

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

المدرسة الوطنية العليا للفلاحة

**ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE  
(ENSA, Alger)**

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



**THÈSE / ENSA, Alger**

Pour obtenir le diplôme de :  
Doctorat en Sciences Agronomiques  
Spécialité : « Sciences du sol »  
Présentée par :

**Ismaïel BERKAL • 17 février 2016**

**Dynamique spatiotemporelle de la salinité de sols sableux irrigués en  
milieu aride.  
Application à une palmeraie de la cuvette de Ouargla en Algérie**

**Composition du jury :**

**Youcef DAOUD**

Professeur, Ecole Nationale Supérieure Agronomique, Alger / président

**Baelhadj HAMDJ AISSA**

Professeur, Université Kasdi Merbah, Ouargla / examinateur

**Rachid DJEMAI**

Professeur, Université Badji Mokhtar, Annaba / examinateur

**Kaddour DJILI**

Professeur, Ecole Nationale Supérieure Agronomique, Alger / directeur de thèse

**Christian WALTER**

Professeur, AGROCAMPUS OUEST, Rennes / co-directeur de thèse

## **Remerciements**

**A**u terme de ce travail, j'arrive aux pages les plus "personnelles". Je voudrais adresser une pensée à toutes les personnes qui, de quelque manière que ce soit, par un conseil, une idée, un soutien moral et/ou affectif voir une patience, un coup de main ou, tout simplement leur amitié, m'ont aidé à le réaliser.

*Je tiens tout d'abord à remercier les membres du jury de thèse, Messieurs Youcef DAOUD (ENSA, Alger), Rachid DJEMAI (Université Annaba) et Baelhadj HAMDI AISSA (Université Ouargla), qui m'ont fait l'honneur d'évaluer mon travail.*

*Ce travail n'aurait pu être réalisé sans le soutien de l'université Kasdi Merbah de Ouargla et son laboratoire de recherche sur la Phœniciculture. Il est aussi le fruit d'une bourse de coopération algéro-française (PROFAS ex. BAF) longue durée de 18 mois à Agrocampus Ouest Rennes, Unité Mixte de Recherche Sol Agro et hydrosystème Spatialisation (UMR SAS) 1069, France, qui m'a permis de réaliser ce travail de doctorat dans des conditions optimales. Chantal GASCUEL et Patrik DURAND respectivement ancienne et nouvelle direction de l'UMR, trouveront ici toute notre gratitude et remerciements pour leur accueil, et confiance. Ce qui fut pour moi une énorme source d'encouragements. Je suis très reconnaissant envers Monsieur Tarik Hartani du laboratoire Maitrise de l'Eau en Agriculture de l'ENSA, Alger pour avoir mis à notre disposition à chaque demande le matériel indispensable à ce travail qu'est le EM 38.*

*Je ne remercierai jamais assez mes encadrants de recherche, Messieurs Kaddour DJILI et Christian WALTER, de m'avoir formé, guidé et partagé leur expérience de chercheur durant cette thèse. De chacun j'ai beaucoup appris, et me sens grandi de tous vos enseignements. J'ai eu la chance d'avoir connus d'abord Monsieur DJILI en tant qu'enseignant au département de pédologie de l'INA devenue ENSA, Alger et avec qui j'ai agréablement déjà réalisé mes travaux d'ingénieur et de magister et sans qui ce travail n'aurait jamais eu lieu. Monsieur WALTER que j'appelle amicalement et aimablement "Christian", que j'ai connu et dont j'ai admiré les capacités Scientifiques et ses indéniables Qualités Humaines depuis notre première rencontre en 2009 lorsqu'il m'a accueilli au sein de son équipe, à l'occasion de mon premier stage à Agrocampus Ouest, UMR SAS, Rennes. Merci Christian...c'est un mot trop simple. Ce que je souhaiterais exprimer est au dessus de cela. Je suis à la fois touché et reconnaissant pour l'aide que tu m'as apporté Christian et je ne pourrai jamais te remercier assez. Avec toi tout semble plus facile !*

*Je remercie également Messieurs Didier MICHOT et Hongtao HAO (SAS, Rennes) pour leur participation à la rédaction des articles de cette thèse. Je suis très reconnaissant envers mon Ami et collègue Didier pour le temps qu'il a pris pour m'aider à réaliser mon projet. Je n'aurais pas avancé s'il n'avait pas été là par ses conseils, ses suggestions précieuses et encouragements. Merci pour tous les bons moments partagés, au travail et en dehors.*

*Une pensée particulière aux collègues Youssef Fouad, Anne Jaffrezic, Zahra Thomas, Pierre Arousseau et le doyen de la science du sol Claude Cheverry pour leurs conseils, encouragements et aides. C'est un grand privilège et un immense plaisir et également un Honneur pour moi de connaître le regretté Alain Ruellan qui fut le fondateur de la première cellule de science du sol à Rennes.*

*J'adresse aussi mes remerciements à tous ceux avec qui j'ai eu la chance de collaborer, et sans qui ces travaux n'auraient pu aboutir : Lionel Berthier pour son aide à me familiariser avec ArcGIS et Nouria AKKAL-KORFINI pour m'avoir facilité l'accès aux différentes formations de l'INRA France : statistique, Anglais et la recherche documentaire. J'aimerais particulièrement remercier Monique DELABUIS pour son aide lors de mes recherches bibliographiques et son aide sur le logiciel EndNote, Cédric DURAND pour son efficacité dans le domaine informatiques, et Séverine RENAUD pour son Grand Cœur et son dévouement aux questions administratives.*

*Je ne pourrais terminer sans remercier Gille DUTIN, Armelle RACAPÉ, et Yannik FAUVEL pour leurs amabilités et gentillesse. Je remercie également tous les autres membres (et ex-membres) du laboratoire science du sol et de l'équipe MO-Sol pour leur accueil et la bonne ambiance et que j'ai eu le plaisir de côtoyer.*

*Mes vifs remerciements vont aussi à Redouane Labadi et Ahmed Oularbi et le retraité Ammar le Chaoui de l'ENSA, Alger pour leurs aides et amitiés. Un grand merci également aux ingénieurs et masters de l'université de Ouargla qui ont travaillé sur le projet et sans qui rien n'aurait pu être mené à bien ; sans oublier la disponibilité et la gentillesse de "aami Tahar " de l'exploitation de l'université.*

*Je pense aussi amicalement aux thésards avec qui j'ai partagé de bon moments de détente et de discussions enrichissantes sur une multitude questions, je remercie Issoufou Adam, Cyril Benhamou et Rémi Dupas, Jérôme Dénès, Alice Aubert, Emmanuel Tété, et tout particulièrement Marine Lacoste qui nous a aidé dans le traitement des données à l'ACPA de l'université de Sydney en Australie.*

*Je tiens également à remercier mes Amis (es) et collègues de l'université de Ouargla, je commencerai bien évidemment par Haki Idder, Boualem Bouammar, Salah Zenkheri, Ouiza Djerroudi, Saliha Boudjenah, Sakina Khallef, Tahar Idder et d'autres Leila Aouragh (Batna) ; Kamal Sifer, El Hachimi Si Taieb (TiziOuzou) ; El Hadi Ould Ferroukh, Karim Ouameur Ali (Alger) ; Ali Sadoune (Khemis Méliana). Il faudrait tous vous citer pour être juste ! Ces remerciements ne seraient pas complets sans mentionner le soutien et les encouragements fournis tout au long de ces années par mes Amis (es) de toujours Rachid Haddid, Amirouche Ben Merrar (Canada) ; Nouredine Ben Khellat, Lallou Nait Ali sans oublier bien sur Lynda Nadia Haddad (France) et Naima Maaza (Blida). Un énorme MERCI, vous êtes tout simplement géniaux !*

*Je vous souhaite à tous une agréable lecture !*



## ***Dédicaces***

*Pour terminer, quelques mots à ma famille,*

*Je vous aime fort !! Je vous remercie tous pour votre soutien !*

*A mes parents, je suis fier d'être votre fils. Merci pour le soutien que vous m'avez apporté en plus de m'avoir supporté au sens propre pendant toutes ces années. Merci PAPA, Merci MAMAN.*

*Et puis merci à mes sœurs Samia ; Fadhila, Fetta et Taous et leurs adorables enfants Dalia et Dany ainsi que Alia et Lina et leurs maris Mokhtar, Kader et le bienvenu Djilali.*

*Merci enfin à mon adorable tante Houria et toute sa famille : l'émigrée Tafat ; Idir et son mari Aziz.*

*Je vous dédie ce travail*

## Résumé

L'oasis de Ouargla (sud-est algérien) située dans un système endoréique, se caractérise par un climat aride qui ne permet l'installation d'aucune culture sans le recours à l'irrigation. Elle procure de grands services écosystémiques et économiques même dans ce contexte environnemental difficile. Actuellement, elle se trouve menacée par les effets négatifs de la salinisation de ses sols et de la remontée des eaux salées de la nappe phréatique, dues principalement à une irrigation et à un assainissement mal gérés à l'échelle de l'oasis.

