est associée dans certains cas à une salinité élevée et elle représente la cause majeure de la salinisation des sols, surtout dans les régions arides et semi arides (Qadir et al. 2014). Le dépôt des sels dans les couches superficielles du sol est accentué par la rareté des pluies et par l'évaporation intense. D'autres facteurs anthropiques s'y ajoutent dans le cas de l'agriculture intensive à cause de la gestion des ressources naturelles à court terme (Shahid et al., 2013). Actuellement, la salinisation secondaire des sols est considérée comme la première cause de leur dégradation. 1030 Mha de sols sont affectés dans le monde et qui engendrent une perte équivalente à 27 milliards de dollars (FAO-ITPS-GSP, 2015).

L'Algérie est considérée comme l'un des pays les plus affectés par la salinisation avec 3 Mha dont la majorité est localisée dans les régions sahariennes. Selon OSS (2008), 4300 ha/année sont endommagés à cause de ce phénomène. Dans ces régions plusieurs facteurs naturels et anthropiques sont impliqués, les plus importants sont : la salinité de l'eau souterraine, la gestion empirique de l'irrigation ainsi que l'émergence de l'agriculture intensive (Daoud et Halitim 1994 ; Djili et al., 2003 ; Daoudi et Lejars, 2016 ; Semar et al., 2019).

La gestion durable de l'irrigation dans les régions arides exige l'évaluation de la qualité de l'eau utilisée par une étude de ses paramètres hydrochimiques ainsi que l'étude des processus géochimiques issues de l'interaction entre l'eau et le milieu géologique (Iqbal et al., 2018). Les indices de la qualité de l'eau: Na%, MH%, PS, CE, TH ainsi que les diagrammes de Wilcox et Riverside procurent une méthode simple et pratique pour l'évaluation de la qualité de l'eau pour l'irrigation (Ali et al., 2020; Amiri et al., 2021).

Dans ce chapitre on caractérise des propriétés hydrochimiques de la nappe phréatique du Souf, dans deux zones agricoles distinctes par les composantes physiques du milieu, leurs positions par rapport à l'hydrologie de la nappe et par les cultures pratiquées. Puis, on évalue sa qualité pour l'irrigation et on estime l'impact de l'irrigation avec cette eau sur le sol et les cultures.

II.2. Caractéristiques piézométriques et hydrochimiques des eaux de l'aquifère

II.2.1. Piézométrie

La figure 40 présente le niveau piézométrique de la nappe phréatique dans la zone 1 et la zone 2, construite à partir des mesures effectuées lors de l'échantillonnage.

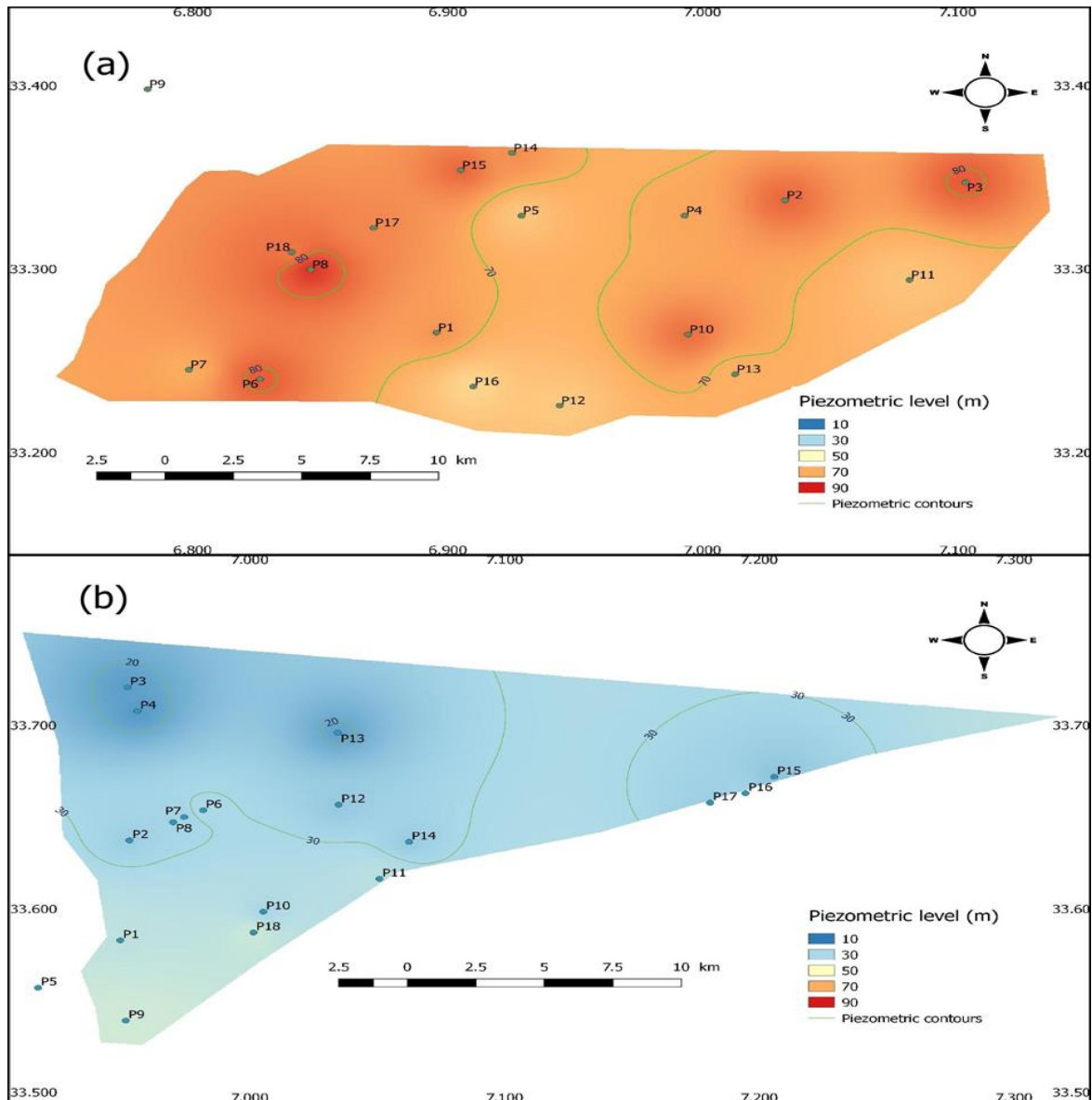


Figure 41 : Niveau piézométrique de la nappe phréatique dans la zone 1 (a) et la zone 2 (b)

D'après la figure 40, on remarque que le niveau piézométrique à l'échelle des deux zones est très bas avec un contraste remarquable entre les deux zones. Il varie entre 86 m Sud-Ouest de la zone 1 et 17 m au Nord-Est de la zone avec une valeur moyenne de 51 m.

Dans la zone 1 située au Sud de la vallée, le niveau piézométrique est plus haut, il varie entre 86 m (P06) et 60 m (P16). On observe une diminution du niveau piézométrique de l'est et de l'Ouest vers les zones urbaines situées dans l'axe de la zone (P12, P16 et P05), et une diminution du niveau piézométrique du Sud vers le Nord.

La zone 2 située au nord de la vallée est caractérisée par un niveau piézométrique plus faible, il varie entre 39 m (P09) et 17 m (P04). On observe une diminution du niveau piézométrique du Sud et de l'Ouest de cette zone vers le Nord-Est le Nord (zone des chotts), qui représente la zone de décharge de la nappe phréatique du Souf (Guendouz et al., 2006).

II.2.2. Description sommaire des paramètres hydro-chimiques des échantillons

Les paramètres statistiques descriptifs (moyenne, minimum, maximum, écart-type, coefficient de variation) de la T, pH, CE, TDS et les concentrations des ions majeurs des échantillons analysés sont présentés dans le tableau 24.

Table 24 : Paramètres statistiques des analyses physico-chimiques

| Paramètres | Zone 1 | | | | | Zone 2 | | | | |
|--------------------------------------|--------|------|--------|----------|--------|--------|--------|-------|----------|--------|
| | Min | Max | Moy | σ | CV (%) | Min | Max | Moy | σ | CV (%) |
| T °C | 20,9 | 23,7 | 22,4 | 0,82 | 3,67 | 19,8 | 24 | 22,6 | 1,33 | 5,89 |
| pH | 7,2 | 7,6 | 7,4 | 0,13 | 1,8 | 6,9 | 7,5 | 7,2 | 0,14 | 1,97 |
| CE ($\mu\text{S/cm}$) | 2656 | 9060 | 3872 | 1447 | 37,39 | 4683 | 10178 | 6298 | 1364 | 21,67 |
| TDS mg/L) | 1677 | 5379 | 2446,5 | 943,55 | 38,56 | 3214 | 5653 | 3695 | 692,35 | 18,7 |
| Ca ²⁺ (mg/L) | 449 | 733 | 593 | 79,83 | 13,45 | 549 | 789 | 677,6 | 74,72 | 11,03 |
| Mg ²⁺ (mg/L) | 41,3 | 51,4 | 46,25 | 5,04 | 10,91 | 94,8 | 289,23 | 188,6 | 59,25 | 31,41 |
| Na ⁺ (mg/L) | 130 | 690 | 276 | 123,7 | 44,79 | 125 | 470 | 230,2 | 82,42 | 35,81 |
| K ⁺ (mg/L) | 17 | 54 | 30,04 | 10,32 | 34,36 | 19 | 40 | 27,4 | 6,4 | 23,35 |
| Cl ⁻ (mg/L) | 550 | 1968 | 860 | 317 | 36,92 | 787 | 1723 | 1249 | 268 | 21,49 |
| SO ₄ ²⁻ (mg/L) | 200 | 550 | 391 | 133,6 | 34,12 | 209 | 2416 | 1131 | 688 | 60,84 |
| HCO ₃ ⁻ (mg/L) | 80,2 | 528 | 125,6 | 107,3 | 85,43 | 67,1 | 123,22 | 96,8 | 17,5 | 18,1 |
| NO ₃ ⁻ (mg/L) | 68 | 82,5 | 75,25 | 10,26 | 13,63 | 31 | 175,08 | 96,0 | 39,78 | 41,45 |

Notes : Moy : Moyenne, Min : Minimum, Max : Maximum, σ : Ecart-type, CV = Coefficient of Variation

D'après le tableau 24, la température varie entre 20,9 et 23,7 °C dans la zone 1, entre 19,8 et 24 dans la zone 2. Elle est peu variable sur l'ensemble des deux zones et légèrement plus faible dans la zone 1 par rapport à la zone 2. Le pH est neutre et peu variable, il est compris entre 7,2 et 7,6 pour la première zone tandis que pour la deuxième zone, il est compris entre 6,9 et 7,5.

Les valeurs de la CE montrent que les échantillons analysés sont chargés en sels avec une salinité plus élevée dans la zone 2. La CE varie entre 2656 $\mu\text{S/cm}$ et 9060 $\mu\text{S/cm}$ dans la zone 1 avec une moyenne 3872 $\mu\text{S/cm}$ et un CV de 37,39 % tandis que dans la deuxième zone la CE varie entre 4683 $\mu\text{S/cm}$ et 10178 $\mu\text{S/cm}$ avec une moyenne de 6298 $\mu\text{S/cm}$ et un coefficient de variation plus faible (21,67 %). Les TDS varient entre 1677 et 5379 mg/l dans la zone 1 avec une moyenne de 2446,5 mg/l, tandis que dans la zone 2 les valeurs du TDS varient entre 3214 et 5653 mg/l avec une moyenne de 3695 mg/l. Cela indique que ces eaux sont modérément salées selon la classification des eaux naturelles (Rhoads et al.,1992), avec une salinité plus importante dans la zone 2.

Les concentrations des cations monovalents (Na^+ et K^+) sont plus importantes dans la zone 1, cependant les cations bivalents (Mg^{2+} et Ca^{2+}) sont plus concentrés dans la zone 2. Les concentrations du Ca^{2+} sont nettement supérieures aux autres cations avec une valeur moyenne de 593 mg/l dans la zone 1 et 677,6 mg/l dans la zone 2, tandis que celles du K^+ sont les plus faibles avec une valeur moyenne de 30,04 mg/l dans la zone 1 et 27,4 mg/l dans la zone 2. Les coefficients de variations des cations indiquent que le cation le plus variable est Na^+ (CV= 44,79 %) tandis que les cations les moins variables sont Mg^{2+} pour la zone 1 (CV= 10,91 %) et Ca^{2+} pour la zone 2 (CV= 11,03 %).

Les concentrations des anions Cl^- , NO_3^- et SO_4^{2-} sont plus importantes dans la zone 2, tandis que celles de l'anion HCO_3^- est plus importante dans la zone 1. L'anion le plus concentré est Cl^- avec une valeur moyenne de 860 mg/l dans la zone 1 et 1249 mg/l dans la zone 2. L'anion le moins concentré est NO_3^- avec une valeur moyenne de 75,25 mg/l dans la zone 1 et 96 mg/l dans la zone 2. Les coefficients de variations des anions indiquent que HCO_3^- est l'ion le plus variable pour la zone 1 (CV= 85,43 %), tandis que SO_4^{2-} est le plus variable dans la zone 2 (CV= 60,84 %). Les anions les moins variables sont NO_3^- pour la zone 1 et HCO_3^- pour la zone 2 (CV= 18,1 %).

II.2.3. Faciès chimique

L'identification des faciès chimiques des échantillons analysés est faite par leurs projections dans le diagramme de Piper (1953). Ce diagramme permet de classer les eaux selon la combinaison de deux triangles. Le premier triangle représente les pourcentages des anions majeurs et le deuxième représente les pourcentages des cations majeurs. La figure 41 présente la projection des eaux des deux zones étudiées sur le diagramme de Piper.

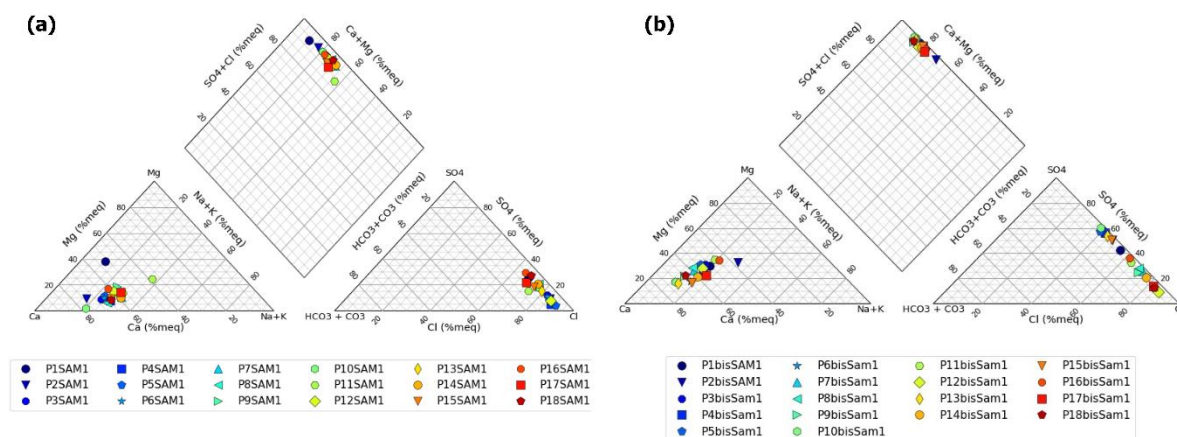


Figure 42 : Diagramme de Piper pour les échantillons de la zone 1(a) et la zone 2 (b)

Dans la zone 1, tous les échantillons ont un faciès chloruré calcique (Ca-Cl), sauf l'échantillon N° 10 est de faciès mixte (Cl-Ca-Mg-Na). Dans la zone 2, la moitié des échantillons ont un faciès chloruré calcique (Ca-Cl), 28 % ont un faciès sulfaté calcique (SO₄-Ca), 22 % échantillons ont un faciès mixte. A l'échelle des deux zones, 78 % ont un faciès chloruré calcique (Ca-Cl), 14 % des échantillons

(principalement localisés à l'Est et au Nord Est de la zone 2) ont un faciès sulfate calcique ($\text{SO}_4\text{-Ca}$). Le reste des échantillons ont un faciès mixte.

D'après la figure 41 nous remarquons aussi que pour tous les échantillons, les alcalins terreux ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) sont dominants par rapport aux métaux alcalins ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$), les radicaux des acides forts ($\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$) sont dominants par rapport aux radicaux des acides faibles ($\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$).

D'après les formules ioniques des échantillons analysés, Ca^{2+} est l'ion dominant tous les échantillons de la zone 1 sauf pour l'échantillon numéro 10 où le Cl est l'ion dominant, les formules chimiques dominantes sont $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ et $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$. Dans la zone 2, les éléments dominants sont : Cl^- pour la moitié des échantillons, SO_4^{2-} pour 33 % échantillons et Ca^{2+} pour 3 échantillons. Les formules dominantes sont $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ et $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$.

II.2.4. Le diagramme de Gibbs

Le diagramme de Gibbs (1970) permet d'identifier le processus géochimique qui influence la qualité de l'eau souterraine (Marandi and Shand, 2018). La projection des échantillons analysés sur les diagrammes de Gibbs (Figure 42) montre que le processus géochimique qui influence la composition de l'eau souterraine est l'évaporation. L'évaporation est favorisée par le climat aride qui règne sur la région d'étude, à la faible profondeur de l'eau et à la forte transmissivité thermique des formations géologiques du quaternaire qui sont dominées par le sable éolien (Or et al., 2013 ; Melouah et al., 2020 ; Krishan et al. 2021). Les échantillons de la zone 2 frissent avec le phénomène « seawater », due probablement à la contamination par les eaux des chotts situés à proximité de cette zone. De plus que la profondeur de la nappe au nord de la zone est inférieur à 10 m, ce qui facilite la contamination par les eaux de surface hyper-salés (Marandi et Shand, 2018).