Ce projet vise en premier lieu une meilleure prévention des risques de salinisation par un suivi dynamique de la salinité des sols. L'objectif est de tester la capacité des enquêtes de conductivité électromagnétique (EM) à décrire les changements spatiotemporels de la salinité des sols à différentes profondeurs à l'échelle d'une palmeraie irriguée, caractérisée par des sols (Salic Solonchaks Aridic) très sableux.

Le second volet de ce travail porte sur une modélisation de l'évolution de la salinité à l'échelle de la palmeraie en tenant compte de l'état initial observé et de l'évolution au cours de la période d'étude, des conditions climatiques, des niveaux de la nappe et des apports d'eau par irrigation

2889 mesures EM 38 de conductivité électrique apparente (ECa) ont été obtenues pendant quatre dates entre mars 2009 et novembre 2010. A des fins d'étalonnage et de validation, la EC<sub>1.5</sub> de 30 points choisis au hasard à chaque date a été mesurée dans trois couches de sol.

Les résultats montrent que la combinaison de prospections géophysiques (EM), de mesures de calibration EC<sub>1.5</sub> et de méthodes de prédiction inférentielle par arbres de régression, permet de décrire les variations inter-parcellaires de la salinité et de sa dynamique saisonnière à différentes profondeurs. Ce suivi dynamique de la salinité dans les sols suppose néanmoins une connaissance assez fine des caractéristiques pédologiques nécessaires à la construction de modèles de prédiction précis. De façon générale, la précision de la prédiction décroît depuis le bas vers le haut du profil du sol et l'évolution de la salinité de surface apparaît de ce fait difficile à caractériser.

Les simulations d'une modélisation hydrologique "1-D" mettent en évidence l'effet salinisant d'une fluctuation haute de la nappe et des faibles doses d'irrigation sur la zone racinaire du dattier dans la cuvette de Ouargla. A l'opposé, des doses accrues maintiennent le niveau de la salinité au niveau le plus bas, mais doivent être impérativement échelonnées sur une semaine pour empêcher le dessèchement du sol dans ces milieux fortement évaporants. La

comparaison des scénarios croisant les doses d'irrigations avec des eaux de qualités différentes du Mio-Pliocène et du Sénonien suggère un impact de la salinité sur les rendements en datte même avec l'utilisation des doses d'irrigation accrues.

La modélisation de l'évolution verticale de la salinité de la zone racinaire du palmier combine l'effet de la nappe phréatique, de la qualité de l'eau et des doses d'irrigation. Son amélioration nécessitera une modélisation plus générique capable d'inclure les exigences de lixiviation et le rendement des cultures dans les simulations.

**Mots clés :** EM 38, cuvette de Ouargla, climat aride, oasis, salinité, nappe phréatique, sols sableux, irrigation, modélisation hydrologique.

## **Abstract**

The Saharan Ouargla oasis (Algeria) is an endorheic system characterized by an arid climate that allows the installation of any culture without the use of irrigation. It provides great ecosystem and economic services even with this difficult environmental context. Currently, she is threatened by the negative effects of salinization of soils and hauling salt water from the water table, mainly due to insufficient irrigation management in the oasis.

This project tested the ability of electromagnetic conductivity surveys (EM) to describe the spatial and temporal changes in soil salinity at various depths across an irrigated grove, characterized by soils (Salic Solonchaks Aridic) very sandy.

The second part of this work is a modelling of the evolution of salinity of palm grove, taking into account the original state and trends observed during the study period, climatic conditions, of groundwater levels, water irrigation and evapotranspiration.

2889 measures EM 38 apparent electrical conductivity (ECa) were obtained for four dates between March 2009 and November 2010. For purposes of calibration and validation, EC<sub>1:5</sub> from 30 points randomly selected each time was measured in three soil layers.

The results show that the combination of geophysical prospecting (EM) of calibration measurements EC<sub>1:5</sub> and inferential prediction methods by regression trees, allows describe the inter-compartmental variations in salinity and its seasonal dynamics at different depths . This dynamic monitoring of salinity in soils nevertheless presupposes a fairly detailed knowledge of soil characteristics required to build accurate predictive models. Generally, the prediction accuracy decreases from the bottom to the top of the soil profile and the evolution of surface salinity appears therefore difficult to characterize.

Simulations of a hydrological modelling "1D» show the salinizing effect of a high fluctuation of the water table and low doses of irrigation in the root zone of the date in the basin of Ouargla. In contrast, increased doses maintain the level of salinity in the lowest level, but must necessarily be spread over a week to prevent the soil from drying in these highly evaporative media. Comparing scenarios crossing irrigation doses with different water qualities Mio-Pliocene and Senonian suggests an impact of salinity on the yields of date even with the use of increased irrigation doses.

Modelling the vertical development of the salinity of the root zone of the palm combines the effect of the water table, the water quality and irrigation doses. His improvement will require a more generic modelling can include leaching requirements and crop yield in the simulations.

**Keywords:** EM 38, Ouargla depression, arid climate, oasis, salinity, water table, sandy soils, irrigation, hydrological modelling.

# الديناميكية المكانية و الزمنية لملوحة التربة الرملية المسقية في المناطق الجافة. تطبيق لواحة من حوض ورقلة في الجزائر

## ملخص

واحة النخيل لورقلة (جنوب شرق الجزائر) الواقعة في نظام مغلق الذي يتميز بمناخ جاف لا يسمح بوضع أي نبات بدون سقي.

تقدم هذه الواحة عدة خدمات كبيرة ايكولوجية و اقتصادية من الرغم من هذا المجال البيئي الصعب. حاليا نجدها مهددة بعواقب ملوحة أرضها و صعود المياه الجوفية السطحية المالحة؛ الناتجان أساسا من التسير الناقص و السيئ للسقي و صرف المياه في الواحة.

في هذا المشروع اختبرنا إمكانيات و قدرات الناقل الكهرومغناطيسية (EM) لوصف التغيرات المكانية و الزمنية لملوحة التربة على أعماق مختلفة لواحة مسقية و المتميزة بتربة رملية جدا.

الشرط الثاني لهذا البحث هو نموذج لتطور الملوحة في أنحاء الواحة باخذ بعين الاعتبار الحالة الحالية الملاحظة و التطورات خلال فترات الدراسة؛ الظروف المناخية؛ مستويات المياه الجوفية؛ مياه السقي و التبخر.

تم الحصول على 2889 قياس الناقل الكهروبايئية الظاهرية (ECa) خلال أربعة فترات زمنية بين مارس 2009 و نوفمبر 2010. لأغراض المعايرة و التحقق؛ قمنا بقياس ملوحة تربة (EC<sub>1:5</sub>) لثلاثين (30) نقطة تم اختيارها عشوائيا في ثلاثة طبقات التربة.

تشير النتائج إلى أن الجمع بين التقيب الجيوفيزيائي، تحاليل معايرة الملوحة وتقنية التنبؤ بأشجار الاستدلال يسمح بوصف التغيرات في الملوحة بين قطع الأرض وديناميتها الموسمية في أعماق مختلفة. هذه المتابعة الدينامكية للملوحة في التربة يشترط معرفة معمقة للمكونات الأساسية الدقيقة للتربة التي يتم بها تكوين وبناء نماذج تنبؤ دقيقة. بصفة عامة، تتناقص دقة التنبؤ من أسفل إلى أعلى مقطع التربة.

تنبؤات النمذجة الهيدرولوجية تظهر اثر التذبذب العالي للمياه الجوفية والكميات الدنيا لمياه السقي في ملوحة تربة المنطقة الجذرية للنخيل في مستنقع ورقلة. بالمقابل، الكميات العليا تحافظ على ادنى مستوى

للملوحة في هذه الأماكن ذات التبخر العالي. مقارنة سيناريوهات تقاطع اشتراك كميات ونوعية مياه السقي تبين اثر الملوحة على مردود التمور حتى باستعمال الكميات العالية لمياه السقي.

نمذجة التطور العمودي لملوحة المنطقة الجذرية للنخيل تشمل اثر المياه الجوفية، نوعية وكميات مياه السقي إلى حد سواء. تطور هذا النموذج يتطلب نمذجة أكثر شموله التي ستشمل كل من متطلبات صرف المياه ومحاصيل النخيل في التنبؤات.

الكلمات الأساسية: EM 38 ، حوض ورقلة ، مناخ جاف ، واحة؛ ملوحة ، مياه جوفية سطحية ، السقي ، النمذجة الهيدرولوجية.

## LISTE DES ABBREVIATIONS

- ABHS : Agence du Bassin Hydrographique du Sahara
- ACPA : Australian Center for Precision Agriculture
- ANRH: Agence Nationale des Ressources Hydrauliques
- BG : Bonnard & Gardel Holding SA, Lausanne (Suisse)
- Chott : un chott (de l'arabe chatt, « rivage ») est une étendue d'eau salée temporaire
- Cubist: Software package (<http://www.rulequest.com/download.html>)
- DPAT : Direction de la planification et de l'aménagement du territoire, Ouargla
- DSA: Direction des Services Agricoles
- EC : conductivité électrique
- EC<sub>1:5</sub>: conductivité électrique de l'extrait aqueux sol/eau : 1/5
- EC<sub>a</sub> : Conductivité Electrique apparent
- EC<sub>e</sub> : conductivité électrique de l'extrait de pate saturée
- ESAP: Software package (<http://www.ars.usda.gov/News/docs.htm?docid=8918>)
- GPS : Global Positioning System



- *Ksar* : Le mot *ksar* est emprunté à l'arabe *qasr* ("château", "village fortifié"), qui vient lui-même du latin *castrum* ("fort " ou " place forte ").
- ln : logarithme népérien
- Mode HCP : Horizontal Coils Position
- Mode VCP : Vertical Coils Position
- O.N.A : Office National d'Assainissement
- O.S.S : Observatoire du Sahara et du Sahel
- ONM : Office National de Météorologie
- qx/ha : quintaux/hectare
- RGPH: Recensement Général de la Population et de l'Habitat
- SAR : Sodium Adsorption Radio
- SASS : Système Aquifère du Sahara Septentrional
- USDA : United States Department of Agriculture
- WGS 84: World Geodetic System 1984



## TABLE DES MATIERES

<b>Introduction générale .....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre 1 - Etat de l'art - application des méthodes géophysiques à l'étude des sols</b>	
1.1. Introduction.....	6
1.2. Définition .....	6
1.3. Historique de l'utilisation des méthodes géophysiques pour caractériser la salinité des sols.....	6
1.4. Principales méthodes appliquées en agriculture .....	8
1.4.1. La résistivité électrique .....	8
1.4.1.1. Principe de mesure de la résistivité électrique .....	9
1.4.1.2. Le dispositif Wenner .....	9
1.4.1.3. Le dispositif Wenner-Schlumberger .....	12
1.4.1.4. Le dispositif Dipôle-Dipôle.....	12
1.4.1.5. Le dispositif Pôle-Pôle .....	12
1.4.2. Méthode à induction électromagnétique EM .....	13
1.4.2.1. Principe de mesure de la conductivité électromagnétique .....	13
1.4.2.2. Utilisation de techniques d'induction électromagnétique en science du sol ...	14
1.5. Paramètres des sols influençant la propriété électrique .....	16
1.6. Prédiction de la conductivité électrique (EC) du sol .....	17
1.7. Précision des prédictions.....	18
1.8. Conclusion partielle .....	19

## Chapitre 2 - Présentation de la zone d'étude

<u>2.1. Introduction</u> .....	20
<u>2.2. Situation géographique et cadre physique</u> .....	20
<u>2.3. Le milieu physique</u> .....	22
<u>2.3.1. La géologie</u> .....	22
<u>2.3.2. La topographie</u> .....	23
<u>2.3.3. Pédologie de la région</u> .....	24
<u>2.3.4. L'hydrographie</u> .....	25
<u>2.4. Le Climat</u> .....	25
<u>2.4.1. Précipitations</u> .....	25
<u>2.4.2. Température</u> .....	25
<u>2.4.3. Evaporation</u> .....	26
<u>2.4.4. Insolation</u> .....	26
<u>2.4.5. Vents</u> .....	27
<u>2.4.6. Synthèse climatique</u> .....	27
<u>2.5. Conclusion partielle</u> .....	29
<u>2.6. Hydrogéologie de la région</u> .....	29
<u>2.6.1. La nappe phréatique superficielle</u> .....	31
<u>2.6.2. Les nappes du Complexe Terminal</u> .....	33
<u>2.6.3. Le Continental Intercalaire</u> .....	33
<u>2.7. Agriculture et élevage</u> .....	33
<u>2.8. Exploitation des ressources hydriques</u> .....	37
<u>2.9. Estimation du bilan d'eau</u> .....	40
<u>2.10. Conclusion partielle</u> 40	



## Chapitre 3 - Protocole expérimental et méthodes d'étude des sols

3.1.	Introduction.....	41
3.2.	Le site expérimental.....	41
3.2.1.	Historique de l'exploitation.....	41
3.2.2.	La zone d'étude.....	45
3.3.	Méthode d'étude et de suivi de la salinité.....	47
3.3.1.	Caractérisation de l'état initial de la salinité de la palmeraie.....	48
3.3.1.1.	Analyse géophysique exhaustive de la zone d'étude.....	48
3.3.1.2.	Calibration des mesures de résistivité.....	49
3.3.2.	Suivi de la dynamique saisonnière de la salinité et de ses déterminants.....	49
3.4.	Analyse des données.....	50
3.4.1.	Correction de température.....	50
3.4.2.	Les statistiques descriptives.....	50
3.4.3.	Les analyses graphiques.....	51
3.4.4.	L'approche statistique de prédiction.....	51
3.4.5.	L'approche déterministe de prédiction.....	51
3.5.	Création d'une base de données géoréférencées.....	52
3.6.	Caractérisation pédologique de la zone d'étude.....	55
3.6.1.	Analyses au laboratoire.....	56
3.6.1.1.	Analyses physiques.....	56
3.6.1.2.	Analyses chimiques.....	56
3.6.2.	Caractérisation des eaux des forages et de la nappe phréatique.....	58
3.6.3.	Typologie des sels.....	58
3.6.3.1.	Hypothèse de la formation des sels.....	58

## Chapitre 4 - Caractérisation des eaux et des sols de la zone d'étude

4.1.	Introduction.....	59
4.2.	Caractéristiques du sol et des eaux de l'exploitation.....	59
4.2.1.	Description morphologique et analyse du sol.....	59
4.2.1.1.	Caractérisation du sol des parcelles non cultivées.....	59
4.2.1.1.1.	Caractérisation morphologique et analytique du profil E2 .....	60
4.2.1.1.1.1.	Répartition des ions dans le profil E2.....	62
4.2.1.1.2.	Caractérisation morphologique et analytique du profil F .....	63
4.2.1.1.2.1.	Répartition des ions dans le profil F.....	65
4.2.1.2.	Caractérisation du sol des parcelles cultivées.....	66
4.2.1.2.1.	Caractérisation morphologique et analytique du profil A2 .....	66
4.2.1.2.1.1.	Répartition des ions dans le profil A2.....	68
4.2.1.2.2.	Caractérisation morphologique et analytique du profil C2 .....	69
4.2.1.2.2.1.	Répartition des ions dans le profil C2.....	71
4.2.1.2.3.	Caractérisation morphologique et analytique du profil B1 .....	72
4.2.1.2.3.1.	Répartition des ions dans le profil B1.....	74
4.2.1.2.4.	Caractérisation morphologique et analytique du profil D1 .....	75
4.2.1.2.4.1.	Répartition des ions dans le profil D1.....	77
4.2.1.2.5.	Caractérisation morphologique et analytique du profil D2-1.....	78
4.2.1.2.5.1.	Répartition des ions dans le profil D2-1 .....	80
4.2.1.2.6.	Caractérisation morphologique et analytique du profil B2-1 .....	81
4.2.1.2.6.1.	Répartition des ions dans le profil B2-1.....	83
4.2.1.2.7.	Caractérisation morphologique et analytique du profil B2-2 .....	84
4.2.1.2.7.1.	Répartition des ions dans le profil B2-2.....	86