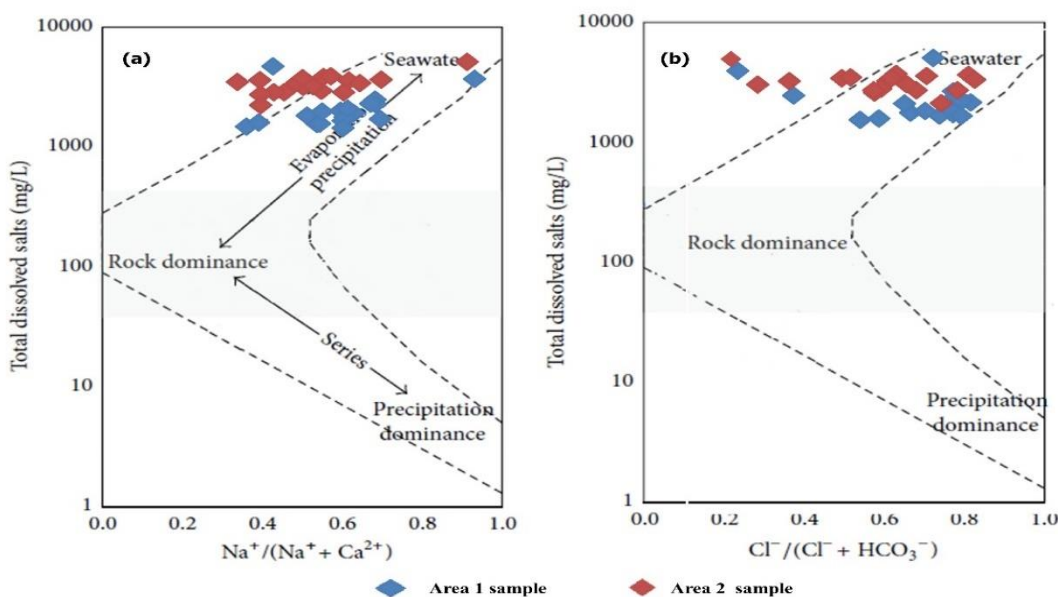


Figure 43 : Diagramme de Gibbs pour les échantillons de la zone 1(a) et la zone 2 (b)

II.2.5. Indice de Saturation

L'indice de saturation (SI) évalue l'équilibre entre la solution et la formation des minéraux, il permet d'étudier les mécanismes de l'évolution hydrochimique (Li et al., 2016). Dans notre étude, cet indice est calculé par le modèle thermodynamique du logiciel PHREEQC (Parkhurst and Appelo, 2013). SI est exprimé par l'équation (15) où K_{IAP} est le coefficient de l'activité ionique du produit et K_{SP} est le coefficient de solubilité du produit.

$$SI = \frac{\text{LOG } K_{IAP}}{\text{LOG } K_{SP}} \quad (15)$$

Dans le cas où $SI > 0$, le minéral a une tendance à se précipiter. Dans le cas où $SI < 0$ le minéral a une tendance à se dissoudre. Dans le cas où $SI = 0$, la solution est en équilibre avec le minéral.

La figure 43 et le tableau 25 présentent les indices de saturation (SI) des minéraux (aragonite, calcite, dolomite, anhydrite, gypse, halite) pour les échantillons analysés dans la zone 1 et la zone 2.

Tableau 25 : Paramètres statistiques des indices de saturation

| | Area 1 | | | | Area 2 | | | |
|-----------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|
| | Min | Max | Moy | CV | Min | Max | Moy | CV |
| Anhydrite | -2,15 | -0,03 | -1,10 | -0,43 | -1,12 | -0,20 | -0,54 | -0,53 |
| Aragonite | -0,06 | 0,74 | 0,28 | 0,59 | -0,31 | 0,24 | -0,01 | -16,42 |
| Calcite | 0,09 | 0,89 | 0,43 | 0,39 | -0,17 | 0,39 | 0,14 | 1,02 |
| Dolomite | -1,39 | 1,70 | 0,17 | 3,72 | -0,44 | 0,40 | 0,02 | 14,02 |
| Gypse | -1,92 | 0,20 | -0,87 | -0,55 | -0,90 | 0,02 | -0,32 | -0,91 |
| Halite | -5,80 | -4,58 | -5,34 | -0,05 | -5,67 | -4,82 | -5,27 | -0,04 |

Notes : Moy : Moyenne, Min : Minimum, Max : Maximum, CV = Coefficient de Variation



Figure 44 : Indices de saturation des échantillons de la zone 1(a) et la zone 2 (b)

D'après la figure 43 et le tableau 25, on remarque que les SI de l'halite (NaCl) sont négatifs et représentent les valeurs les plus faibles pour la totalité des échantillons, ils varient entre -5,8 et -4,58 avec une valeur moyenne de -5,34 dans la zone 1, et ils varient entre -5,67 et -4,82 avec une valeur de -5,27 dans la zone 2. Ceci explique la forte tendance de l'halite (NaCl) à la dissolution sur l'ensemble des deux zones. Les SI de l'anhydrite et du gypse sont négatifs aussi sur l'ensemble des échantillons mais avec des valeurs moins faibles par rapport à celles de l'halite, surtout dans la zone 2.

Cependant les SI de la calcite (CaCO_3) sont positifs sur l'ensemble des échantillons de la zone 1 et 89 % des échantillons de la zone 2, ses valeurs sont plus fortes dans la zone 1 où elles varient entre 0,09 et 0,89 avec une moyenne de 0,43, ce qui indique la tendance de la calcite à la précipitation dans cette zone. Tandis que dans la zone 2 les SI de la calcite sont plus faibles varient entre -0,17 et 0,39 avec une moyenne de 0,14, ceci indique que la calcite a une tendance légère à la précipitation.

La tendance de la dolomite est variable mais proche de l'équilibre dans les deux zones étudiées. La tendance dominante de l'aragonite dans la zone 1 est la précipitation, cependant sa tendance est variable dans la zone 2.

Les résultats des SI des minéraux (Figure 43) montrent que les minéraux carbonatés (calcite, aragonite, dolomite) ont tendance à se précipiter, cependant les évaporites (gypse, halite, anhydrite) ont tendance à se dissoudre, cela explique l'origine de la

minéralisation de cet aquifère et coïncide avec les résultats obtenus par Guendouz (2006) pour le même aquifère, dans une zone d'échantillonnage voisine.

II.2.6. Indices Chloro-Alcalins

Les indices chloro-alcalins sont utilisés pour l'évaluation des échanges ioniques entre l'eau souterraine et le milieu géologique (Ndoye et al., 2018). Les indices CAI-1 et CAI-2 (équations 2 et 3) ont été proposés par Schoeller (1965), les valeurs positives de ces indices indiquent l'échange des métaux alcalins (Na^+ et K^+) avec les alcalins terreux (Ca^{2+} et Mg^{2+}), les valeurs négatives indiquent le processus inverse (Kumar et al., 2019). Le tableau 26 affiche les valeurs des CAI-1 et CAI-2 pour les échantillons analysés.

$$\text{CAI 1} = \frac{(\text{Cl}^- - (\text{Na}^+ + \text{K}^+))}{\text{Cl}^-} \quad (16)$$

$$\text{CAI 2} = \frac{(\text{Cl}^- - (\text{Na}^+ + \text{K}^+))}{\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-} + \text{NO}_3^-} \quad (17)$$

Tableau 26 : Classification et paramètres descriptifs des indices CAI-1 et CAI-2

| | Area | CAI > 0 | CAI < 0 | Min | Max | Moyenne | Σ |
|-------|--------|------------|---------|------|------|---------|----------|
| CAI-1 | Area 1 | 18 (100 %) | 0 | 0,32 | 0,64 | 0,48 | 0,08 |
| | Area 2 | 18 (100 %) | 0 | 0,14 | 3,77 | 1,67 | 1,05 |
| CAI-2 | Area 1 | 18 (100 %) | 0 | 0,55 | 0,81 | 0,70 | 0,07 |
| | Area 2 | 18 (100 %) | 0 | 0,39 | 3,27 | 1,37 | 0,97 |

D'après le Tableau 26, les indices CAI-1 et CAI-2 sont positifs pour la totalité des échantillons analysés. Ceci indique la substitution du sodium et du potassium de l'eau souterraine par le calcium et le magnésium du milieu géologique. Cela coïncide avec résultats précédents qui présentent la dominance du calcium par rapport aux autres cations.

II.3. Evaluation de la qualité de l'eau pour l'irrigation

Dans les régions arides et semi arides la qualité de l'eau pour l'irrigation est très importante pour la gestion durable de l'agriculture (Qadir et al., 2014). L'évaporation intense dans ces régions provoque le dépôt et l'accumulation des sels dans la couche arable du sol. Ce phénomène participe à la dégradation des sols ainsi qu'à la réduction de la croissance et du rendement des cultures (Maas, 1990 ; Ahammed et al., 2020). Dans cette étude, la qualité de l'eau pour l'irrigation est évaluée en utilisant les indices mentionnés dans le tableau 27 : Na%, MH%, PS, CE, TH, Cl⁻ et par les diagrammes de Wilcox et Riverside.

Tableau 27 : Classification de l'eau d'irrigation

| Paramètres | Valeurs | ^a Zone 1 | ^B Zone 2 | Classe |
|----------------------------|-----------|---------------------|---------------------|---|
| Na% | <20 | 2 (11%) | 15 (83%) | Excellente |
| | 20–40 | 16 (89%) | 3 (17%) | Good |
| | 40–60 | 0 | 0 | Acceptable |
| | 60–80 | 0 | 0 | Douteuse |
| | >80 | 0 | 0 | Mauvaise |
| MH% | <50 | 18 (100) | 18 (100) | Bonne |
| | >50 | 0 | 0 | Mauvaise |
| PS | 1--3 | 0 | 0 | Utilisable pour tous les sols |
| | 3--15 | 0 | 0 | Utilisable pour les sols à texture moyenne et grossière |
| | 15--20 | 2 (11%) | 0 | Utilisable pour les sols grossiers |
| CE (Riverside, 1954) | > 20 | 16 (89%) | 18 (100%) | Non utilisable |
| | <250 | 0 | 0 | Faible salinité (Bonne) |
| | 250--750 | 0 | 0 | Moyenne salinité (Acceptable) |
| | 750--2250 | 0 | 0 | Forte salinité (Médiocre) |
| | >2250 | 18 (100) | 18 (100) | Très forte salinité (Mauvaise) |
| CE (Todd, 1980) | <250 | 0 | 0 | Excellente |
| | 250--750 | 0 | 0 | Bonne |
| | 750--2250 | 0 | 0 | Acceptable |
| | 2250-5000 | 16 (89) | 4 (22) | Douteuse |
| TH | >5000 | 2 (11) | 14 (78) | Mauvaise |
| | <75 | 0 | 0 | Douce |
| | 75—150 | 0 | 0 | Dureté modérée |
| | 150—300 | 0 | 0 | Dure |
| | >300 | 18 (100%) | 18 (100%) | Très dure |
| Cl | < 2 | 0 | 0 | Bonne |
| | 2-4 | 0 | 0 | Acceptable |
| | 4-10 | 0 | 0 | Douteuse |
| | >10 | 18 (100%) | 18 (100%) | Mauvaise |

^a Nombre des échantillons de la zone 1 (pourcentage par rapport au total de la zone)

^b Nombre des échantillons de la zone 2 (pourcentage par rapport au total de la zone)

II.3.1. Pourcentage du sodium (Na%)

Le Na% permet d'apprécier la qualité de l'eau vis-à-vis de l'excès de sodium. Cet excès peut détériorer les propriétés physiques du sol en réduisant sa perméabilité, comme il peut limiter la croissance des plantes par la perturbation de l'absorption et certains métabolismes (Zaman et al., 2018). Ce paramètre a été défini par Raghunath (1987) et calculé par l'équation 18 où toutes les concentrations sont en meq/l.

$$\text{Na}\% = \frac{\text{Na}^+ + \text{K}^+}{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{K}^+} \times 100 \quad (18)$$

La classification des résultats selon les normes (Rghunath, 1987) présentés dans le Tableau 27 montre que la majorité des échantillons de la zone 1 sont de bonne qualité pour l'irrigation tandis que la majorité des échantillons de la zone 2 sont d'excellente qualité. Vis-à-vis du Na%, les échantillons analysés sont utilisables pour l'irrigation sans risques majeurs sur les sols.

II.3.2. Magnesium Hazard

L'indice MH évalue la qualité de l'eau vis-à-vis de la proportion du magnésium par rapport aux cations divalents. Cet indice est calculé par l'équation 19 proposée par Szabolcs et Darab (1964).

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

D'après le tableau 27, tous les échantillons sont utilisables pour l'irrigation par rapport à leurs compositions en magnésium.

II.3.3. La salinité potentielle

L'indice PS a été proposé par Doneen (1964), pour l'évaluation de la qualité de l'eau vis-à-vis des risques de salinisation des sols, provoqués principalement par les ions Cl^- et SO_4^{2-} . Cet indice est calculé par l'équation 20 où toutes les concentrations sont en meq/l.

$$\text{PS} = \text{Cl}^- + \left(\frac{1}{2}\right) \text{SO}_4^{2-} \quad (20)$$

D'après le tableau 27, nous observons que 89 % des échantillons de la zone 1 et la totalité des échantillons de la zone 2 sont susceptibles de provoquer une salinisation secondaire pour tous les types de sol. Tandis que deux échantillons de la zone 1 ne présentent pas une salinisation pour les sols grossiers.

II.3.4. Conductivité Electrique

La conductivité électrique est le paramètre le plus utilisé pour l'expression de la salinité d'une eau, il existe plusieurs normes pour la classification des eaux d'irrigation. Les classifications les plus utilisées sont celles de Riverside (Richards, 1954) et celle de Todd (1980), qui se basent sur l'effet de la salinité sur les propriétés physiques et chimiques du sol dans les conditions normales et pour une longue durée. Le tableau 27 présente les classifications des échantillons analysés selon les normes de Riverside et celles de Todd.

Les diagrammes de Riverside (Richards, 1954) et Wilcox (1955) présentés dans la figure 44 permettent d'évaluer la qualité de l'eau pour l'agriculture vis-à-vis de la salinité et l'alcalinité. Le diagramme de Riverside classe les échantillons par la combinaison de deux paramètres. Sur l'axe horizontal, les échantillons sont classés en 4 classes selon leurs salinités exprimées par la CE suivant les normes de Riverside (Tableau 27). Sur l'axe vertical, les échantillons sont classés selon leurs alcalinités exprimées par le SAR qui est calculé par l'équation 21 où toutes les concentrations sont en meq/l. Dans ce diagramme, les normes d'interprétation du

SAR ne sont pas fixes mais elles dépendent de la valeur de la CE, la même valeur du SAR a un impact plus important sur le sol où la CE est plus faible (Richards, 1954). Le diagramme de Wilcox permet de classer les échantillons selon leurs aptitudes à l'irrigation par la combinaison de la CE et du Na%.

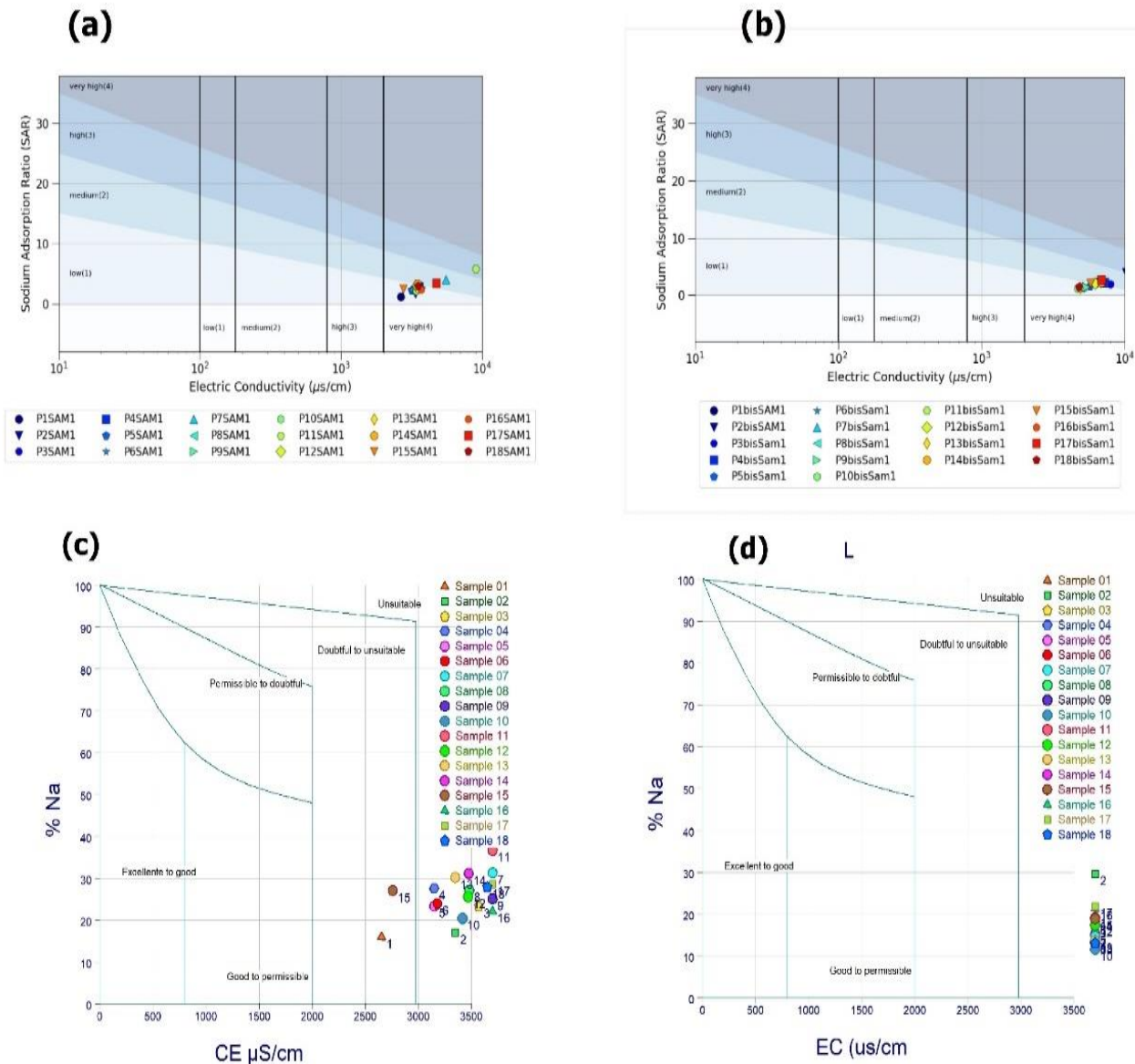


Figure 45 : Diagrammes de Riverside (a et b) et Wilcox (c et d) pour la zone 1 (a, c) et la zone 2 (b, d)

Le SAR est calculé par l'équation 21 où toutes les concentrations sont en meq/l

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{1/2(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})}} \quad (21)$$

D'après la classification de Todd (1980) présentée dans le tableau 27, la majorité des eaux de la zone 1 sont à utilisation douteuse pour l'irrigation tandis que la majorité des échantillons de la zone 2 sont inutilisables.