4.2.2.	<u>Caractéristiques des eaux d’irrigation</u> .....	87
4.2.3.	<u>Caractéristiques de l’eau de la nappe phréatique</u> .....	88
4.3.	<u>Conclusion partielle</u> .....	88

**Chapitre 5 - Quantification des variations spatiales et temporelles de la salinité des sols par suivi électromagnétique**

Abstract .....	90
5.1. Introduction.....	91
5.2. Materials and methods .....	93
5.2.1. Study site.....	93
5.2.2. Soil characteristics .....	94
5.2.3. Geophysical survey and soil sampling.....	95
5.2.4. Groundwater monitoring.....	96
5.2.5. Salinity prediction.....	96
5.2.6. Statistical testing and mapping .....	97
5.3. Results.....	98
5.3.1. Groundwater monitoring.....	98
5.3.2. Initial spatial variability of ECa measurements .....	99
5.3.3. Seasonal variations in ECa measurements over the entire survey grid .....	100
5.3.4. Seasonal changes in EC1:5 and ECa at collocated sampling points.....	101
5.3.5. Prediction models of soil salinity.....	102
5.3.6. Prediction accuracy.....	104
5.3.7. Spatial and seasonal soil salinity trends.....	104



<u>5.4.</u>	<u>Discussion</u> .....	106
5.4.1.	<u>Temporal fluctuations of soil salinity</u> .....	106
5.4.2.	<u>Model performance of MLR and regression tree models</u> .....	107
5.4.3.	<u>Salinity monitoring strategy related to prediction accuracy</u> .....	108
<u>5.5.</u>	<u>Conclusion</u> .....	109

**Chapitre 6 - Utilisation de la modélisation hydrologique pour définir des scénarios de remédiation de la salinité des sols**

6.1.	Introduction.....	111
6.2.	Materiels et methodes .....	114
6.2.1.	Zone d'étude .....	114
6.2.2.	Qualité des sols et des eaux d'irrigation .....	116
6.2.2.1.	Le suivi piézométrique de la nappe phréatique.....	117
6.2.3.	Les paramètres du model HYDRUS.....	117
6.2.3.1.	Les scénarios climatiques et des apports par irrigation .....	117
6.2.3.2.	Les flux d'eau et la qualité de l'eau d'irrigation.....	118
6.2.3.3.	Informations sur le profil racinaire .....	119
6.2.3.4.	Résultats de la modélisation.....	119
6.3.	Résultats.....	119
6.3.1.	Les fluctuations du niveau de la nappe .....	119
6.3.2.	Les simulations HYDRUS 1-D dans la parcelle A2 .....	120
6.3.2.1.	Nappe fixe à 2 m.....	120
6.3.2.2.	Nappe fluctuante haute .....	121

6.3.3. <u>Les simulations HYDRUS 1-D dans la parcelle B2-1</u> .....	124
6.3.3.1. <u>Nappe fixe à 2 m</u> .....	124
6.3.3.2. <u>Nappe fluctuante basse</u> .....	124
6.4. <u>Discussion</u> .....	127
6.4.1. <u>Comparaison entre simulations et les mesures des EC<sub>1:5</sub></u> .....	127
6.4.2. <u>Comparaison des différents scénarios de simulations</u> .....	127
6.4.3. <u>Identification des pratiques d'irrigation optimales</u> .....	130
6.4.4. <u>Fréquence des irrigations</u> .....	131
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>133</b>
<b>Annexes</b> .....	<b>158</b>

**Dynamique spatio-temporelle de la salinité de sols sableux irrigués en milieu aride**

**Application à une palmeraie de la cuvette de Ouargla en Algérie**

## **INTRODUCTION GENERALE**

*"Je suis toujours prêt à apprendre, bien que je n'aime pas toujours qu'on me donne des leçons"*

Winston Churchill

## **Introduction générale**

La désertification, touche environ 70 % de l'ensemble des zones arides, soit 3600 milliards d'hectares, c'est-à-dire 1/4 de la surface terrestre. Elle est due à divers facteurs, parmi lesquels les variations climatiques et les activités humaines, entraînant une sévère dégradation des terres (UNESCO, 2002).

Les régions sahariennes d'Algérie s'étalent sur près de deux millions de kilomètres carrés. Elles se caractérisent par un climat aride et chaud durant la majeure partie de l'année qui ne permet l'installation d'aucune culture sans le recours à l'irrigation. L'oasis de Ouargla (sud-est algérien), qui appartient à ce contexte environnemental difficile, est soumise de plus aux effets négatifs de la salinisation de ses sols et à la remontée des eaux salées de la nappe phréatique, due principalement à une irrigation et à un assainissement mal gérés à l'échelle de l'oasis.

Les oasis désignent à l'échelle mondiale des entités géographiques remarquables caractérisées par des zones fortement végétalisées entourées de vastes surfaces arides ou de déserts. L'existence locale de ressources permanentes en eau et la mise en place de systèmes d'irrigation assurant l'alimentation hydrique des plantes sont les conditions essentielles qui assurent leur pérennité (Pan et Chao, 2003).

Les oasis ont pendant longtemps été le symbole d'une utilisation rationnelle de la ressource eau en milieu aride. Or, la seconde moitié du XXe siècle a permis la découverte de ressources en eaux profondes et le développement de moyens techniques pour les exploiter. Paradoxalement, le problème en de nombreuses oasis est aujourd'hui celui d'un excès d'eau ou plutôt d'une mauvaise maîtrise d'une eau devenue plus abondante (Côte, 1998).

Dans un système endoréique, la non-maîtrise de l'irrigation conjuguée à un environnement peu propice et à l'inexistence d'un drainage naturel de la nappe, provoque une dégradation insidieuse et rapide de l'écosystème oasisien. La variabilité temporelle de la salinité dans ces écosystèmes est importante. Elle est liée à la dynamique même des processus qui influencent la salinité, *i.e.* l'apport d'eau d'irrigation salée, la fluctuation des nappes, les processus de lixiviation des sels et de remontée capillaire (Cheverry et Robert, 1998).

Dans ce sens, des pratiques d'irrigation peu adaptées au fonctionnement hydro-pédologique des sols des oasis se sont avérées néfastes pour la durabilité de l'agriculture entraînant ainsi une chute du rendement des cultures (Côte, 1998; Hachicha *et al.*, 2000; Djili *et al.*, 2003; Abdel-Razek *et al.*, 2010).

Au Sahara septentrional de façon générale et à Ouargla en particulier, le milieu oasien est confronté actuellement à une forte dégradation de son environnement due simultanément à une salinisation primaire liée à la fluctuation d'une nappe phréatique peu profonde et à une salinisation secondaire de ses sols par l'irrigation avec des eaux salées.

Il faut donc être capable d'appréhender la variabilité spatiotemporelle de la salinité, ce qui pose des problèmes méthodologiques dans ces vastes espaces.

De nombreux travaux ont été menés pour caractériser la variabilité spatiale de la salinité. Des chercheurs commençaient déjà à s'intéresser au phénomène dans les années 60 (Aubert, 1960). Simonneau et Aubert (1963) avaient décrit la salinité au Sahara d'Algérie et du Sud tunisien et ont observé le développement de cultures irriguées avec des eaux fortement minéralisées. Après la relance de l'agriculture saharienne, d'autres travaux (Martin, 1975; Daoud et Halitim, 1994; Djili *et al.*, 2003) ont été consacrés à ces zones en particulier, notamment dans les grandes fermes pilotes céréalières irriguées sous pivot, à Gassi-Touil (2000 ha) au sud de Ouargla et dans les plaines d'Abadla (7400 ha) dans la région de la Saoura. Le projet « Oasis 2000 » initié en 1986 (Dubost et Rognon, 1992) avait de prime abord cartographié la salinité des périmètres destinés à être remis en valeur. Ces études ont toutes montré une extension et une progression de la salinité et de la sodicité et par conséquent une diminution des rendements laissant ainsi ces périmètres à un stade de dégradation avancé.

Une évaluation précise de la salinité du sol est nécessaire pour développer des stratégies efficaces de pratiques de gestion agricole et de répartition de l'eau d'irrigation. Les méthodes conventionnelles de mesure sur petits échantillons peuvent difficilement rendre compte de la variabilité spatiale de la salinité (Boivin *et al.*, 1989). Les méthodologies développées in situ sont plus adaptées, en particulier la conductivimétrie électromagnétique qui appréhende la salinité sur un grand volume de sol (Corwin et Lesch 2005b; Amezketta 2007b).

La capacité de diagnostiquer et de surveiller les conditions de salinité à l'échelle du terrain a ainsi été considérablement améliorée grâce aux prospections de terrain utilisant l'induction électromagnétique (EM). Au cours des 20 dernières années, l'adaptation de capteurs électromagnétiques pour la mesure de la conductivité électriques du sol a fortement augmenté à la fois la vitesse et la fiabilité du travail de reconnaissance de la salinité (Lesch *et al.*, 1995a ; Michot, 2003).

De nombreux auteurs ont fait appel à la conductivité électromagnétique (EM38) pour décrire la variabilité spatiale des sols et pour augmenter la résolution de mesure de la salinité (Diaz et Herrero, 1992; Bennett et George, 1995; Samouelian *et al.*, 2005; Besson, 2007; Allred *et al.*, 2008; Adam *et al.*, 2012; Berkal *et al.*, 2012).

Si la cartographie spatiale de la salinité et de sa distribution verticale dans le profil du sol a été possible grâce aux instruments géophysiques électriques et électromagnétiques, en particulier l'EM38, le suivi temporel a fait défaut jusqu'à tout récemment avec les travaux de Lesch *et al.* (1998).

### **Contexte et objectifs scientifiques**

La majeure partie des sols de ces régions (sahariennes) est soumise à des fluctuations du niveau de la nappe d'eau dont le taux de salinité est considéré comme élevé (Dubost, 1992; Côte, 1998; Idder, 1998). Les processus qui modifient les sols dans ces régions sont principalement de trois ordres :

- l'érosion éolienne (Aubert, 1976; Clément, 2009) qui redistribue des quantités importantes de matériau et induit des phases d'érosion et/ou de redéposition des terres ;
- la salinité d'origine naturelle des sols liée à la présence de nappes salées à faible profondeur ou à la présence de minéraux sodiques, dont l'origine peut être autochtone ou allochtone du fait de transports par érosion éolienne ;
- l'influence de l'activité humaine et en particulier de l'irrigation des zones cultivées ainsi que le rejet des eaux usées dans les zones urbanisées, qui peuvent influencer la dynamique temporelle des nappes.

Dans les périmètres oasiens du Sahara algérien, comme la zone de Ouargla (31° 58' N, 5° 20' E), ces différents processus peuvent être actifs de façon simultanée et induire une très grande variabilité spatiale et temporelle de la salinité qui a des effets considérables sur la production agricole et sur l'environnement. Il apparaît donc indispensable d'être en mesure de décrire et de modéliser la dynamique spatiotemporelle de cette salinité, si on veut réhabiliter des sites existants ou mieux de mettre en valeur ces périmètres oasiens à travers la mise en œuvre de techniques d'exploitation, de choix cultureux et surtout de techniques d'irrigation adéquates.



**L'objectif scientifique central de la thèse est donc le suivant :**

- Décrire et modéliser la dynamique spatio-temporelle de la salinité à l'échelle d'une palmeraie irriguée, caractérisée par des sols (Salic Solonchaks Aridic) très sableux et en présence d'une nappe salée à faible profondeur qui fluctue selon les saisons.

Un objectif méthodologique associé est de développer des approches géophysiques qui permettent d'augmenter la résolution de mesure de la salinité à la fois dans le temps et dans l'espace, en limitant les difficultés inhérentes aux approches de prélèvements classiques, *i.e.* la lourdeur de la mesure et son caractère destructif.

Ce travail a été conduit dans le cadre d'un travail de recherche du département de sciences du sol de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique (ENSA, Alger), en collaboration avec Agrocampus Ouest Rennes (France), UMR SAS 1069<sup>1</sup>. Il fait suite aux travaux déjà réalisés par Iddir (2006) et Mahdi (2008) respectivement sur les régions de la Macta (Mohamadia) et du chott El Hodna. A l'inverse des autres travaux, la présente recherche porte exclusivement sur les sols sahariens irrigués à texture sableuse sous l'influence d'une nappe superficielle salée.

Afin de présenter au mieux l'ensemble de notre travail, ce document est composé de six chapitres :

Le premier chapitre "*Etat de l'art : application des méthodes géophysiques à l'étude de la salinité des sols*" dresse une synthèse bibliographique des principales approches géophysiques appliquées en agriculture. Il permet une meilleure connaissance des deux méthodes géophysiques les plus utilisées en cartographie de la salinité des sols pour de grandes superficies. On exposera à la fin de ce chapitre les différentes méthodes de prédiction de la conductivité électrique (EC) du sol et le mode d'évaluation de leurs précisions.

Le deuxième chapitre "*présentation de la région d'étude de l'oasis de Ouargla*" vise à situer le site d'étude dans son contexte régional.

Le troisième chapitre "*protocole expérimental et méthodes d'étude des sols*" porte sur la démarche adoptée pour le suivi spatiotemporel de la salinité entre mars 2009 et novembre 2010 par induction électromagnétique EM38. Il permet également de détailler la méthodologie adoptée pour le suivi de la dynamique saisonnière de la salinité et de ses déterminants.

---

<sup>1</sup> UMR SAS 1069: <http://www.rennes.inra.fr/umrsas>



Le quatrième chapitre "*caractérisation des sols et des eaux de la zone d'étude*" est une identification et une caractérisation morpho-analytique des propriétés des sols et des eaux de la palmeraie. Ces variables du milieu seront utilisés dans la construction des arbres de régression de prédiction de la salinité ( $EC_{1:5}$ ) et dans la modélisation hydrologique.

Le cinquième chapitre est une "*quantification des variations spatiales et temporelles de la salinité des sols par suivi électromagnétique*". Dans ce chapitre, on présente les résultats des prédictions empiriques de salinité construites avec des arbres de régressions et par une méthode déterministe et ce, dans le but de décrire l'évolution spatio-temporelle et la variabilité intra-parcellaire de la salinité. Enfin, le sixième chapitre "*utilisation de la modélisation hydrologique pour définir des scénarios de remédiation de la salinité des sols*" est consacré à la modélisation de l'évolution de la salinité au niveau de la zone racinaire pour trois stratégies (doses) d'irrigation et deux niveaux extrêmes de hauteur de la nappe phréatique.

L'ensemble des résultats obtenus lors de cette étude seront discutés et synthétisés dans une conclusion générale.

Les chapitres 5 et 6 incluent des articles scientifiques publiés ou en préparation pour des revues internationales à comité de lecture et sont rédigés respectivement en anglais et en français.

Les références bibliographiques sont regroupées en un seul ensemble en fin de document.

**Dynamique spatiotemporelle de la salinité de sols sableux irrigués en milieu aride**

**Application à une palmeraie de la cuvette de Ouargla en Algérie**

## **CHAPITRE 1 - ETAT DE L'ART - APPLICATION DES METHODES GEOPHYSIQUES A L'ETUDE DES SOLS**

*"Le succès n'est pas final, l'échec n'est pas fatal : c'est le courage de continuer qui compte".*

Winston Churchill

### **1.1. Introduction**

Dans ce chapitre on s'attache à présenter à une corporation d'agronomes utilisatrice de méthodes géophysiques électriques et électromagnétiques, (1) un bref historique sur les travaux de géophysique de surface en cartographie de la salinité des sols, et à présenter des éléments de compréhension concernant (2) les propriétés électromagnétiques des milieux poreux tels que les sols, et plus précisément leur conductivité électrique, (3) les variables pédologiques ayant une influence sur la propriété électrique (EC) et (4) les modèles de prédictions de la salinité et leurs performances.