D'après le diagramme de Riverside présenté dans la figure 44 (a et b), la totalité des échantillons appartient à la classe C4 qui a une salinité très élevée et qui ne

devrait pas être utilisée pour l'irrigation dans les conditions normales à cause du risque de salinisation du sol. Leur utilisation nécessite le respect des doses de lessivage appropriées ainsi qu'une sélection des plantes tolérantes en sels (Richards, 1954). Pour la zone 1 nous remarquons que 83% des échantillons appartiennent à la classe S1 à faible sodicité, ce qui montre que les eaux de la nappe dans la zone 1 ont un faible danger d'alcalinisation du sol.

Dans la zone 2, 55% des échantillons ont une sodicité modérée et 39% présentent une faible sodicité et un seul échantillon (localisé à l'extrême nord de cette zone) possède une forte sodicité. Ceci annonce un faible risque d'alcalinisation du sol sachant que la zone d'étude est caractérisée par un sol sableux à faible capacité d'échanges cationique.

Le diagramme de Wilcox (1955) présenté par la figure 44 (c et d)) montre que la totalité des échantillons de la zone 2 et la majorité des échantillons de la zone 1 sont inutilisables pour l'irrigation à cause de la forte salinité des échantillons.

La salinité excessive provoque une accumulation des sels dans la couche arable du sol, surtout dans les zones arides où l'eau s'évapore et les sels se déposent sur la surface (Abdenmour et al., 2021). Quand la CE dépasse le seuil de tolérance de la culture, elle affecte la croissance et le rendement de la culture en limitant l'absorption par l'effet hyper-osmotique (Safdar et al. 2019). L'effet de la salinité sur le rendement des cultures (Maas, 1990 ; Maas, 1993 ; Maas et Grattan, 1999) où on peut estimer les diminutions du rendement due à la salinité en fonction de la CE de l'eau d'irrigation ou celle du sol.

II.3.5. La dureté

La dureté est aussi un paramètre hydro chimique qui permet d'évaluer les problèmes de colmatage au niveau des systèmes d'irrigation sous pression. La dureté d'une eau est exprimée par l'indice TH qui est calculé par l'équation 22 où les concentrations des ions Mg^{2+} et Ca^{2+} sont en meq/l (Sawyer et McCarty, 1967).

$$TH = (Ca^{2+} + Mg^{2+}) \times 50 \quad (22)$$

D'après le tableau 27, tous les échantillons ont une dureté très élevée. Une eau très dure provoque l'entartrage au niveau des conduites et des rampes d'irrigation, aussi le colmatage du goutte à goutte (Liu et al., 2015)

Le calcium présent à concentrations excessives peut affecter négativement la germination et la croissance des plantes, ceci est reconnu par l'apparition de taches jaunâtres (cristaux d'oxalate de calcium) au niveau des feuilles et du fruit (White and Broadley, 2003).

II.3.6. Toxicité chlorique

La concentration des ions toxiques notamment les chlorures sont importants dans l'évaluation de la qualité d'une eau pour l'irrigation. Il peut affecter la plante de différentes façons lorsqu'il dépasse son seuil de tolérance. Directement par l'accumulation de cet ion dans les feuilles, ce qui provoque des nécroses foliaires et une défoliation dans les cas extrêmes. Indirectement par le déséquilibre de la balance

nutritive de la plante (Grieve et al., 2012). Le tableau 27 affiche la classification des eaux selon la concentration des chlorures selon Maas (1990).

Selon la classification de Maas (1990) présentée dans le tableau 27, les concentrations du chlore sont excessives pour la totalité des échantillons. L'effet du Cl^- sur la plante peut être accentué dans le cas de l'irrigation par aspersion, car cette technique d'irrigation favorise l'adsorption des sels sur la surface foliaire (Benes et al., 1996). Selon Ayers et Westcot (1985), une concentration du chlore inférieure à 3 meq/l est recommandée pour l'irrigation par aspersion.

II.4. Impacte de l'eau d'irrigation sur les cultures

II.4.1. Effets sur les feuilles

Selon Naeni et al. (2006), les ions Na^+ et Cl^- provoquent des nécroses foliaires et une défoliation dans les cas extrêmes quand leurs concentrations dépassent le seuil de tolérance de la culture. Cet effet est plus remarqué dans le cas de l'irrigation par aspersion à cause du contact direct feuille-eau. Selon la classification présentée dans le tableau 8, tous les échantillons analysés sont susceptibles de provoquer des brûlures sévères au niveau des feuilles et une inhibition de la croissance à cause de la forte concentration du Cl^- qui dépasse 350 mg/l pour la totalité des échantillons.

Le tableau 13 (partie bibliographique) classe les cultures selon leurs seuils de tolérance aux ions Na^+ et Cl^- dans le cas de l'irrigation par aspersion. La confrontation de cette classification aux résultats présentés dans le tableau 24 montre que l'irrigation par aspersion est susceptible d'affecter les feuilles de la majorité des cultures, sauf les plus résistantes : Chou-fleur, Cotton, betterave sucrière et le tourne sol.

Les concentrations excessives du Cl^- expliquent la différence de rendement entre le pivot artisanal et le goutte à goutte observées durant notre enquête. La technique d'irrigation joue un rôle important dans le cas de l'irrigation avec une eau à forte concentration en chlorures et en sodium. Les surfaces irriguées par goutte à goutte les plus grandes sont localisées dans les régions à forte concentration en chlorures et qui sont les communes de Hassani Abdelkrim, Debila, Sidi Aoun, Magrane et la commune d'El Oued (Annexe 4).

II.4.2. Effets sur le rendement

Le tableau 28, présente la diminution du rendement due à la salinité de l'eau d'irrigation et les seuils de tolérances de plusieurs cultures, basés sur les travaux de Maas et Grattan (1999). La confrontation des résultats d'analyses aux données présentées dans le tableau 28 permet d'avoir une estimation des réductions de rendements prévisibles pour différentes cultures. Ceci permet aussi de choisir la culture adéquate au niveau de la salinité de l'eau d'irrigation.

Tableau 28 : Tolérance des cultures à la salinité (Maas et Grattan, 1999)

| Nom commun | Nom scientifique | Seuil de tolérance ($\mu\text{S}/\text{cm}$) | EC_e à 10% de déclin ($\mu\text{S}/\text{cm}$) | EC_e à 25% de déclin ($\mu\text{S}/\text{cm}$) | Seuil maximum de tolérance ($\mu\text{S}/\text{cm}$) |
|--------------------|--------------------------------|--|---|---|--|
| Maïs (Grain) | <i>Zea mays</i> | 1,100 | 1,700 | 2,500 | 6,700 |
| Carotte | <i>Daucus carota</i> | 700 | 1,100 | 1,900 | 5,400 |
| Palmier dattier | <i>Phoenix dactylifera</i> | 2,700 | 4,500 | 7,300 | 21,000 |
| Betterave sucrière | <i>Beta vulgaris</i> | 4,700 | 5,800 | 7,500 | 16,000 |
| Tomate | <i>Lycopersicum esculentum</i> | 1,700 | 2,200 | 3,400 | 8,400 |
| Blé tendre | <i>Triticum aestivum</i> | 4,000 | 4,900 | 6,300 | 13,000 |
| Orge | <i>Hordeum vulgare</i> | 5,300 | 6,700 | 8,700 | 19,000 |
| Pomme de terre | <i>Solanum Tuberosum</i> | 1,100 | 1,700 | 2,500 | 6,700 |
| Olivier | <i>Olea europea</i> | 1,800 | 2,600 | 3,700 | 14,000 |
| Oignon | <i>Allium cepa</i> | 800 | 1,200 | 1,800 | 5,000 |
| Poivron | <i>Capsicum annum</i> | 1,000 | 1,500 | 2,200 | 5,800 |

EC_e = Conductivité électrique de l'eau d'irrigation

D'après le tableau 28 et les résultats d'analyses, les réductions du rendement sont supérieures à 25 % pour les cultures les moins tolérantes : maïs (grain), carotte, oignon, pomme de terre, poivron. Dans les régions les plus salées (Nord de la vallée et les alentours de la ville d'El Oued), le niveau de la salinité de l'eau d'irrigation dépasse le seuil maximum de la tolérance des cultures citées précédemment.

Les diminutions du rendement du palmier dattier oscillent entre 0 % et 25 % pour la majorité des eaux d'irrigations analysées, cette culture présente le seuil maximum de tolérance le plus grand (21 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$), qui signifie que cette culture est irrigable dans toute la région étudiée. La betterave sucrière et l'orge présentent les seuils de tolérances les plus importants et sont les cultures les moins affectées par la salinité de l'eau d'irrigation dans la vallée du Souf, leurs chutes de rendement dues à la salinité de l'eau ne dépassent pas 10 % pour la majorité des échantillons, et leurs seuils maximums de tolérance indiquent qu'elles sont irrigables dans toute la zone étudiée.

II.5. Conclusion

Les analyses hydrochimiques de 36 échantillons ont montré que l'eau de cette nappe est salée, la CE varie entre 2656 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 10178 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et elle augmente du Sud vers le Nord. Le diagramme de Piper indique que les faciès chimiques dominants sont Ca-Cl pour 78% des échantillons, suivi par SO_4 -Ca pour 14% des échantillons. Le diagramme de Gibbs a montré que la composition chimique de ces eaux est

influencée par l'évaporation, ainsi que par une probable contamination par les eaux de surface hypersalées au nord de la vallée. Les indices de saturation calculés par le modèle thermodynamique du logiciel PHREEQC ont montré que les minéraux carbonatés ont tendance à se déposer contrairement aux évaporites qui ont tendance à la dissolution.

Les indices d'évaluation de la qualité de l'eau et la projection des résultats sur le diagramme de Wilcox et Riverside ont montré que les eaux de la nappe phréatique ont une alcalinité faible à moyenne et qui ne présentent pas un grand danger sur les sols sableux de la vallée. Cependant leur salinité est très forte, ceci indique de forts risques de salinisation des sols et qui peuvent être accentués par l'aridité du climat qui favorise le dépôt des sels dans la couche superficielle du sol. Les TH des échantillons analysés indiquent que l'eau de cette nappe est très dure et elle présente des risques de colmatage et d'entartrage dans le cas de l'irrigation sous pression.

Les résultats obtenus confirment les hypothèses de notre enquête présentés dans le chapitre 1 qui supposent que la qualité de l'eau d'irrigation est la cause principale de la salinisation des sols dans la vallée du Souf. Les concentrations excessives en chlorures expliquent une partie de la différence de rendements entre le pivot artisanal et le goutte-à-goutte et justifie les proportions supérieures de cette dernière dans les communes du centre et du Nord de la vallée du Souf.

III. Evolution des paramètres physico-chimiques des sols irrigués

III.1. Introduction

Dans le chapitre précédent, l'analyse hydrochimique de l'eau de la nappe phréatique a affirmé que l'eau d'irrigation présente une forte salinité. La composition chimique des échantillons analysés a mis en évidence un grand risque de la salinisation secondaire des sols, qui est un phénomène très courant dans les régions arides (Zaman et al., 2018). L'intensité et l'évolution de ce phénomène dans le temps dépendent de plusieurs facteurs liés aux propriétés physicochimiques de l'eau et du sol, ainsi qu'à d'autres facteurs techniques liés à l'irrigation (Shahid et al., 2013).

Dans ces conditions, la technique d'irrigation joue un rôle primordial dans l'évolution des propriétés chimiques du sol par le contrôle de l'écoulement de l'eau dans le sol (Jha et al., 2017). Surtout dans les zones caractérisées par un climat évaporant, et par l'absence d'un lessivage naturel par les pluies.

Dans ce chapitre nous allons étudier l'évolution de certains paramètres physico-chimiques des sols irrigués par les deux techniques d'irrigation les plus fréquentes dans la vallée du Souf : le pivot artisanal et le goutte à goutte à gaine souple. Ceci permettra de caractériser l'évolution de la salinité des sols de la Vallée du Souf et de comparer l'effet de chaque technique d'irrigation sur les propriétés chimiques du sol.

III.2. Caractérisation physico-chimique du site expérimental

III.2.1. Propriétés physico-chimiques de l'eau d'irrigation

Les 4 parcelles qui font l'objet de cette partie de l'étude sont irriguées avec deux forages (F1 et F2) qui correspondent aux points de prélèvements P07 et P08 de la zone 2, présentés dans la figure 17. Le tableau 1 présente les résultats d'analyse hydro-chimiques de l'eau des deux forages.

Tableau 29 : Paramètres physico-chimiques des Forages 1 et 2

| | pH | CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) | Ca^{2+} (mg/l) | Mg^+ (mg/l) | Na^+ (mg/l) | K^+ (mg/l) | Cl^- (mg/l) | SO_4^{2-} (mg/l) | HCO_3^- (mg/l) | NO_3^- (mg/l) |
|----|------|-----------------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------------|----------------------------|---------------------------|
| F1 | 7,47 | 5 110 | 637.28 | 174.99 | 170 | 21 | 1354.31 | 654 | 68.32 | 58.27 |
| F2 | 7,41 | 4 920 | 625.25 | 187.14 | 150 | 22 | 1311.77 | 714 | 79.30 | 48.2 |

D'après le tableau 29, la composition chimique des eaux des deux forages est relativement similaire, on remarque un écart inférieur à 10% pour tous les paramètres présentés dans le tableau 1. Le pH des deux forages est neutre cependant les valeurs de la CE indiquent une salinité très élevée. D'après la classification de Riverside (figure 44), l'irrigation avec les eaux des forages F1 et F2 engendre un fort risque de la salinisation du sol et un faible risque d'alcalisation. Les valeurs du Cl^- dépassent largement les normes de l'eau d'irrigation (Tableau 27), ce qui peut provoquer une toxicité surtout dans le cas de l'irrigation par aspersion.

Les ions ayant les plus grandes concentrations sont : Cl^- et Ca^{2+} . Tandis que les ions NO_3^- et K^+ ont les concentrations les plus faibles. D'après le diagramme de Piper ces eaux appartiennent aux faciès chloruré calcique (Ca-Cl). Leurs formules ioniques sont : $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ et $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$.

Le tableau 30 présente les valeurs des indices de saturations pour les minéraux : Anhydrite, Aragonite, Calcite, Dolomite, Gypse et Halite des eaux du Forage 1 et Forage 2.

Tableau 30 : Valeurs des indices de saturations des différents minéraux

| | Anhydrite | Aragonite | Calcite | Dolomite | Gypseum | Halite |
|----------|-----------|-----------|---------|----------|---------|--------|
| Forage 1 | -0,66 | 0,13 | 0,28 | 0,32 | -0,43 | -5,33 |
| Forage 2 | -0,63 | 0,13 | 0,28 | 0,37 | -0,41 | -5,4 |

D'après les résultats du tableau 30, on déduit que cette eau a tendance à déposer la Calcite, la Dolomite et l'Aragonite (les minéraux carbonatés) et à dissoudre l'Anhydrite, le gypse et l'halite (les évaporites).

III.2.2. Etat initial du Sol

L'état initial du sol des parcelles étudiées est caractérisé par deux points témoins (figure 19) où le sol est à son état naturel (non irrigué), composés chacun de trois échantillons aux profondeurs : 10 cm, 30 cm, 50 cm.

III.2.2.1. Paramètres physiques

Le tableau 31 présente les paramètres de texture et de structure des Témoins 1 et Témoin 2.

Tableau 31 : Paramètres physiques des témoins

| | Sable grossier (%) | Sable fin (%) | Limons (%) | Argile (%) | MO (%) | Da | Dr | P (%) |
|----------|--------------------|---------------|------------|------------|--------|------|------|-------|
| Témoin 1 | 40 | 56 | 4,00 | 0,00 | 2,00 | 1,64 | 2,51 | 34,78 |
| Témoin 2 | 41 | 53 | 6,00 | 0,00 | 1,00 | 1,63 | 2,60 | 37,35 |
| Moyenne | 38,5 | 55 | 5,00 | 0,00 | 1,50 | 1,63 | 2,55 | 36,07 |

MO : Matière organique, Da : Densité apparente, Dr : Densité réelle, P : Porosité

La texture du sol où la granulométrie est un critère de différenciation de la phase solide du sol (Musy et Soutter, 1991). D'après les résultats présentés dans le tableau 3, le sable fin (2000 μm : 50 μm) et le sable grossier (2000 μm : 200 μm) ont les plus grands pourcentages avec 55 % et 38,5 % (93,5 % confondus). Les limons (50 μm : 2 μm) occupent une partie mineure avec 5 % et le pourcentage de l'argile (<2 μm) est nul. Le positionnement des échantillons sur le triangle textural du sol (USDA, 1999) indique qu'ils appartiennent à la texture sableuse. Le pourcentage de la matière organique est très faible (1,5 %) surtout que le sol possède une texture sableuse.

Les valeurs des paramètres de structure (Da, Dr et P%) correspondent à celles d'un sol sableux peu compacté, très filtrant. Cependant les sols sableux sont des sols grossiers, caractérisés par une faible microporosité donc une faible rétention d'eau.