### **1.2. Définition**

La géophysique peut être définie de plusieurs manières. Dans le sens le plus large, la géophysique est l'application des principes physiques à des études de la terre (Sheriff, 2002). Plus précisément, c'est l'application de techniques de mesure de quantités physiques pour fournir des informations sur les conditions ou les caractéristiques sous la surface de la terre. Ces techniques sont généralement non invasives, avec des quantités physiques déterminées à partir de mesures effectuées à ou près de la surface du sol. Les méthodes géophysiques utilisées incluent la résistivité électrique, l'induction électromagnétique, la magnétométrie, le géoradar et la sismique-réfraction (Toushmalani, 2010).

### **1.3. Historique de l'utilisation des méthodes géophysiques pour caractériser la salinité des sols**

Des levés géophysiques sont devenus de plus en plus fréquents dans la seconde moitié du siècle passé. Pendant les années 1930, l'agriculture de précision bénéficie déjà de l'évolution des méthodes de résistivité dans la gestion des irrigations (Allred *et al.*, 2008).

Le besoin crucial pour surveiller la salinité des sols et/ou évaluer les impacts des changements de sa gestion a accéléré l'application des méthodes géophysiques vers les années 1970 notamment avec les travaux de Rhoades et Ingvalson (1971). Ces 20 dernières années, elles se sont élargies aux études des influences de diverses variables pédologiques sur la conductivité électrique des sols (Besson, 2007).

L'estimation de la salinité a débuté par des observations visuelles sur des récoltes. Jusqu'à une époque récente, la salinité des sols était mesurée par leur teneur en chlore dosée par la méthode Lagatu et exprimée en chlorure de sodium (Durand, 1983). Elle a été suivie par la méthode des extraits saturés (ECe) au George et Brown Salinity Laboratory de Riverside (US. Salinity Laboratory Staff, 1954) qui montre l'incidence de la salinité sur la croissance des plantes, puis est apparue celle des extraits sol/eau 1/5 et 1/10 ( $EC_{1:5}$  et  $EC_{1:10}$ ) qui est facile d'utilisation et plus adaptée aux textures sableuses. Elle est mesurée en déci Siemens par mètre (dS/m) à 25 degrés Celsius (Rhoades *et al.*, 1999). Le passage de la conductivité

---

électrique de l'extrait dilué 1/5 à la ECe passe par un coefficient multiplicateur empirique "f" qui est fonction de la texture du sol. Il se situe entre 4 pour un sol argileux et 22 pour un sol très sableux (Slavich et Petterson, 1993; Gibbs, 2000; Shirokova *et al.*, 2000).

Par la suite, des capteurs de salinité constitués de cellule en céramique et de deux électrodes en platine ont été développés pour mesurer la EC in situ (Oster et Willardson, 1971). La mise en œuvre de ces dernières techniques demande d'importants investissements financiers et humains, notamment en matière d'échantillons (Rhoades et Corwin, 1984; Montoroi, 1992). Pour minimiser le nombre de prélèvements, caractériser de plus grandes surfaces et permettre un suivi temporel des phénomènes évolutifs, l'équipe de Riverside a mis en place une méthode de mesure de résistivité électrique utilisant un dispositif d'électrode de configuration Wenner (Rhoades et Corwin, 1984; Rhoades, 1992). Récemment, des méthodes non destructives telles que la conductance électromagnétique en domaine fréquentiel avec la gamme EM de Geonics Ltd et la réflectométrie dans le domaine temporel (TDM) ont été utilisées (Corwin et Rhoades, 1982; Wraith *et al.*, 1993; Lesch *et al.*, 1995b; Rhoades *et al.*, 1999; Corwin et Lesch, 2003, 2005b). Toutefois, la calibration des conductivités électriques apparentes (ECa) issues des mesures géophysiques est toujours assurée par des mesures de la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée (ECe).

De nombreux auteurs ont fait appel à la conductivité électromagnétique (EM38) pour décrire la variabilité spatiale de la salinité des sols (Robinson *et al.*, 2004; Corwin *et al.*, 2006; Amezketa, 2007b; Allred *et al.*, 2008). L'utilisation spatiale des mesures de la conductivité électrique apparente (ECa) offre un nouvel outil pour évaluer et mieux gérer la salinisation des sols dans les périmètres oasiens.

De plus, des mesures de terrains sont associées par de nombreux auteurs (Bishop et McBratney, 2001; Carre et Girard, 2002; Douaoui *et al.*, 2006) à la télédétection dans le domaine du visible pour cartographier des aspects de surface du sol. En outre, l'approche déterministe à des fins de spatialisation de données de la salinité a donné de bons résultats avec les travaux de Hosseini *et al.* (1994), Odeh *et al.* (1998) ; Walter *et al.* (2001) ; Douaoui *et al.* (2006).

## 1.4. Principales méthodes appliquées en agriculture

Michot *et al.* (2003), Schneider (2008) et Adam *et al.* (2012) citent un large éventail d'utilisations possibles pour les deux méthodes géophysiques employées principalement dans l'agriculture, la méthode électrique en courant continu mesurant directement la résistivité électrique apparente du sol et la méthode à induction électromagnétique en domaine fréquentiel.

### 1.4.1. La résistivité électrique

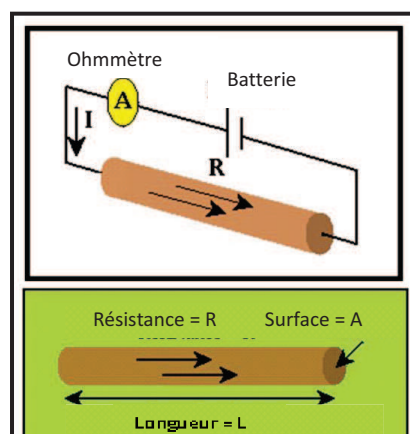
La résistivité électrique ( $\rho$ ) d'un matériau représente sa capacité physique à s'opposer à la circulation d'un courant électrique (Chartin, 2011). Cette faculté est étroitement liée à ses caractéristiques intrinsèques (Tableau 1-1).

**Tableau 1-1. Gammes de résistivité électriques des matériaux de la terre (d'après Palacky, 1987)**

Required parameters are missing or incorrect.

La résistivité électrique peut être de deux natures différentes suivant que le courant électrique est dû à un déplacement d'électrons (conductivité métallique) ou à un déplacement d'ions (conductivité électrolytique) (Bottraud *et al.*, 1985). Elle est exprimée en ohm.mètre ( $\Omega \cdot m$ ). Les pédologues lui préfèrent la conductivité ( $\sigma$ ) qui est la grandeur inverse de la résistivité. Elle s'exprime en Siemens/mètre (S/m).

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad [1]$$



**Figure 1-1. Schéma classique d'une résistance**

Si on considère un échantillon de sol cylindrique, de longueur  $L$  (m) et de section  $A$  ( $m^2$ ), disposé entre deux plaques conductrices reliées à un générateur délivrant un courant

électrique d'intensité  $I$  et une différence de potentiel  $V$  (Figure 1-1), l'application de la loi d'Ohm (Allred *et al.*, 2008; Schneider, 2008) conduit à la formule :

$$V = R.I \quad [2]$$

La résistance  $R$  dépend principalement de la nature du conducteur.

Alors la résistivité électrique  $\rho$  ( $\Omega \cdot m$ ) de l'échantillon peut être définie telle que :

$$\rho = \frac{R.A}{L} \quad [3]$$

$G = \frac{L}{A}$  où  $G$  est une constante ( $m^{-1}$ ) liée au volume de sol prospecté et donc dépendant de l'espacement des électrodes.

#### 1.4.1.1. Principe de mesure de la résistivité électrique

Les quadripôles (4 électrodes métalliques, le plus souvent alignées) sont les dispositifs les plus utilisés en prospection géoélectrique. Grace aux différentes combinaisons des positions des électrodes d'injection et des électrodes de mesure du potentiel électrique, il est possible de mesurer la résistivité électrique pour différentes profondeurs d'investigation (Tableau 1-2):

#### 1.4.1.2. Le dispositif Wenner

Le dispositif Wenner est le plus élémentaire et le plus robuste utilisé en cartographie des structures horizontales de subsurface (Figures 1-2, 1-3). Sa profondeur d'investigation est d'ailleurs plus faible que celles du Dipôle-Dipôle et du Wenner-Schlumberger.

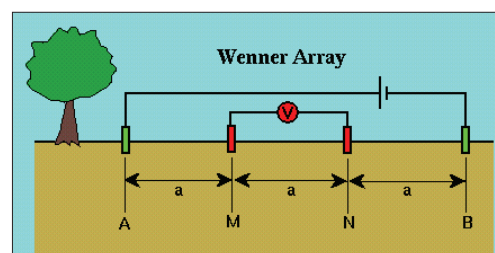


Figure 1-2. Schéma d'un dispositif électrique en mode Wenner

La méthode de Wenner impose un positionnement précis des électrodes les unes par rapport aux autres. Les quatre électrodes sont alignées et équidistantes telles que  $AM = MN = NB = a$  (m) (Figure 1-2). Pour un sol homogène, le volume de sol prospecté a été estimé à  $\pi a^3$  (Michot, 2003; Allred *et al.*, 2008; Chartin, 2011). D'après Samouëlian *et al.* (2005), ce volume correspond au quart de la distance AB.



**Figure 1-3. Mesure de la résistivité en mode Wenner**

Pour les surfaces homogènes, la distribution du potentiel au point M (Figure 1-2) résulte de la circulation du courant électrique entre les électrodes A et B.

La résistivité du sol mesurée avec un quadripôle placé avec un arrangement arbitraire à la surface est donnée par la relation (Hesse, 1990):

$$\rho = 2\pi \frac{\Delta V}{I} \times \frac{1}{\left(\frac{1}{MA} - \frac{1}{MB}\right) - \left(\frac{1}{NA} - \frac{1}{NB}\right)} = 2\pi K \frac{\Delta V}{I} \quad [4]$$

où K est une constante géométrique du quadripôle.

Les variations verticales de la résistivité apparente du point mesuré sont enregistrées par les variations de l'écartement "a" des électrodes. La résistivité apparente est un signal intégrant de façon pondérée les vraies résistivités des différents matériaux traversés entre la surface et la profondeur maximale atteinte par les lignes de courant.

Pour le dispositif Wenner, la distance inter-électrodes est égale à  $AM = MN = NB = a$ , ce qui permet de calculer le facteur géométrique K à partir de l'équation 4, tel que  $K=a$ . Ce facteur tient compte de la configuration spatiale des électrodes et de la forme du milieu investi par le courant électrique. La résistivité apparente  $\rho_a$  d'un milieu supposé d'extension semi-infinie, mesurée avec un quadripôle d'électrodes Wenner d'équidistance "a", est simplifiée dans l'équation 5 (Corwin et Lesch, 2003; Allred *et al.*, 2008).

$$\rho_a = 2\pi a \left( \frac{\Delta V}{i} \right) = 2\pi a R \quad [5]$$







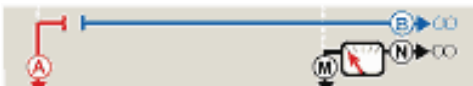
où  $i$  est l'intensité du courant électrique injecté entre les électrodes A et B,  $\Delta V$  est la différence de potentiel électrique mesurée entre les électrodes M et N, et  $R$  est la résistance ( $\omega$ ) (Figure 1-2).

La mesure de résistivité brute est appelée la résistivité électrique apparente, car elle donne une valeur calculée comme si le milieu était homogène (Allred *et al.*, 2008). La mesure ECa est représentée dans l'équation 6 :

$$ECa = \frac{1}{2\pi aR} \quad [6]$$

La configuration du dispositif est choisie selon la problématique de l'étude. Les principaux dispositifs communément utilisés sont le Wenner, le Wenner-Schlumberger, le dipôle-dipôle et le pôle-pôle (Zohdy, 1989; Dahlin et Loke, 1998) (Tableau 1-2).

**Tableau 1-2. Principales configurations des électrodes**

Dispositifs		Profondeur d'investigation	
		Roy et Apparao (1971)	Barker (1989)
Wenner		0,11L	0,17L
Schlumberger		0,125L	0,19L
			
			

Dipôles- Dipôles		0,195L	0,25L
Pôles-Pôles		0,35L	/

#### 1.4.1.3. Le dispositif Wenner-Schlumberger

Pour le dispositif Wenner-Schlumberger, le facteur géométrique "K" est différent du Wenner. Il est cependant égal à  $K=n(n+1)a$ .

Pour une même distance L (Tableau 1-2), la profondeur d'investigation médiane de ce dispositif est d'environ 10% plus grande que celle du Wenner (Loke, 2001). Il est recommandé à la fois pour les structures horizontales et verticales.

#### 1.4.1.4. Le dispositif Dipôle-Dipôle

Le facteur "K" de ce dispositif est donné  $K=a \times n(n+1)(n+2)$ . C'est un dispositif très utilisé dans la cartographie des structures verticales (Loke, 2001). Sa profondeur d'investigation est plus grande que pour le Wenner et Wenner-Schlumberger.

#### 1.4.1.5. Le dispositif Pôle-Pôle

La particularité de ce dispositif, est de mettre deux électrodes à l'infini (Tableau 1-2). Le facteur géométrique "K" est donné par la formule  $K=2a$ . Il permet d'obtenir une profondeur d'investigation verticale importante et est surtout utile en 3D.

### 1.4.2. Méthode à induction électromagnétique EM

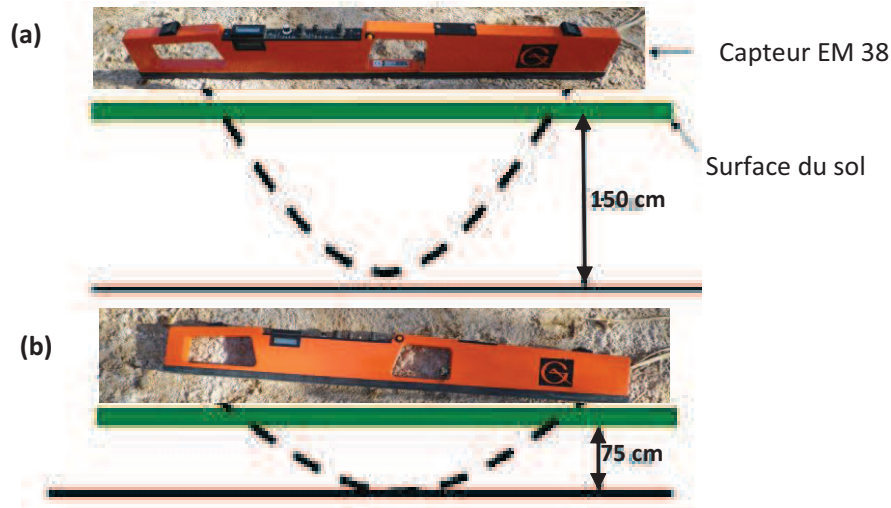
Le conductivimètre électromagnétique Geonics EM38 est un instrument très léger (2,5 kg) et non invasif conçu spécifiquement pour la surveillance de la salinité des sols agricoles (Corwin et Rhoades, 1982). Il est utilisé pour surveiller à moindre frais de grandes surfaces sans contact avec le sol. Le EM38 utilise le principe de l'induction électromagnétique.

#### 1.4.2.1. Principe de mesure de la conductivité électromagnétique

Le Geonics EM38 produit un champ magnétique primaire dans une bobine émettrice dans une extrémité de l'appareil de mesure à induction électromagnétique. Ce champ crée des boucles de courant dans le sol. Les boucles de courant créent un champ magnétique secondaire. Ce champ magnétique induit est superposé au premier champ magnétique et mesuré dans une bobine de réception à l'autre extrémité de l'instrument (Nogues *et al.*, 2006).

Il peut opérer dans deux configurations, dipôle vertical (VCP) et dipôle horizontal (HCP), atteignant respectivement des profondeurs d'exploration de 1,5 mètres et 0,75 mètres qui

correspondent approximativement à la zone racinaire (McNeill, 1980; Rhoades, 1992; Rhoades *et al.*, 1999; Sudduth *et al.*, 2005; Corwin et Lesch, 2005b) (Figure 1-4). Il est utilisé pour mesurer la conductivité apparente du sol en milli-Siemens par mètre (mS/m).



**Figure 1-4. Le Geonics EM38 MK2 : (a) mode vertical, (b) mode horizontal**

La réponse de l'instrument à la conductivité du sol ne varie pas linéairement avec la profondeur (Figure 1-5).

**Required parameters are missing or incorrect.**

**Figure 1-5. Réponse relative de l' EM38 en fonction de la profondeur (adapté de McNeill, 1992)**

En mode HCP, la sensibilité de l'appareil est la plus élevée à environ 0,4 m de profondeur. En mode VCP, la sensibilité est la plus élevée à la hauteur de l'instrument et décroît avec la profondeur.