III.2.2.2. Paramètres chimiques

Le tableau 32 présente les résultats d'analyse chimique des témoins 1 et 2. La CE et les sels majeurs ont été effectués sur un extrait aqueux 1/5, tandis que le pH est mesuré sur un extrait aqueux 1/2,5.

Tableau 32 : Paramètres chimiques décrivant l'état initial du sol

| | CE _{1/5} μS/cm | pH _{1/2,5} | Ca ²⁺ (mg/l) | Mg ⁺ (mg/l) | K ⁺ (mg/l) | Na ⁺ (mg/l) | Cl ⁻ (mg/l) | SO ₄ ²⁻ (mg/l) | HCO ₃ ⁻ (mg/l) |
|----------|----------------------------|---------------------|----------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---|---|
| Témoin 1 | 2026,67 | 7,88 | 42,75 | 5,27 | 10,05 | 14,45 | 355,56 | 144,18 | 5,90 |
| Témoin 2 | 1950,00 | 7,82 | 40,08 | 4,24 | 10,65 | 15,81 | 268,61 | 126,42 | 6,10 |
| Moyenne | 1988,33 | 7,85 | 41,42 | 4,25 | 10,35 | 15,13 | 262,08 | 135,30 | 6,00 |

Les résultats présentés dans le tableau 32, montrent que les sols analysés présentent des valeurs très proches pour tous les paramètres sauf pour SO₄²⁻ où l'écart est 12%. Le pH est relativement neutre (pH<8,5) tandis que CE_{1/5} varie entre 1950 μS/cm pour le témoin 2 et 2026 μS/cm pour le témoin 1. Equivalent aux valeurs de CE_e de 9379 μS/cm et 9745 μS/cm selon la formule Richards (1954) présentée dans l'équation 13, 10471 μS/cm et 10925 μS/cm selon la formule de Ozcan et al. (2006) présentée dans l'équation 14. Les valeurs du pH et de la CE montrent que le sol non irrigué (état naturel) du site expérimental est non-sodique et modérément salin selon la classification USDA (Richards, 1954).

La projection des résultats sur le diagramme de Piper indique que le faciès chimique de la solution du sol est chloruré calcique (Ca-Cl) pour les deux échantillons. Cl⁻ est l'ion dominant, la formule ionique des échantillons est Cl⁻>SO₄²⁻>HCO₃⁻ pour les anions et Ca²⁺> Mg⁺>Na⁺>K⁺ pour les cations. Le faciès chimique et les formules ioniques précédentes indiquent une analogie entre chimisme de l'eau de la nappe phréatique et du sol à son état naturel. Ceci est expliqué par les interactions entre l'eau de la nappe phréatique (8-10 m de profondeur) et le sol est de même nature que le substrat géologique de la nappe.

III.2.3. Paramètres hydrotechniques des parcelles

III.2.3.1. Performances des systèmes d'irrigation

Le tableau 33, présente les paramètres hydrotechniques des deux systèmes d'irrigation : pivot artisanal et goutte-à-goutte, mesurés dans le site expérimental.

Table 33 : Paramètres hydrotechniques des parcelles-pivot et parcelles goutte à goutte

| Paramètres | Pivot | Goutte à goutte |
|--|--------------|------------------------|
| Surface irriguée (ha) | 0,785 | 0,5 |
| Pression (Bar) | 1,1 | 1 |
| Débit m³/h | 16 | 39 |
| Débit émetteurs (l/h) | 880 | 0,785 |
| Intensité de la pluviométrie (mm/s) | 0,0153 | 0,0021 |
| Coefficient d'uniformité (%) | 41 | 84,50 |

Les résultats présentés dans le tableau 33 indiquent que la surface couverte par le pivot artisanal est supérieure à celle couverte par le goutte-à-goutte, les parcelles irriguées par le pivot artisanal ont une forme cylindrique où le rayon dépend de la longueur de la rampe du pivot. Cependant les parcelles goutte-à-goutte ont une forme rectangulaire ou carrée.

Les pressions enregistrées indiquent que les deux systèmes ont une basse pression selon la classification de Phocaidès (2008). Les débits mesurés à la tête du réseau indiquent un écart important entre les deux systèmes. Le goutte à goutte est alimenté par un débit de 39 m³/h qui permet d'irriguer la parcelle en couverture intégrale (installation fixe) avec un débit moyen des gouteurs de 0,785 l/h. En outre, le pivot qui est un système à rampe mobile, il est alimenté par un débit plus faible (16 m³/h). Le débit moyen des émetteurs d'eau dans le cas du pivot (buse) est très grand (880 l/h) par rapport au goutte-à-goutte, car celui-ci se compose uniquement de 18 buses tandis que la parcelle du goutte-à-goutte se compose de 50 000 gouteurs. La pluviométrie émise par l'irrigation par le pivot artisanal est 7 fois plus intense que celle émise par le goutte-à-goutte. Donc, le flux d'infiltration de l'eau dans les parcelles-pivot serait plus grand que dans les parcelles goutte-à-goutte, surtout que le sol sableux est très filtrant.

Le coefficient d'uniformité dans le cas du goutte-à-goutte est acceptable, alors que celui du pivot est très faible. L'écart de la dose d'irrigation entre le centre du pivot et son extrémité atteint 80 % à cause du double effet que le débit diminue le long de la rampe et les surfaces irriguées par chaque buse s'élargissent en s'éloignant du centre du pivot.

La différence des valeurs des paramètres hydrauliques entre les deux systèmes, notamment le flux d'infiltration et l'uniformité de l'irrigation pourrait avoir une influence sur la salinité du sol. Un flux d'infiltration plus grand engendre un lessivage des sels en profondeur, tandis qu'un flux d'infiltration faible peut-en résulter une accumulation des sels dans la zone racinaire. La non-uniformité de

l'irrigation peut avoir une influence sur l'uniformité de l'état salin du sol à cause du lessivage dans les zones aux doses d'irrigation supérieures et la remonté des sels dans les zones aux doses inférieures.

III.2.3.2. Calendrier d'irrigation

La figure 45 présente les doses d'irrigation décadaires appliquées par l'agriculteur dans le cas des deux techniques d'irrigation et les besoins d'irrigations réels de la culture de la pomme de terre pour une efficacité totale de 70%.

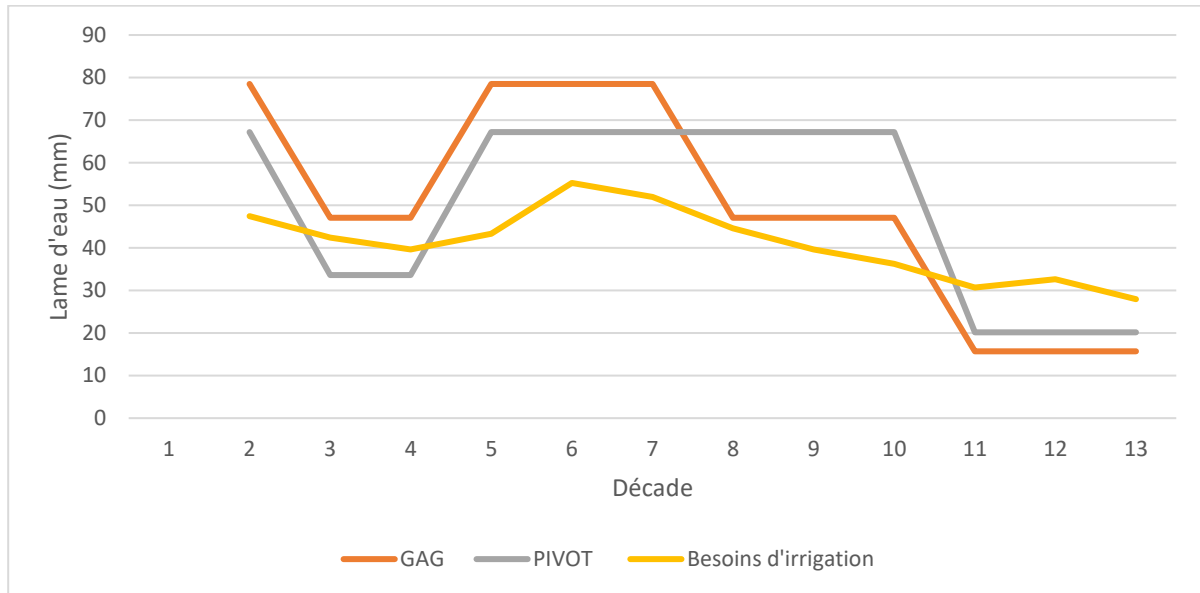


Figure 46 : Besoins d'irrigation de la pomme de terre et les doses appliquées dans le cas du pivot et du goutte-à-goutte

D'après la figure 45, on remarque que la forme générale de la courbe des doses d'irrigation du pivot et de la goutte à goutte sont assez similaires, cependant il existe une différence considérable entre les doses appliquées et les besoins d'irrigation. Les cumuls des irrigations présentés en Annexe 6 montre que la lame d'eau totale appliquée par le goutte-à-goutte est 596 mm alors que celle appliquée par le pivot est 598 mm, soit 0,3 % de différence. Les lames d'eau appliquées sont supérieures aux besoins d'irrigation de la culture, soit 106 mm d'écart dans le cas du pivot et 104 mm dans le cas de la goutte à goutte.

Le bilan hydrique du sol présenté en Annexe 7 montre que le bilan hydrique est pour les décades 1, 4-9 et négatif pour les décades 2-3, 10-12. A l'échelle de la saison, on estime une dose de lessivage de 21,3 % pour le pivot et 20,9 % pour la goutte à goutte. Cette dose est susceptible d'entraîner les sels en profondeur, surtout que les parcelles étudiées sont caractérisées par un sol sableux très perméable.

III.3. Evolution des paramètres physico-chimiques et chimiques du sol

III.3.1. Conductivité électrique

III.3.1.1. Evolution de la conductivité électrique du sol dans le temps

La figure 46 présente l'évolution de la conductivité électrique $CE_{1/5}$ (mS/cm) dans les parcelles irriguées et pour les témoins, en début de saison (C1) et avant la récolte

(C2). Les Pivot 1 et GAG 1 sont à leurs deuxième année de mise en culture tandis que Pivot 2 et GAG 2 sont à leurs troisième année.

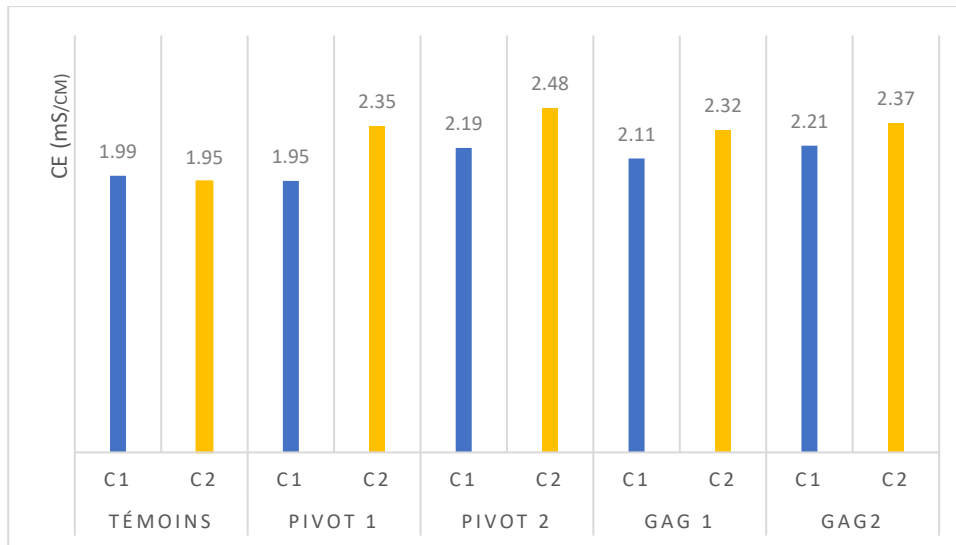


Figure 47 : Evolution de la CE dans les parcelles au début et à la fin de la saison

Selon la figure 46, la CE a diminué légèrement de 1,99 mS/cm à 1,95 mS/cm au niveau des points témoins, soit une diminution de 2%. Dans les parcelles pivot, la $CE_{1/5}$ a augmenté de 1,95 mS/cm à 2,35 mS/cm pour pivot 1 (augmentation de 17,4%) et de 2,29 mS/cm à 2,48 mS/cm pour le pivot 2 (augmentation de 10,2%). Ceci indique une augmentation de 27,2% de la salinité au niveau parcelles-pivot après 3 années successives de mise en culture. Dans les parcelles Goutte-à-goutte, la $CE_{1/5}$ a augmenté de 2,11 mS/cm à 2,32 mS/cm pour GAG 1 (augmentation de 10%) et de 2,21 mS/cm à 2,37 mS/cm pour le pivot 2 (augmentation de 7,2%). On calcule une augmentation de la salinité de 12,3 % dans les parcelles irriguées avec Goutte-à-goutte après 3 années successives de mise en culture.

Nous remarquons que le niveau de salinité au début de la saison est plus faible dans les parcelles pivots au début de la saison, puis celle-ci augmente d'une façon inégale entre les deux techniques d'irrigation, cependant elle a légèrement diminué dans les sols non-irrigués. L'augmentation de la salinité dans les parcelles pivot est nettement supérieure à celle des parcelles irriguées par la goutte à goutte. La similarité des facteurs pédoclimatiques des parcelles et hydro-chimiques de l'eau d'irrigation remet cette augmentation inégale de la CE à la distinction des propriétés hydrauliques des systèmes d'irrigation qui influent sur le régime d'infiltration d'eau dans le sol, ce qui influence la distribution des sels dans la couche arable du sol. Pour le sol non-irrigué (témoin), la légère diminution est expliquée par un lessivage naturel due aux pluies hivernales qui coïncident avec la saison de la pomme de terre (Tableau 19).

Le lessivage des sels au début de la saison est plus efficace dans le cas du pivot artisanal, Ceci est justifié par la différence de salinité au début de la saison. La forte intensité de l'irrigation sous pivot (7 fois plus forte que le goutte à goutte) entraîne

les sels lixiviés en profondeur. Cette action est favorisée par la forte perméabilité du sol sableux. Cependant, le régime discontinue de l'irrigation sous pivot est plus susceptible à la remontée des sels, d'où la possibilité d'une remontée des sels vers l'horizon de surface.

III.3.1.2. Evolution de la conductivité dans la zone racinaire

Afin de comprendre l'effet de la technique d'irrigation sur l'évolution de la salinité du sol, et de confirmer l'hypothèse précédente nous présentons les profils salins des parcelles étudiées dans les figures 47, 48 et 49, pour les témoins, les parcelles-pivots et pour les parcelles goutte à goutte. La compréhension de la distribution des sels selon le profil du sol est utile pour caractériser l'impact local de la salinité sur les racines.

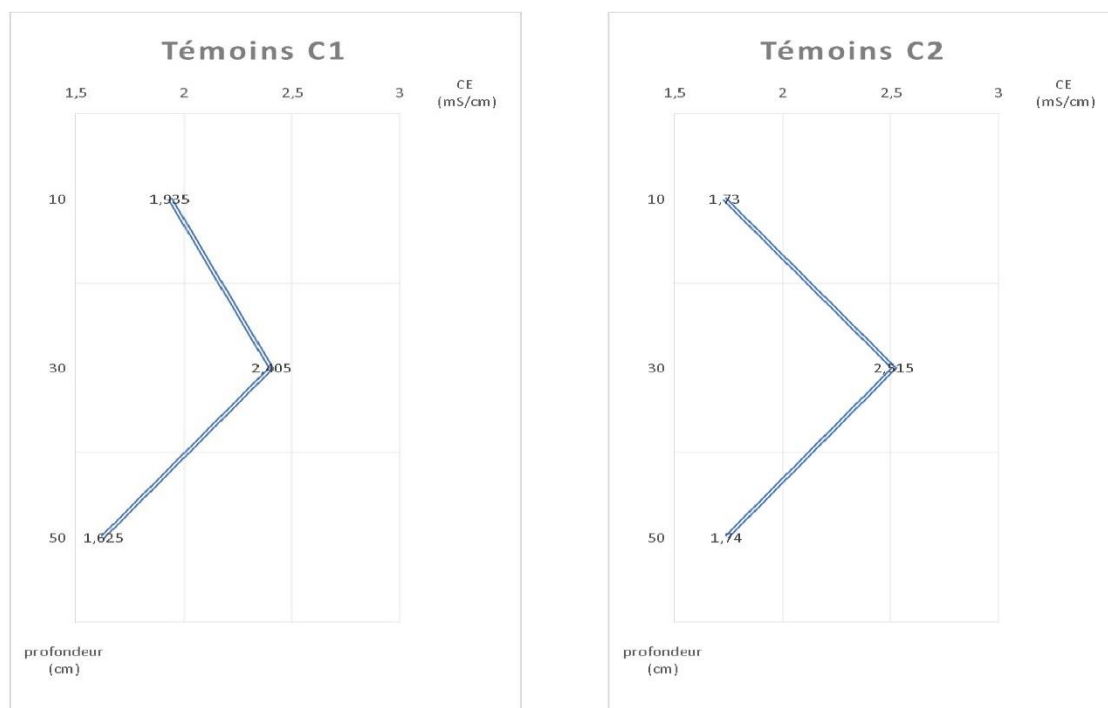


Figure 48 : Les profils salins des témoins pour les campagnes C1) et C2

D'après la figure 47, on remarque que le profil salin des témoins aux périodes C1 et C2 ont la même allure. La CE augmente de la profondeur 10 cm et atteint son maximum à la profondeur 30 cm, puis elle diminue pour atteindre son minimum à la profondeur 50 cm.

Les valeurs de la CE enregistrées, indiquent une diminution de la salinité de 10% entre C1 et C2 à la profondeur 10 cm, et une augmentation de celle-ci de 4,6% et 7% aux profondeurs 30cm et 50cm.

Les valeurs discutées mettent en évidence un lessivage naturel des sels, provoqué par les pluies hivernales (rares et intenses) qui ont entraîné les sels de l'horizon de surface (10 cm) vers horizons les plus profonds (30 cm et 50 cm) avec une élimination de 2% de sels en dehors de la zone d'échantillonnage.

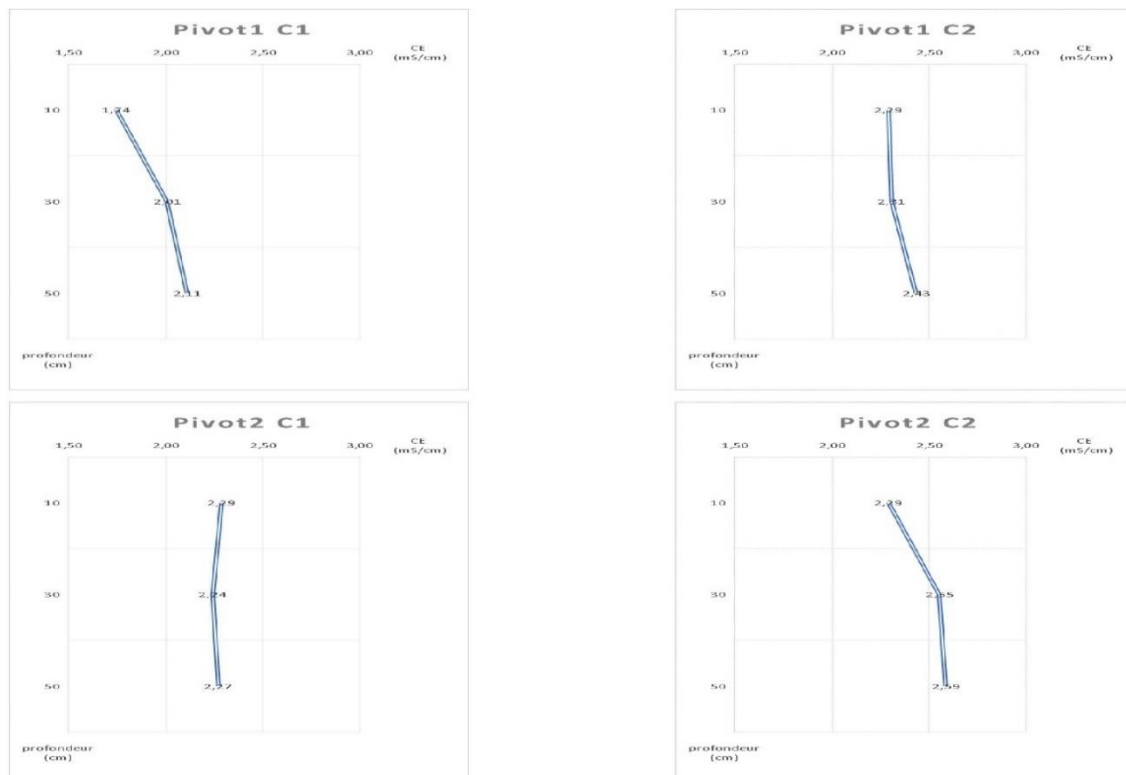


Figure 49 : Les profils salins des parcelles-pivots pour les campagnes C1 et C2

Pour la campagne C1 (début de la saison), on remarque que la CE augmente en fonction de la profondeur pour le pivot 1 avec un écart plus important entre les profondeurs 10 cm et 30 cm (0,27 mS/cm) et plus faible entre les profondeurs 30 cm et 50 cm (0,10 mS/cm). Cependant celles-ci sont relativement stables pour le pivot 2 pour la même période où l'écart de la CE entre deux profondeurs successives est inférieur à 5%.

A la fin de la saison (C2), le profil salin prend la forme d'une courbe ascendante. La pente de cette courbe est plus prononcée entre les profondeurs 30 cm et 50 cm dans le cas du pivot 1, entre les profondeurs 10 cm et 30 cm dans le cas du pivot 2.

D'après les résultats présentés dans la figure 48, le pivot artisanal provoque une accumulation des sels dans les profondeurs 30 cm et 50 cm.

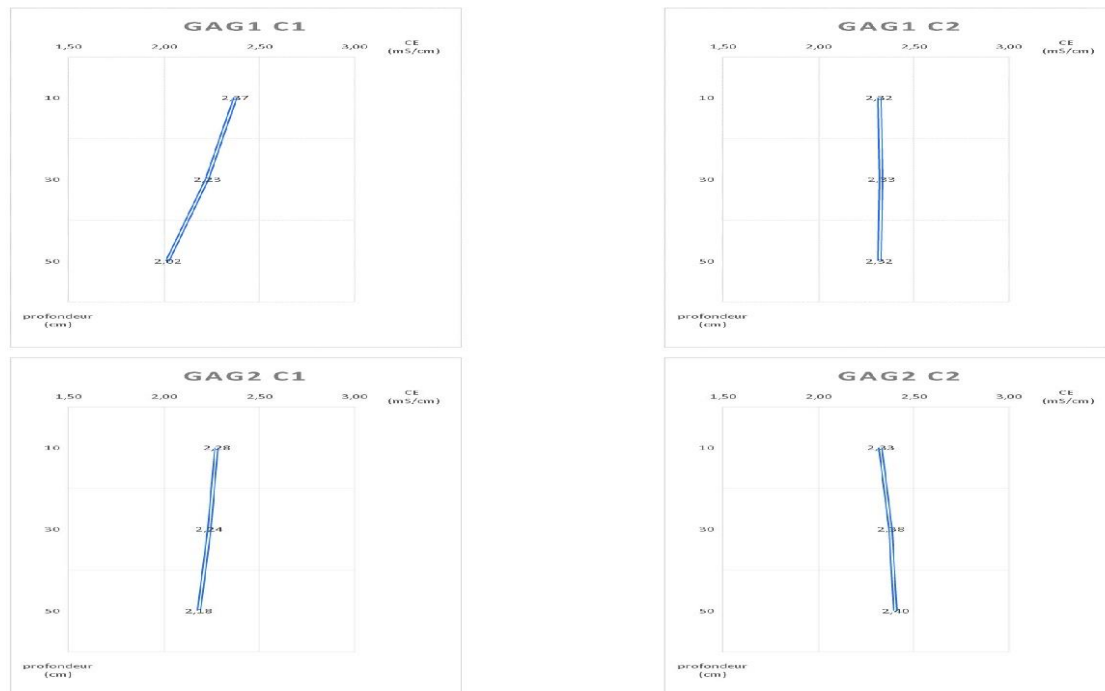


Figure 49 : Profils salins des parcelles goutte à goutte pour les campagnes C1 et C2

Au début de la saison, le profil salin suit une droite descendante dans les deux parcelles (GAG 1 et GAG 2), avec une pente plus accentuée dans le cas du GAG 1. Soit une diminution de 15% et de 5% pour les parcelles GAG 1 et GAG 2 entre les profondeurs 10 et 50 cm.

A la fin de la saison, les valeurs de la salinité augmentent mais le profil salin devient relativement homogène selon la profondeur, on calcule des écarts inférieurs à 5 % entre les profondeurs 10 cm et 50 cm dans les deux parcelles.

D'après les figures précédentes (Figure 47, Figure 48 et Figure 49) on constate que la distribution spatiale de la salinité dans la zone racinaire diffère d'une technique d'irrigation à une autre. Le pivot artisanal provoque un profil salin ascendant selon la profondeur, les plus fortes salinités se retrouvent dans la zone racinaire (30-50 cm). Cependant la technique d'irrigation par goutte-à-goutte provoque un profil salin homogène avec une salinité dans la zone racinaire inférieure à celles des parcelles-pivot.

Ces résultats confirment l'hypothèse précédente qui met en relation l'intensité du flux d'infiltration et la distribution spatiale des sels dans le sol, ils s'accordent aussi avec les constats de Saleh et al. (2013). Le jet d'eau émis par le pivot (0,91 mm/min) est 7 fois plus grand que celui de la technique du goutte-à-goutte (0,126 mm/min). En prenant en considération ce sol sableux très filtrant (ruissellement nul), la vitesse d'infiltration de l'eau dans les parcelles-pivot serait 7 fois plus grande que dans les parcelles irriguées par goutte à goutte.

III.3.2. Le chlore

Le chlore est l'ion dominant dans les eaux d'irrigation et la solution du sol, il est souvent considéré comme un indicateur du mouvement d'eau dans le sol agricole, grâce à sa forte solubilité, sa faible assimilation par les plantes et sa faible concentration dans les fertilisants (Saso et al, 2012). Dans notre cas, la concentration du chlore dans les engrais est nulle. De plus que le chlore est l'élément le plus susceptible de provoquer une toxicité pour les plantes, d'après l'analyse chimique de la solution du sol.

La figure 50 présente les concentrations en Cl^- dans les parcelles étudiées, durant les campagnes C1 et C2.

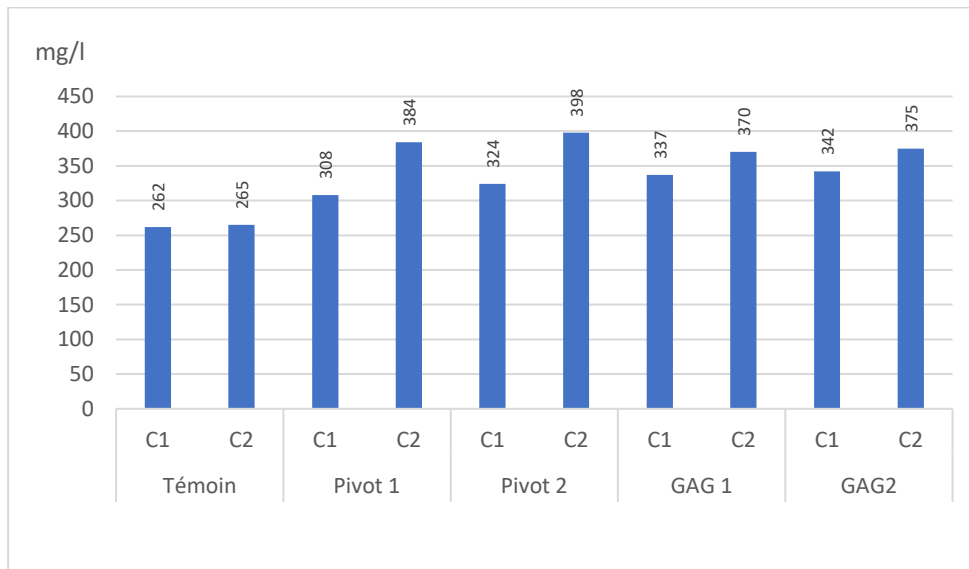


Figure 50 : Concentration en chlore dans les sols des parcelles étudiées pour les campagnes C1 et C2

D'après la figure 50, la concentration du chlore est relativement stable dans le sol non irrigué (témoin), soit une augmentation négligeable (1%). Cependant celle-ci augmente considérablement dans les parcelles irriguées.

Au début de la saison (campagne C1), les concentrations du chlore sont plus faibles dans les parcelles pivot, puis elles augmentent d'une façon inégale entre les parcelles. Cette augmentation est plus intense dans les parcelles irriguées par pivot artisanal, soit 24,7% pour le pivot 1 et 22,8% pour le pivot 2. Alors que dans les parcelles irriguées par goutte à goutte, l'augmentation est de 9,8% pour GAG1 et 9,6%. A la fin de la saison (C2), on obtient des concentrations du chlore (Cl^-) plus importantes dans les parcelles irriguées par goutte à goutte.

Après trois années successives de mise en culture, la concentration en chlore dans la solution du sol a atteint 398 mg/l dans les sols irrigués par pivot artisanal et à 375 mg dans les sols irrigués par goutte-à-goutte, alors que dans le sol non-irrigué elle est de 265 mg/l.

Selon les résultats présentés dans la figure 50, les parcelles pivots serait plus affectées par la toxicité chlorique. De plus que l'impact directe du chlore sur les

feuilles sous ce système d'irrigation. La différence des concentrations du Cl^- entre les parcelles irriguées par les deux systèmes d'irrigation est probablement due à la différence des propriétés hydrotechniques des deux systèmes d'irrigation. Afin de confirmer l'hypothèse précédente nous présentons dans la figure 51 les concentrations du Cl^- pour les profondeurs 10 cm, 30 cm et 50 cm.

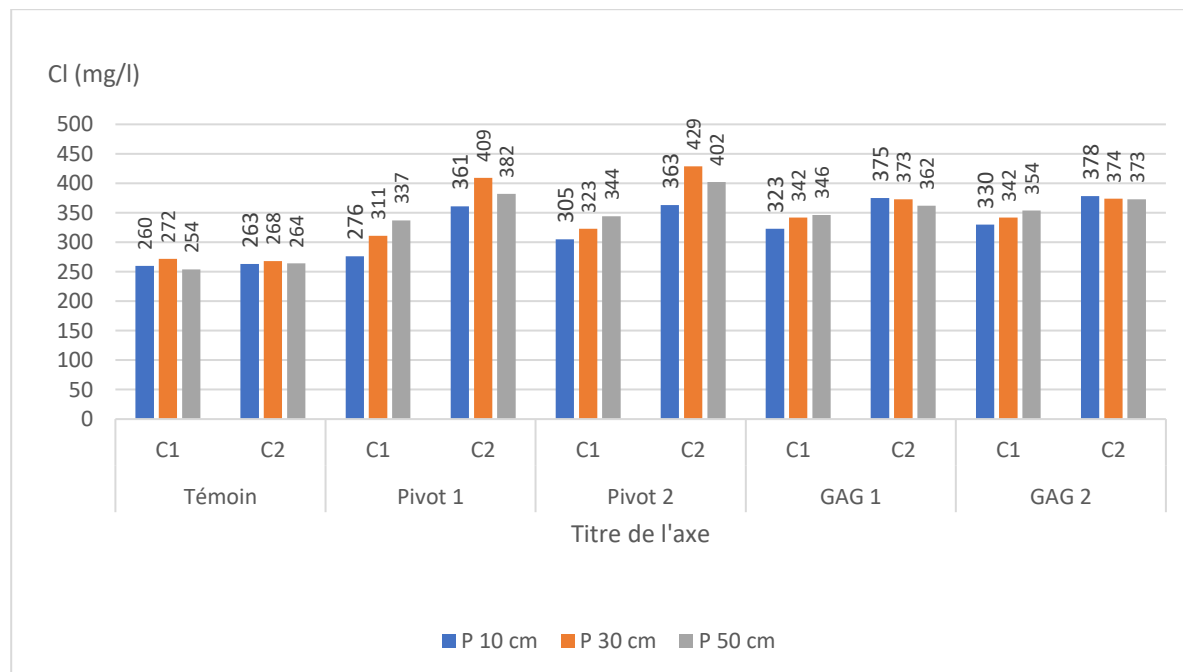


Figure 51 : Concentrations en Chlore selon les profondeurs 10 cm , 30 cm , 50 cm

Les résultats présentes dans la figure 51 montrent que le chlore est relativement stable selon la profondeur pour les deux campagnes.

Au début de la saison (campagne C1), la concentration en chlore augmente selon la profondeur pour toutes les parcelles avec un gradient plus important selon la profondeur dans les parcelles pivots. Les faibles concentrations en chlore dans l'horizon de surface et le gradient des valeurs selon la profondeur, pour la campagne C1, sont expliquées par le lessivage appliqué avant la plantation dans les parcelles pivots. Cette opération a permis de transporter le chlore vers la profondeur et de réduire la concentration moyenne du chlore dans la couche arable du sol.

A la fin de la saison (campagne C2), les concentrations en chlore augmentent considérablement dans toutes les parcelles, avec une augmentation plus prononcée dans les parcelles pivot. Dans celles-ci le Cl^- atteint son maximum à P=30 cm, soit 409 mg/l pour le pivot 1 et 429 mg/l pour le pivot 2. Les concentrations maximales en chlore sont localisés dans la zone racinaire qui est un organe susceptible à la toxicité chlorique. Dans les parcelles GAG, les concentrations en chlore sont faiblement descendantes selon la profondeur, suite à la circulation de l'eau à faible débit.

D'après la figure 51, le système goutte à goutte caractérisé par un régime d'écoulement continue et à faible intensité permet de répartir les ions du chlore équitablement selon la profondeur. Alors que le système pivot caractérisé par un

régime discontinu et à forte intensité provoque une condensation des ions du chlore dans la profondeur P= 30cm. Ce qui influe directement sur les racines, les stolons et les tubercules de la pomme de terre.

III.4. Conclusion

Dans le contexte climatique aride, les propriétés hydrotechniques du système d'irrigation jouent un rôle primordial dans l'évolution des propriétés chimiques du sol dans l'espace et dans le temps. La distribution des sels en l'absence des précipitations est étroitement liée aux mouvements de l'eau contrôlés par le système d'irrigation.

Dans le site expérimental, la conductivité électrique du sol a atteint 2,48 mS/cm dans les parcelles pivot et 2,37 mS/cm dans les parcelles GAG après trois années de mise en culture. Ceci indique respectivement, des augmentations de 24,6% et 19% de la salinité par rapport au sol non irrigué. Donc, la salinisation du sol est plus prononcée dans le cas de l'irrigation par pivot. Les profils de la CE et Cl⁻ montrent que le pivot artisanal provoque une accumulation des ions entre les profondeurs 30-50 cm alors que le goutte à goutte permet de répartir les sels d'une façon homogène selon la profondeur. Cette différence est expliquée par l'intensité de l'irrigation qui est 7 fois plus grande dans le cas du pivot, ce qui entraîne les sels en profondeur à proximité de la zone racinaire. Dans le cas du GAG, le flux d'eau faible et continue répartit les ions équitablement sur les trois profondeurs.

La salinisation du sol est donc plus accélérée dans le cas du pivot artisanal et son effet sur la culture de la pomme de terre serait plus intense dans le cas de la même technique d'irrigation, à cause de l'accumulation des ions toxiques dans la zone racinaire. Notre hypothèse justifie les résultats de l'enquête où les rendements de la culture de la pomme de terre sont supérieurs dans le cas de l'irrigation avec la technique du goutte à goutte.

IV. Conclusion générale

L'agriculture intensive basée sur les techniques d'irrigation sous pression a fait apparaître plusieurs problèmes écologiques dans la vallée du Souf parmi lesquels on compte la salinisation des sols. Ce phénomène qui affecte souvent les zones arides dans le monde entier et qui est considéré comme la cause principale de la dégradation des sols agricoles.

Les problèmes liés à la salinité, dans la vallée du Souf, ont apparus depuis l'émergence de l'agriculture intensive. Ce mode agricole est basé sur le pompage des eaux souterraines par les systèmes d'irrigation sous pression : le pivot artisanal et le goutte-à-goutte. Ce phénomène prend de plus en plus de l'ampleur avec l'extension des surfaces agricoles et l'inauguration des nouveaux périmètres au Nord de la vallée. Depuis, la salinité ne cesse d'engendrer un impact écologique et économique sur l'agriculture dans la région : des réductions des rendements des cultures annuelles, l'entartrage des conduites des systèmes d'irrigation et une dégradation chimique des sols agricoles.

Les résultats de notre enquête ont révélé que cette salinité est secondaire, provoquée principalement par la faible qualité de l'eau d'irrigation (eau salée), qui provient quasiment de la nappe phréatique. D'autres facteurs naturels et techniques qui ont favorisé l'évolution de ce phénomène dans le temps et dans l'espace :

- Facteurs naturels : L'aridité du climat et la rareté des précipitations, les formations gypseuses du milieu géologique (dans le nord de la vallée), la topographie endoréique du milieu avec la présence des chotts hyper-salés au nord de la vallée ;
- Facteurs techniques : Le matériel d'irrigation rudimentaire, la négligence de la qualité de l'eau d'irrigation et la gestion primaire de l'irrigation.

L'accumulation des sels dans les sols affecte à un premier ordre la croissance et le rendement des cultures, et à un niveau critique les sols se dégradent, deviennent improductifs et sont abandonnés par les exploitants. En cas de mode de faire valoir par location, les exploitants migrent entre les exploitations. D'autre parts les exploitants propriétaires ont développé quelques techniques innovantes de remédiation par renouvellement la couche supérieure du sol (travail profond du sol ou sillonnage) ou par jachère partielle des exploitations.

L'analyse hydrochimique de l'eau de la nappe phréatique qui est la source principale de l'eau d'irrigation a montré que celle-ci présente une forte salinité et des concentrations excessives en ions toxiques (Cl^- et Na^+). La salinité augmente du Sud vers le Nord inversement au gradient d'altitude. Le chimisme de la nappe phréatique du Souf est influencé par les formations géologiques (carbonaté avec la présence de certaines formations sulfatées au nord de la vallée), l'eau de surface hyper-saline et par le phénomène de l'évaporation.

Les analyses hydrochimiques de 36 échantillons ont affiché une forte salinité des eaux de la nappe phréatique, la CE varie entre 2656 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 10178 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et

augmente du Sud vers le Nord. La composition chimique de ces eaux est influencée par l'évaporation, ainsi que par une probable contamination par les eaux de surface hypersalées au nord de la vallée (Chotts). Les échantillons analysés présentent une alcalinité faible à moyenne et qui ne présentent pas un grand danger sur les sols sableux de la vallée. Cependant la CE excessive indique des forts risques de salinisation des sols. Surtout que la région est soumise à un climat évaporant qui favorise le dépôt des sels dans les couches superficielles du sol.

De plus que la CE excessive, les échantillons analysés présente des concentrations en Cl^- supérieures aux normes et produisent un grand risque de toxicité chlorique, surtout dans le cas de l'aspersion qui provoque un contact eau-feuilles. Les résultats de l'analyse de l'eau d'irrigation appuient les arguments de notre enquête qui qualifient l'eau d'irrigation comme facteur principal de la salinisation des sols.

L'étude de l'évolution des paramètres chimiques du sol dans le site expérimental, a montré une augmentation de la conductivité électrique qui a atteint 2,48 mS/cm dans les parcelles pivot et 2,37 mS/cm dans les parcelles GAG après trois années de mise en culture. Soient des augmentations de 24,6% et 19% respectivement par rapport au sol non-irrigué. Les profils de la CE et Cl^- montrent une accumulation des sels dans les profondeurs 30-50 cm dans le cas du pivot artisanal alors que le goutte à goutte permet de répartir les sels d'une façon homogène selon la profondeur. Cela est expliqué par la différence l'intensité de l'irrigation qui est 7 fois plus grande dans le cas du pivot, ce qui entraîne les sels en profondeur à proximité de la zone racinaire, alors que le flux d'eau faible et continue dans le cas du GAG répartit les ions équitablement sur les trois profondeurs.

Le système pivot accélère l'accumulation des sels en provoquant une augmentation plus importante de la CE et du Cl^- et accentue l'effet de la salinité sur la culture de la pomme de terre, avec un double effet du chlore sur les parties aériennes de la culture (contact eau-feuilles) et en accumulant le Cl^- dans la zone racinaire de cette culture.

Cette étude a démontré que l'agriculture intensive basée sur l'irrigation sous pression dans le milieu aride est une lame à deux tranchants, elle garantit une production satisfaisante pour les premières années mais elle engendre des risques économiques et écologiques colossaux et parfois irréversibles. La vallée du Souf est donc menacée par un autre problème autrement que la remontée des eaux, les autorités concernées doivent intervenir avant que la situation soit critique, en vue de l'importance de la vallée pour la production nationale. Afin d'éviter le même sort que les régions voisines : la vallée d'Oued Righ, l'Oasis de Tozeur et la région de Biskra (Askri et al., 2011 ; Boudibi et al., 2021).

En guise de recommandations, les propositions ci-dessous pourraient améliorer la durabilité de l'agriculture dans la vallée du Souf, par rapport au problèmes engendrés par la salinité de l'eau d'irrigation :

- Réaliser l'état des lieux de la salinisation des sols à grande échelle, estimer les surfaces affectées et étudier les plans possibles à moyen terme ;

- Sensibilisation des agriculteurs sur l'impact de la salinité sur les sols et sur les cultures, et l'encouragement des agriculteurs à l'utilisation de la technique du goutte-à-goutte pour l'irrigation de la pomme de terre ;
- Formation des techniciens et agriculteurs qualifiés à la gestion de l'irrigation dans les conditions d'une eau salée et climat aride ;
- Exiger l'analyse de l'eau d'irrigation et un suivi de l'état chimique des sols pour les agriculteurs ;
- Modernisation des systèmes d'irrigation pour répondre aux normes mondiales et aux mesures de sécurité ;
- Développer un calendrier d'irrigation approprié aux conditions de la région.

Références

- Abdenmour M.A., Douaoui A., Bennacer A., Manuel P.F., Bradai A., 2019. Detection soil salinity as a consequence of land cover changes at El Ghrous (Algeria) irrigated area using satellite images. *Agrobiologia*, 9, p.p. 1458–1470.
- Abdenmour M.A., Douaoui A., Barrena J., Pulido M., Bradai A., Bennacer A., Alfonso-Torreno A., 2020. Geochemical characterization of the salinity of irrigated soils in arid regions (Biskra, SE Algeria). *Acta Geochimica*, p.p. 1-17. <https://doi.org/10.1007/s11631-020-00426-2>
- Abrol I. P., Yadav J.S.P., Massoud F.I., 1988. Salt-affected soils and their management. Food & Agriculture Organization.
- Ahammed G. J., Li X., Liu A., Chen S., 2020. Brassinosteroids in plant tolerance to abiotic stress. *Journal of Plant Growth Regulation*, 39(1), p.p.1-14. <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10098-0>
- Ali Z. I., Gharbi A., Zairi M., 2020. Evaluation of groundwater quality in intensive irrigated zone of Northeastern Tunisia. *Groundwater for Sustainable Development*, p.11. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100482>
- Amiri V., Bhattacharya P., Nakhaei M., 2021. The hydrogeochemical evaluation of groundwater resources and their suitability for agricultural and industrial uses in an arid area of Iran. *Groundwater for Sustainable Development*, p. 12. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100527>
- Askri B., Bouhlila R., Job J.O., 2011. A conceptual hydrologic model for studies of salinisation in Tunisian Oasis. *International Journal of Water Resources in Arid Environment*. 6, p.p. 428-439.
- Ayers R.A., Westcot D.W., 1985. Water quality for Agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper. Food and Agriculture Organization, Rome, Paper 29, p. 174.
- Bataillon C., 1960. Ressources et vie de relation du Sahara : l'exemple du Souf.
- Belksier M.S., 2017. Caractéristiques hydrogéologiques de la nappe superficielle dans la région de l'Oued Righ et évaluation de l'impact de la pollution et de la salinité sur la qualité de ses eaux. These Doc., Université Badji Mokhtar, Annaba, p.102.
- Benes S.E., Aragues R., Grattan S.R., Austin R.B., 1996. Foliar and root absorption of Na⁺ and Cl⁻ in maize and barley: Implications for salt tolerance screening and the use of saline sprinkler irrigation. *Plant Soil*, 180(1), p.p. 75–86. <https://doi.org/10.1007/BF00015413>
- Berkal I., Djili K., 2006. Contribution à la connaissance des sols du Sahara d'Algérie. De la base de données à la valorisation des paramètres pédologiques. *Mém. Mag. INA El Harrach*, p. 221.
- Bernstein L., 1975. Effects of salinity and sodicity on plant growth. Agricultural Research Service. U.S. Department of Agriculture, Annual review of phytopathology, 13 (1), p.p. 295-312.
- Bioud I., 2017. Analyse diagnostique de l'irrigation de la pomme de terre dans la vallée du Souf. Mem. Ing., Ecole Nationale Supérieure Agronomique, Harrach, Alger, p. 101.
- BNEDER (Bureau National des Etudes pour le Développement Rural), 2014. Etude de faisabilité technico-économique de la mise en valeur des terres par concession. Algiers, Algeria, p. 91.
- Bouaziz A., Ali H., Marcel K., 2018. Les oasis en Afrique du Nord : dynamiques territoriales et durabilité des systèmes de production agricole. *Cahiers Agricultures*, 27(1).
- Boudibi S., Sakaa B., Benguega Z., Fadlaoui H., Othman T., Bouzidi N., 2021. Spatial prediction and modeling of soil salinity using simple cokriging, artificial neural networks, and support vector machines in El Outaya plain, Biskra, southeastern Algeria. *Acta Geochimica*, 40, p.p. 390-401. [doi:10.1007/s11631-020-00444-0](https://doi.org/10.1007/s11631-020-00444-0).
- Boumadda A., Dadamoussa M. L., Belaroussi M. E. H., Ighili H. I., 2021. Des Systèmes Ingénieurs Menaces De Disparition : Cas Du Système Ghout. *Revue des bio ressources*, 11(1), p.p. 74-84.
- Bouselsal B., Belksier M.S., Salah, B. M., 2018. Gestion du phénomène de la remontée des eaux dans la région d'El Oued (SE Algérie) et la possibilité d'utilisée les eaux usées épurées en irrigation. *International Journal of Environment and Water*, 7 (2), p.p. 82-91.
- Bouselsal B., Kherici N., 2014. Effets de la remontée des eaux de la nappe phréatique sur l'homme et l'environnement : cas de la région d'El-Oued (SE Algérie). *Afrique Science*, 10 (3), p.p. 161-170.
- Bouznad I., 2009. Ressources en eau et Essai de la gestion intégrée dans la vallée Sud d'Oued Righ (W. Ouargla). *Mémoire Mag., Université Badji Mokhtar, Annaba*, p. 128.

- Bradai A., Douaoui A., 2013. Evolution géochimique de la solution des sols irrigués par les eaux à alcalinité résiduelle positive en conditions contrôlées. Application au Bas-Chélif. *Nat Technol*, 8, p.p.27–32.
- Bunani S., Yörükoğlu E., Sert G., Yüksel Ü., Yüksel M., Kabay N., 2013. Application of nanofiltration for reuse of municipal wastewater and quality analysis of product water. *Désaliénation*, 315(1), p.p. 33-36. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.11.015>
- Cemagref, 1990. Irrigation. Co-édition CEMAGREF-DICOVA. Paris. Guide pratique. ISBN 2-85 362-194-4
- Cheriet F, Benzouche S.E., 2012. Structure et contraintes de la filière dattes en Algérie. *New Medit: Mediterranean Journal of Economics, Agriculture and Environment. Revue Méditerranéenne d'Economie Agriculture et Environment*, 11(4), 49 p.
- Christiansen J.E., 1942. Irrigation by sprinkling. *California Agric. Exp. Sta. Bulletin*, 670. University of California, Berkley, Etats-unis.
- Côte M., 2006. Si le Souf m'était conté. *Constantine : média plus*. p.135.
- Coté M., (2005). *La ville et le désert : le Bas-Sahara algérien*. Karthala Éditions.
- Côte M., 2002. Des oasis aux zones de mise en valeur : l'étonnant renouveau de l'agriculture saharienne. *Méditerranée*, 99(3), p.p. 5-14.
- D.S.A., 2018. *Annuaire Statistique de la Wilaya d'El Oued*. Direction des Services Agricoles (El Oued).
- Dang Y. P., Dalal R. C., Routley R., Schwenke G. D., Daniells I., 2006. Subsoil constraints to grain production in the cropping soils of the northeastern region of Australia: an overview. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 46 (1), p.p. 19-35. <https://doi.org/10.1071/EA04079>
- Daoud Y., Halitim A., 1994. Irrigation et salinisation au Sahara Algérien. *Sécheresse*, 5(3), p.p. 151-160.
- Daoudi A., Colin J. P., Baroud, K., 2021. La politique de mise en valeur des terres arides en Algérie : une lecture en termes d'équité. *Cahiers Agricultures*, 30(4). <https://doi.org/10.1007/S10991-018-9218>
- Daoudi A., Lejars C., 2016. From oasis agriculture to Saharan agriculture in the Ziban region: Actors of dynamism and factors of uncertainty. *New Medit* , 15 (2), p.p. 45–53.
- Dare N.C., Toor G.S., 2018. Desalination of water: a review. *Current Pollution Reports*, 4(2), p.p. 104-111.
- De Pascale Maggio A., Fofliano V., Ambrosino P., Ritieni, A., 2001. Irrigation with saline water improves carotenoids content and antioxidant activity of tomato. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 76(4), p.p. 447-453. <https://doi.org/10.1080/14620316.2001.11511392>
- Desaldata, 2012. *Global Desalination Market GWIR* Retrieved October 30rd, from Desaldata: www.desaldata.com.
- Djili K., Daoud Y., Gaouar A., Beldjoudi Z., 2003. La salinisation secondaire des sols au Sahara. Conséquences sur la durabilité de l'agriculture dans les nouveaux périmètres de mise en valeur. *Science et changements planétaires / Sécheresse*, 14 (4), p.p. 241-246.
- Doneen L.D., 1964. *Notes on Water Quality in Agriculture*, Department of Water Science and Engineering, University of California, Water Science and Engineering, p. 400.
- Douaoui A., Hartani T., Lakehal M., 2006. La salinisation dans la plaine du Bas-Cheliff : acquis et perspectives Economies d'eau en Systèmes Irrigués au Maghreb. Deuxième atelier régional du projet Sirma (29-31 mai), Marrakech, Maroc, p. 9.
- Dubief J., 1965. Le climat du Sahara. In *Annales de géographie. Persée-Portail des revues scientifiques en SHS*, 74(403), p.p. 360-361.
- Dubost D., 1986. Nouvelles perspectives agricoles du Sahara algérien. *Revue des mondes musulmans et de la méditerranée*, 41(1), p.p. 339-356.
- Durand J.H., 1983. *Les sols Irrigables. Etude pédologique*. Presses Universitaire de France. Agence de Coopération Culturelle et Technique. p.338.
- Eaton A.D., Clesceri L.S., Greenberg A.E., 2005. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th ed., APHA, AWWA, WPCF, New York.
- Eaton, F.M., 1950. Significance of carbonates in irrigation waters. *Soil Sci.* 69(2), p.p. 123–134.
- Emberger L., 1955. Une classification biogéographique des climats. *Trav. Inst. Bot.*
- Eriksson P., Kyburz M., Pergande W., 2005. N.F. membrane characteristics and evaluation for sea water processing applications. *Desalination*, 184(1), p.p. 281-294. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.04.030>

- Evelin H., Kapoor R., Giri, B., 2009. Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Alleviation of Salt Stress: A Review. *Annals of Botany*, 104(7), p.p. 1263-1280. <https://doi.org/10.1093/aob/mcp251>
- FAO, 2011. Systèmes oasiens des Ghout d'Oued Souf, Algerie. Systèmes ingénieux du patrimoine agricole mondial.
- FAO-ITPS-GSP, 2015. Status of the world's soil resources. FAO-ITPS-GSP Main Report, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, p.p. 125–127.
- Fischer G., Nachtergaele F., Prieler S., Van Velthuizen H.T., Verelst L., Wiberg D., 2008. Global Agro-ecological Zones Assessment for Agriculture (GAEZ 2008). IIASA, Laxenburg, Austria and FAO, Rome, Italy
- Galvani A., 2007. The challenge of the food sufficiency through salt tolerant crops. *Rev. Env. Sci. Biotechnol.*, 6(1), p.p. 3-16. <https://doi.org/10.1007/s11157-006-0010-3>
- Gausson H., Bagnouls F., 1952. L'indice xérothermique. *Bulletin de l'association de géographes français*, 29(222), p.p. 10-16.
- Ghassemi F., Jakeman A.J., Nix H.A., 1995. Salinization of land and water resources: Human causes, extent, management and case studies. Australia, Canberra. Centre for Resource and Environmental Studies, p. 562.
- Gibbs J.R., 1970. Mechanisms Controlling World Water Chemistry. *Science*. 170(80), p.p.1088–1090.
- Greene R., Timms W., Rengasamy P., Arshad M., Cresswell R., 2016. Soil and Aquifer Salinization: Toward an Integrated Approach for Salinity Management of Groundwater. A.J. Jakeman et al. (eds.), *Integrated Groundwater Management*, p.p. 377-412. https://doi.org/10.1007/978-3-319-23576-9_15
- Grieve C. M., Grattan S. R., Maas E. V., 2012. Plant salt tolerance. *ASCE manual and reports on engineering practice*, 71(1), p.p. 405-459.
- Guendouz A., Moulla A.S., Remini B., Michelot J.L., 2006. Hydrochemical and isotopic behaviour of a Saharan phreatic aquifer suffering severe natural and anthropic constraints (case of Oued-Souf region, Algeria). *Hydrogeology Journal*, 14(6), p.p. 955-968. <https://doi.org/10.1007/s10040-005-0020-1>
- Helming R., 2014. Kinetic approach of modeling salt precipitation I porous-media. *Stuttgart Institut for water and environment modeling*, p. 49.
- Heng T., Liao R., Wang Z., Wu W., Li W., Zhang J., 2018. Effects of combined drip irrigation and sub-surface pipe drainage on water and salt transport of saline-alkali soil in Xinjiang, China. *J Arid Land*, 10(6), p.p. 932-945. <https://doi.org/10.1007/s40333-018-0061-7>
- I.N.S.I.D., 2008. Les Sols Salins en Algérie. Institut National Des Sols, De L'Irrigation Et Du Drainage, Alger, Algérie, p. 2.
- Iqbal J., Nazzal Y., Howari F., Xavier C., Yousef A., 2018. Hydrochemical processes determining the groundwater quality for irrigation use in an arid environment: the case of Liwa Aquifer, Abu Dhabi, United Arab Emirates. *Groundwater for Sustainable Development*, 7, p.p. 212-219. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2018.06.004>
- Ivushkin K., Bartholomeus H., Bregt A.K., Pulatov A., Kempen B., De Sousa L., 2019. Global mapping of soil salinity change. *Remote Sens. Environ*, 231, p. 12. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111260>.
- Khechana S., Derradji F. 2011. Hydrochemical characteristics of Groundwater in Oued-Souf Valley (South East of Algeria). *European Journal of Scientific Research* 62(2), p.p. 207-215.
- Khris A., 2020. À Fort Potentiel Agricole, L'Algérie En Quête De Sécurité Alimentaire. *Liberté Algérie*. <https://www.liberte-algerie.com/actualite/le-desert-agraire-343366>
- Koull K., Kherraze M., Lakhdari k., Benzaoui T., Helimi S., Laouissat M., Kherfi Y., Bougafla A., Mimouni F., Lakhdari K., 2013. Eaux d'irrigation et salinisation des sols des périmètres irrigues dans la vallée de l'oued righ. *Journal Algérien des Régions Arides*, 12(1), p.p. 97-102.
- Krishan G., Sejwal P., Bhagwat A., Prasad G., Yadav B.K., Kumar C.P., Muste M., 2021. Role of Ion Chemistry and Hydro-Geochemical Processes in Aquifer Salinization—A Case Study from a Semi-Arid Region of Haryana, India. *Water*, 13(5), p. 15. <https://doi.org/10.3390/w13050617>
- Kumar A., Abrol I.P., 1984. Studies on the reclaiming effect of Karnal-grass and para-grass grown in a highly sodic soil. *Indian J Agric Sci*, 54(1), p.p. 189–193.
- Kumar A., Mann A., Devi G., Sharma H., Singh R., Sanwal S. K., 2019. Phytoamelioration of the Salt-Affected Soils Through Halophytes. In *Ecophysiology, Abiotic Stress Responses and Utilization of Halophytes*. Springer, Singapore, p.p. 313-326. https://doi.org/10.1007/978-981-13-3762-8_15

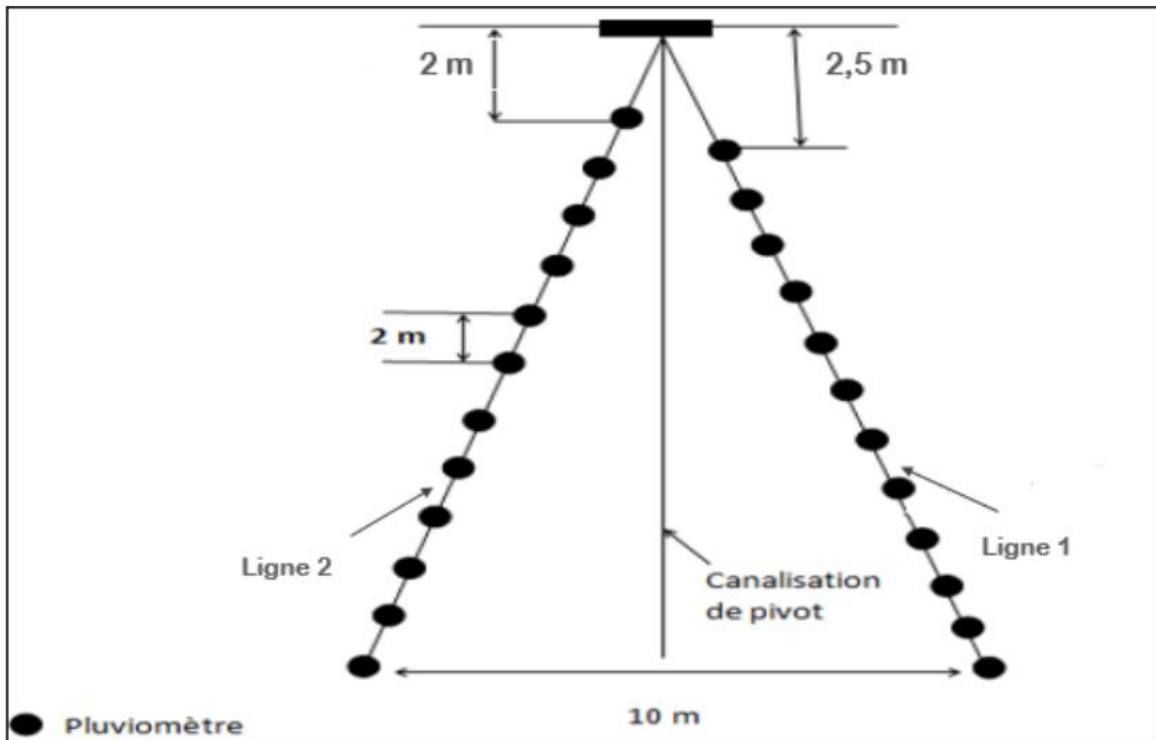
- Kumar P., Mahajan A.K., Kumar A., 2019. Groundwater geochemical faciès implications of rock-water interaction at the Chamba city (HP), northwest Himalaya, India. *Environmental Science and Pollution Research*, p.p. 1-15. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07078-7>
- Kumar R., Ahmed M., Bhadrachari G., Thomas J. P., 2018. Desalination for agriculture: water quality and plant chemistry, technologies and challenges. *Water Science and Technology: Water Supply*, 18(5), p.p. 1505-1517. <https://doi.org/10.2166/ws.2017.229>
- Lambers H., 2003. Introduction: Dryland Salinity: A Key Environmental Issue in Southern Australia. *Plant and Soil*, 257(1), p.p. 5-7. <https://doi.org/10.1023/B:PLSO.0000003909.80658.d8>
- Li P., Wu J., Qian H., Zhang Y., Yang N., Jing L., Yu P., 2016. Hydrogeochemical characterization of groundwater in and around a wastewater irrigated forest in the southeastern edge of the Tengger Desert, Northwest China. *Expo Health*, 8, p.p. 331–348. <https://doi.org/10.1007/s12403-016-0193-y>
- Li Y.J., Thenkabail P.S., Biradar C.M., Noojipady P., Dheeravath V., Velpuri M., Gangalakunta O.R., Cai X.L., 2009. A history of irrigated areas of the world. CRC Press-Taylor and Francis group, Boca Raton, London, New York, p.p. 13-40.
- Liu Y., Wu P., Zhu D., Zhang L., Chen J., 2015. Effect of water hardness on emitter clogging of drip irrigation. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 31(20), p.p. 95-100. <https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2015.20.014>
- Naeini M.R., Khoshgofarmanesh A.H., Fallahi E., 2006. Partitioning of Chlorine, Sodium, and Potassium and Shoot Growth of Three Pomegranate Cultivars Under Different Levels of Salinity, *Journal of Plant Nutrition*, 29, p.p.1835-1843.
- Maas E. V., Grattan S. R., 1999. Crop yields as affected by salinity. *Agricultural drainage*, 38(1), p.p. 55-108.
- Maas E. V., 1986. Salt tolerance of plants. *World Journal of Agricultural Sciences*, 1(1), p.p. 12–25.
- Maas E.V., 1990. Crop Salt Tolerance. *Agricultural Salinity Assessment and Management Manual*. K.K. Tanji (ed.). American Society Civil Engineers, New York, p.p. 262-334.
- Maas, E. V., 1993. Plant growth response to salt stress. In *Towards the rational use of high salinity tolerant plants*. Springer, Dordrecht, p.p. 279-291.
- Marandi A., Shand P., 2018. Groundwater chemistry and the Gibbs Diagram. *Applied Geochemistry*, 97, p.p. 209-212. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.07.009>
- Mateo-Sagasta J., Burke J., 2010. Agriculture and water quality interactions: a global overview. SOLAW Background Thematic Report-TR08, 46.
- Mediouni k., 1997. Organisation et potentialités de la diversité biologique algérienne, Min. Envi., Projet Alg./97/G31/ FEM/ PNUD, T. 2, p. 158.
- Melouah O., Zerrouki H., Steinmetz RLL, 2020. Characterization of processes and mechanisms controlling ground water salinization in the Algerian Sahara. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(18), p.p. 1-31. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05903-9>
- Messar E. M., 1996. Le secteur phoenicicole algérien : situation et perspectives à l’horizon 2010. *Options méditerranéennes*, 2, p.p. 210-221.
- Ministère des Ressources en Eau (MRE), 2017. Situation du PMH dans la Wilaya d’El Oued. Algiers, Algeria; p.34.
- Miyamoto S., 2006. Appraising salinity hazard to landscape plants and soils irrigated with moderately saline water. 102. http://opensiuc.lib.siu.edu/ucowrconfs_2006/102
- MRE (Ministère des Ressources en Eau), 2017. Situation du PMH dans la Wilaya d’El Oued. Algiers, Algeria, p.34.
- Munns R., Cramer G.R., Ball M.C., 1999. Interactions between rising CO₂, soil salinity and plant growth. In: Luo Y, Mooney HA (eds) *Carbon dioxide and environmental stress*. Academic, London, p.p.139-167.
- Munns R., Tester M, 2008. Mechanisms of salinity tolerance. *Annu.Rev.Plant Biol.*, 59(1), p.p. 651-681. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911>
- Naeini M. R., Khoshgofarmanesh A. H., Fallahi E., 2006. Partitioning of chlorine, sodium, and potassium and shoot growth of three pomegranate cultivars under different levels of salinity. *Journal of Plant Nutrition*, 29(10), p.p. 1835-1843. <https://doi.org/10.1080/01904160600899352>

- Nagaz K., Masmoudi M. M., Mechlia, N. B., 2012. Impacts of irrigation regimes with saline water on carrot productivity and soil salinity. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 11(1), p.p.19-27.
- Najah A., 1971. *Le Souf des oasis*. Maison du livre, Alger, 174 p.
- ONS (Office National des Statistiques), 2008. *Population résidente des ménages ordinaires et collectifs : Wilaya d'El Oued*. Bab Azzoun, Alger.
- Or D, Lehmann P, Shahraeeni E, Shokri N., 2013. Advances in soil evaporation physics—A review. *Vadose Zone Journal*, 12(4), p.p. 1-16. <https://doi.org/10.2136/vzj2012.0163>
- OSS (Observatoire du Sahara et du Sahel), 2003. *Système aquifère du Sahara septentrional : gestion commune d'un bassin transfrontière*. Rapport de synthèse. Observatoire du Sahara et du Sahel), Tunisie.
- Oster J.D., 1994. Irrigation with poor quality water. *Agricultural Water Management*, 25(1), p.p. 271–297.
- Ozcan H., Ekinçi H., Yigini Y., Yuksel O., 2006. Comparison of four soil salinity extraction methods. *Proceedings of 18th International Soil Meeting on "Soil Sustaining Life on Earth, Managing Soil and Technology"*, May 22–26, 2006, Sanliurfa, Turkey, p.p. 697–703.
- Paliwal K.V., 1986. Saline water irrigation through drips and sprinklers. *Annals of arid zone*. 25(1), p.p.18-30.
- Parida A.K., Das A.B., 2005. Salt tolerance and salinity effects on plants: A review, *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 60(3), p.p. 324-349. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2004.06.010>
- Parkhurst D.L., Appelo C.A.J., 2013. Description of input and examples for PHREEQC version 3: a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations, *US Geological Survey*, 6(43). <https://doi.org/10.3133/tm6A43>
- Pearson, G.A., 1960. Tolerance of crops to exchangeable sodium. *US Department of Agriculture. Bulletin* 216.
- Piper A.M., 1953. *A Graphic Procedure in the Geo-Chemical Interpretation of Water Analysis*. USGS Groundwater Note, p. 12.
- Pitman M.G., Läuchli A., 2002. Global impact of salinity and agricultural ecosystem in Salinity, *Environment Plants Molecules*. KluwerAcademic, Dordrecht, p.p. 3–20.
- Qadir M., Quillérou E., Nangia V., Murtaza G., Singh M., Thomas R.J., Drechsel P., Noble A.D., 2014. Economics of salt-induced land degradation and restoration, *Natural Resources Forum*, 38(4), p.p. 282–295. <https://doi.org/10.1111/1477-8947.12054>
- Qadir M., Oster J.D., 2002. Vegetative bioremediation of calcareous sodic soils: history, mechanisms, and evaluation. *Irrig Sci*, 21(1), p.p. 91–101. <https://doi.org/10.1007/s00271-001-0055-6>
- Qadir M., Quillérou E., Nangia V., Murtaza G., Singh M., Thomas R.J., Drechsel P., A.D. Noble, 2014. Economics of salt-induced land degradation and restoration, *Natural Resources Forum*, 38(4), p.p. 282–295. <https://doi.org/10.1111/1477-8947.12054>
- Raghunath H.M., 1987. *Geochemical survey and water quality*. Groundwater Wiley eastern limited, New Delhi, p.p. 343-347.
- Rata M., 2015. Etude de variabilité spatio-temporelle de la salinité des sols du Bas Chélif Par le Système d'Information Géographique (SIG), *International Conference of Application of Geospaciales techniques in Geosciences (21-22 octobre)*, niversite Sidi Mohamed Ben Abdellah, Faculte Polydisciplinaire de Taza Laboratoire Ressources Naturelles et Environnement, Taza, Maroc.
- Remini B., Souaci B.E., 2019. Le Souf : Quand Le Forage Et Le Pivote Menace Le Ghout. *Larhyss Journal*, 37, p.p. 23-38.
- Remini B., 2019. La foggara et le Ghout (Algérie): quand le forage sonne le déclin. *Larhyss Journal*, 39, p.p. 275-297.
- Rengasamy P., 2006. World salinization with emphasis on Australia, *Journal of Experimental Botany*, 57(5), p.p. 1017–1023. <https://doi.org/10.1093/jxb/erj108>
- Rhoades J. D., 1974. Drainage for salinity control. *Drainage for agriculture*, 17(1), p.p. 433-461.
- Rhoades J.D., Kandiah A., Mashali A.M., 1992. *The use of saline waters for crop production*. FAO irrigation and drainage paper FAO, Rome, No. 48.
- Richards L.A., 1954. *Diagnosis and improvement of saline and alkali Soils*. Agriculture Handbook N.60. United States Salinity Laboratory Staff, p.p. 160.

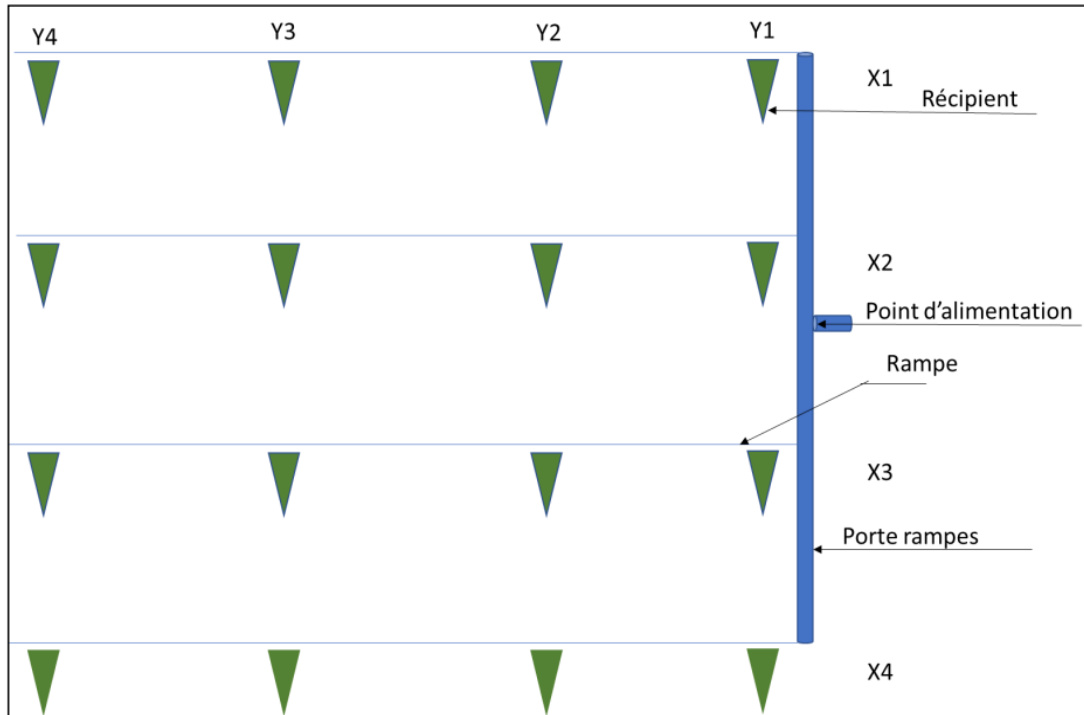
- Safdar H., Amin A., Shafiq Y., Ali A., Yasin R., Shouka A., Sarwar M.I., 2019. A review: Impact of salinity on plant growth. *Natural. Science*, 17, p.p. 34-40. <https://doi.org/10.7537/marsnsj170119.06>.
- Saleh I., Masoudi M., Saleh J., Khosravi K., 2013. The effect of water quality and irrigation methods on moisture and salinity distribution of soil. *International journal of Advanced Biological and Biomedical Research*, 1(7), p.p. 754-766.
- Sawyer G.N., McCarty D.L., 1967. *Chemistry of sanitary engineers*. 2nd edn. McGraw-Hill, New York, p. 518.
- Schoeller H., 1965. *Qualitative evaluation of groundwater resources. Methods and techniques of groundwater investigations and development*. UNESCO, 5483.
- Semar A., Hartani T., Bachir H., 2019. Soil and water salinity evaluation in new agriculture land under arid climate, the case of the Hassi Miloud area, Algeria. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 4(1), p.p. 1-14. <https://doi.org/10.1007/s41207-019-0130-0>
- Shahid S.A., Zaman M., Heng L., 2018. Soil Salinity: Historical perspectives and a world overview of the problem. In: *Guideline for Salinity Assessment, Mitigation and Adaptation Using Nuclear and Related Techniques*. Cham: Springer. p.p. 43-53. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96190-3_2
- Shahid S.A., Abdelfattah M.A., Taha F.K., 2013. *Developments in soil salinity assessment and reclamation, innovative thinking and Use of marginal soil and water resources in irrigated agriculture*, Springer, Heidelberg, p. 808. . <https://doi.org/10.1007/978-94-007-5684-7>
- Sheldon A.R., Dalal R.C., Kirchoff G., Kopittke P.M., Menzies N.W., 2017. The effect of salinity on plant-available water. *Plant and Soil*, 418(1), p.p. 477-491. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3309-7>
- Sheng, M., Tang, M., Chan, H., Yang, B., Zhang, F., Huang, Y., 2008. Influence of arbuscular mycorrhizae on photosynthesis and water status of maize plants under salt stress. *Mycorrhiza*, 18(7), p.p. 287–296. <https://doi.org/10.1007/s00572-008-0180-7>
- Siddiqui A., Naseem S., Jalil T., 2005. Groundwater quality assessment in and around Kalu Khuhar Super highway, Sindh. *Pakistan J. Applied Sciences*, 7(1), p.p. 1260-1265.
- Soleilhavoup F., 1977. *Les cailloux fissurés des regs sahariens: étude descriptive et typologique*. *Géologie Méditerranéenne*, 4(4), p.p. 335-363.
- Swaefy H.M., El-Ziat R.A., 2017. *Calendula Response to Salinity Stress*. *Middle East Journal of Agriculture Research*, 6(4), p.p. 1519-1525.
- Szabolcs I., Darab C., 1964. *The Influence of Irrigation Water of High Sodium Carbonate Content of Soils*, Paper Presented at the Proceedings of 8th International Congress of ISSS, Trans.
- Szabolcs I., 1989. *Salt-affected soils*, CRC Press, Boca Raton, p. 274.
- Szabolcs, I., 1994. Prospects of soil salinity for the 21st century. *Agrokémia és talajtan*, 43(1-2), p.p. 5-24.
- Tanninen J., Kamppinen L., Nyström M., 2005. Pretreatment and hybrid processes, in: A.I. Schäfer, A.G. Fane, T.D. Waite (Eds.), *Nanofiltration - Principles and Applications*, Elsevier, Oxford, p.p. 253-254.
- Tester M., Davenport R., 2003. Na⁺ tolerance and Na⁺ transport in higher Plants. *Annals of Botany*, 91(5), p.p. 503-527. <https://doi.org/10.1093/aob/mcg058>
- Tiercelin J.R., Vidal A., 2006. *Traité d'irrigation*, 2nd ed. Lavoisier.
- Todd D.K., 1980. *Groundwater Hydrology*, Wiley, New York, p. 535.
- UNEP, 1992. *Proceedings of the Ad-hoc expert group meeting to discuss global soil database and appraisals of GLASOD/SOTER*, 24–28 February, Nairobi, Kenya, p.39.
- Voisin A.R., 2004. *Le Souf : Monographie*. Ed. El Walid, 319 p.
- Wang W., Vinocur B., Altman A., 2003. Plant responses to drought, salinity, and extreme temperatures: Toward genetic engineering for stress tolerance. *Planta*, 218(1), p.p. 1–14. <https://doi.org/10.1007/s00425-003-1105-5>
- Wilcox L.V., 1955. *Classification and Use of Irrigation Waters*. United States US Department of Agriculture. Circular No. 969, p. 19.
- Wiley G.R., 1953. *Prehistoric settlement patterns in the Viru Valley, Peru*. Smithsonian Institute, Bureau of American Ethnology, Washington DC, 155, p. 454.
- Zaman M., Shahid S.A., Heng L., 2018. *Guideline for salinity assessment, mitigation and adaptation using nuclear and related techniques*. Springer Nature, p. 164. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-96190-3>

Ziza F.Z., Daoud Y., Laboudi A., Bradai R., Zouahra A., 2018. Evolution De La Salinité Dans Les Périmètres De Mise En Valeur Et Conséquences Sur La Diminution Des Rendements Du Blé Dans Une Région Saharienne : Cas De La Région D'Adrar. Algerian Journal of Arid Environment "AJAE". 2(2), p.12.

Annexes



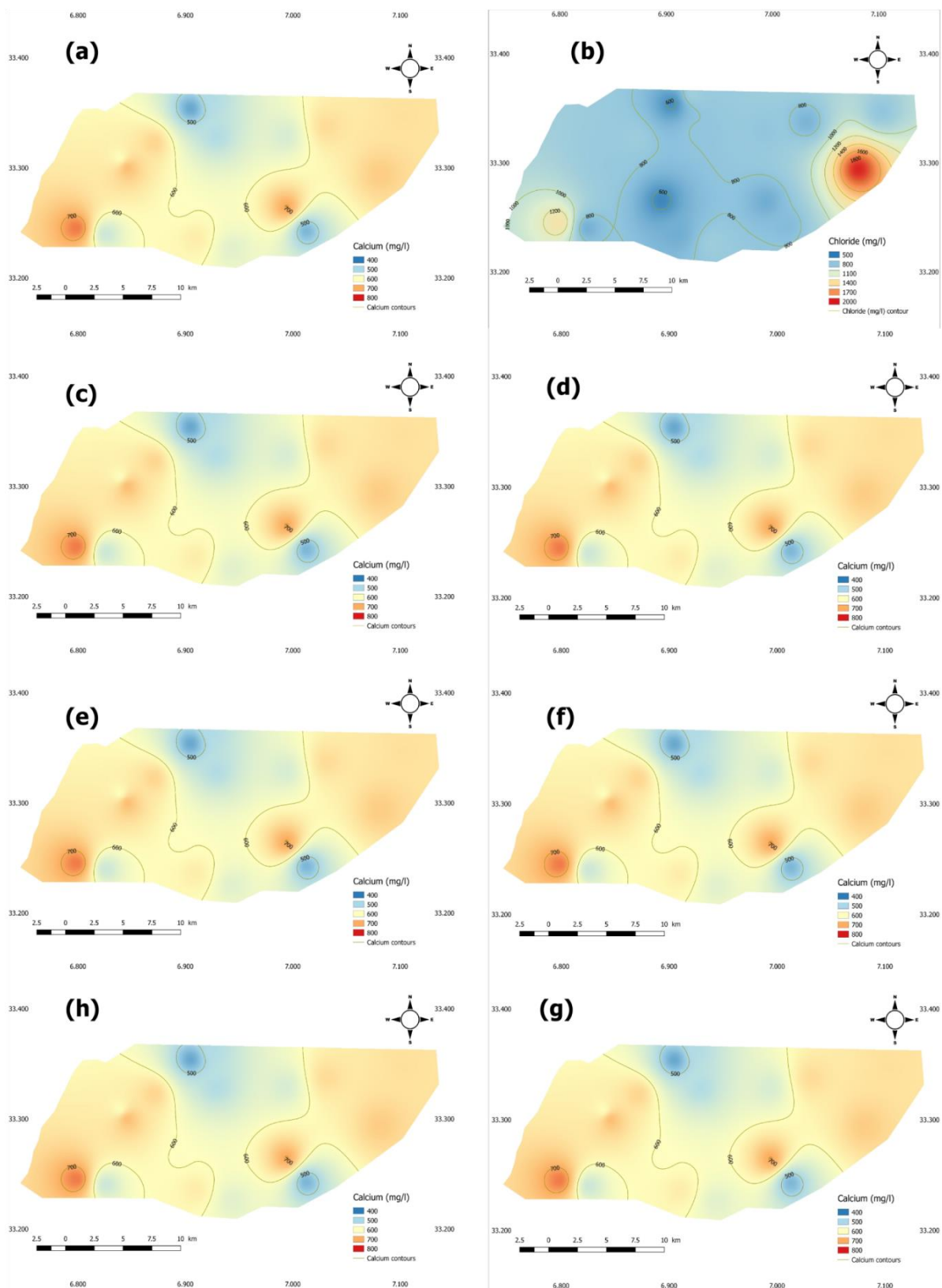
Annexe 1 : Disposition des pluviomètres dans la parcelle-pivot



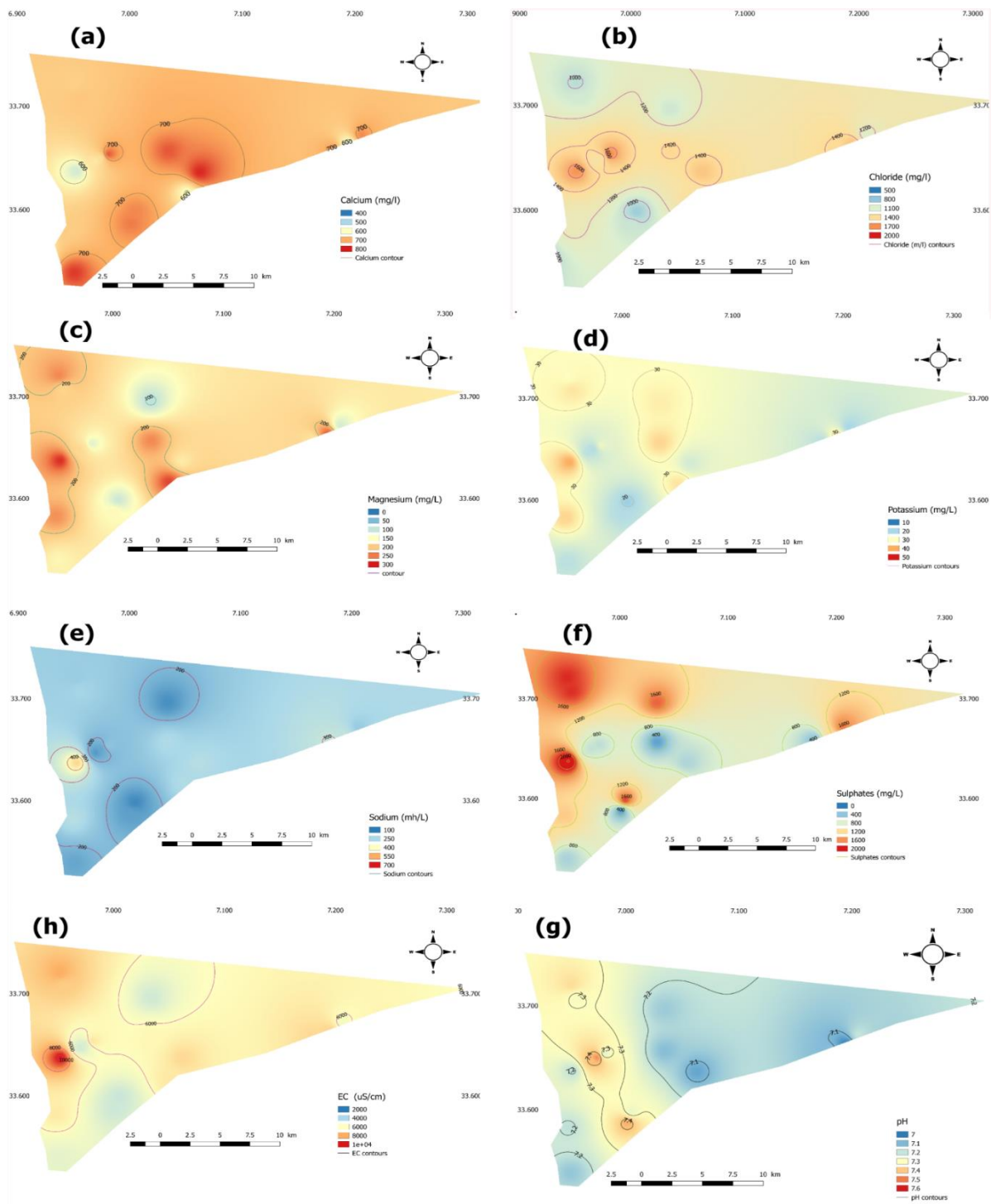
Annexe 2 : Disposition des pluviomètres dans la parcelle Goutte à Goutte

Annexe 3 : Fiche technique du GAG utilisé

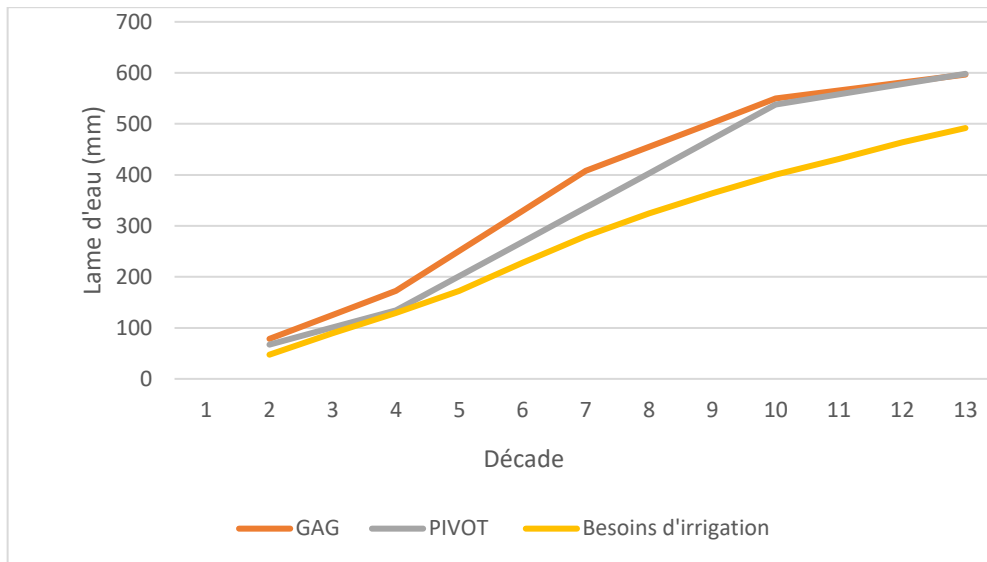
| | | | |
|--------------------------|---|--------------------------------|------------------------|
| Modèle | Pluvio 506-04-1, 38 | T-Tape | Ro-Drip |
| Fabricant | Advanced Plastic Technologies (Italy) | Rivulis | |
| Diamètre extérieur | 16 | 16 | 16 |
| Epaisseur | 8 ml | 8 ml | 10 ml |
| Pression de service | 0,8 : 1 bar | 0,5 bar | 0,5 bar |
| Débit des goutteurs | 2 l/s | 1 l/s | 1 l/s |
| Distance inter-goutteurs | 25 cm | 20 cm | 20 cm |
| Type de goutteurs | Goutteur encastré autorégulant (6 orifices) | Goutteur encastré autorégulant | Goutteur autonettoyant |
| Filtration conseillée | 130 mesh | Non-mentionnée | 120 mesh |



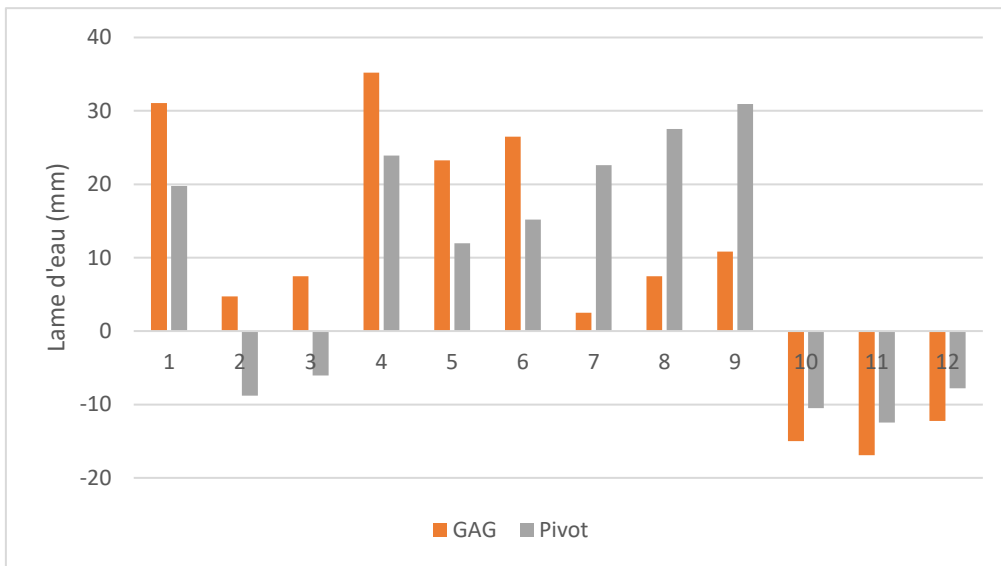
Annexe 4 : Cartes des ions majeurs dans la région 1



Annexe 5 : Cartes des ions majeurs dans la région 1



Annexe 6 : Les cumuls des irrigations (mm) dans les parcelles expérimentales



Annexe 7 : Bilan hydrique du sol dans les parcelles expérimentales