Les mesures sont réalisées avec l'instrument placé directement à la surface du sol (Figure 1-4). La lecture de la mesure se fait directement ou peut également être enregistrée numériquement en utilisant un enregistreur de données (data logger).

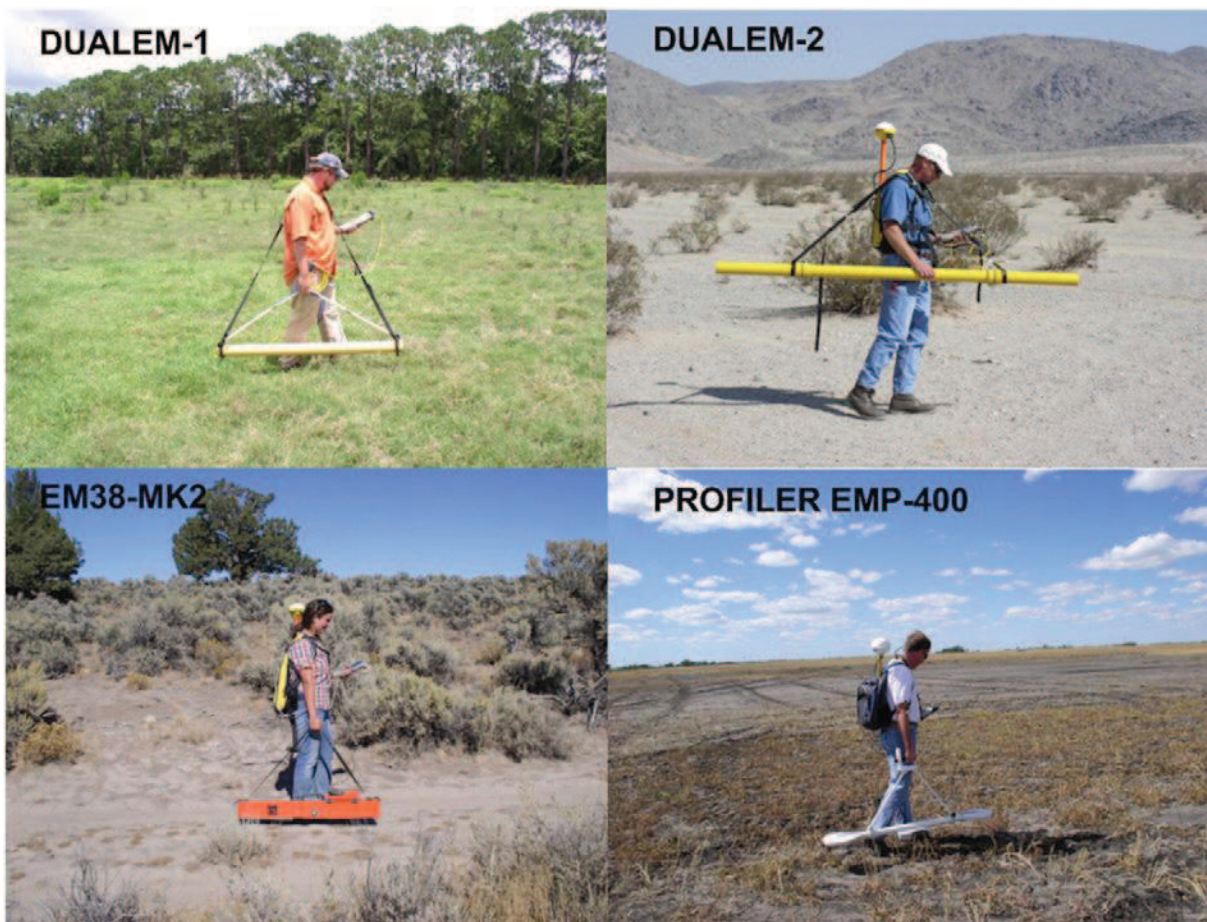
Il est cependant important de signaler que tous les instruments de terrain utilisés dans les enquêtes de la salinité mesurent la conductivité apparente (ECa) du sol et non la salinité des sols en soit. La conversion de la conductivité en salinité nécessite soit une mesure précise ou une estimation de propriétés supplémentaires du sol à chaque site de mesure de la conductivité, soit la collecte d'un ensemble limité d'échantillons de sol à partir de quelques sondages provenant de la zone d'étude dans un but de calibrage. Cette approche est souvent dénommée "étalonnage stochastique", car elle est fondée sur des statistiques et / ou techniques géostatistiques de modélisation.

### 1.4.2.2. Utilisation de techniques d'induction électromagnétique en science du sol

Les techniques d'inductions électromagnétiques sont de plus en plus utilisées pour étudier la variabilité spatiale des propriétés du sol aux échelles variant de la parcelle au paysage (Triantafilis *et al.*, 2000; Corwin et Lesch, 2005b; Amezket, 2007b; Dang *et al.*, 2011). Cependant, ces techniques ont leurs limites ; les résultats ont tendance à être à la fois dépendants du temps et spécifiques au site et peuvent varier en fonction des interactions complexes entre les propriétés du sol (Lesch *et al.*, 1998).

Un nombre croissant de capteurs à induction électromagnétique sont disponibles. Les capteurs à induction électromagnétique couramment utilisés dans l'agriculture et les enquêtes du sol sont le DUALEM-1 et DUALEM-2 (Duaem, Inc., Milton, Ontario), le EM31, le EM38, le EM38-DD, le EM38-MK2 (Geonics Limited, Mississauga, Ontario), et le EMP-400 (Geophysical Survey Systems, Inc., Salem, New Hampshire) (Figure 1-6) (Doolittle et Brevik, 2014).

Cependant, il existe une différence dans la calibration des capteurs. La sensibilité de la profondeur de détection et du volume du sol mesuré affectera les mesures et entraînera légèrement des valeurs différentes de la ECa (Sudduth *et al.*, 2003).



---

**Figure 1-6. Quatre capteurs à induction électromagnétique utilisés pour les investigations des sols**

**1.5. Paramètres des sols influençant la propriété électrique**

La géophysique agricole "agricultural geophysics" a tendance à être fortement axée sur une zone de 2 m directement sous la surface du sol qui comprend la zone racinaire et la totalité ou, au moins, la plus grande partie du profil du sol. On parle de méthodes de géophysiques de subsurface "near-surface". Cependant, il y a des complexités associées à cette géophysique et qui ne sont généralement pas rencontrées avec l'application des méthodes géophysiques à d'autres disciplines. Une telle complexité est due à la température du sol et aux conditions transitoires d'humidité qui peuvent modifier sensiblement les valeurs géophysiques journalières, voire même des différences de données entre quelques heures de mesures dans certains milieux (Besson *et al.*, 2008).

La résistivité électrique d'un sol est influencée par plusieurs facteurs répartis entre les variables intrinsèques pérennes telles que la texture, la structure, la pierrosité et la carbonatation du sol et les variables d'états diachroniques comme la teneur en eau, la température et la concentration de la solution du sol (Sudduth *et al.*, 2001; Michot, 2003; Friedman, 2005; Samouelian *et al.*, 2005; Allred *et al.*, 2008; Schneider, 2008).

Sur un plan qualitatif, l'évolution du comportement électrique des sols répond toujours à la même logique. L'augmentation de la densité de charges électriques du milieu, qu'elles soient localisées aux interfaces solide/liquide ou en solution, ou la facilité avec laquelle le milieu permet le déplacement de ces charges, impliquent une augmentation de conductivité électrique et inversement (Besson, 2007). Cela dit, l'extrapolation à tous les contextes pédologiques d'une relation quantitative, même fortement corrélée, entre la conductivité et une autre variable pédologique reste délicate, de même que la prédictibilité du signal électrique et sa modélisation théorique, du fait de cette multiplicité des dépendances (Cousin *et al.*, 2005).

L'accroissement des variables intrinsèques pérennes, sont suffisamment lentes pour influencer la propriété électrique à court et à moyen terme. Au contraire, les variables d'état diachroniques conjoncturelles sont caractérisées par une évolution rapide nécessitant des observations temporelles très rapprochées pour être correctement décrites (Besson, 2007).

Cependant, les variations journalières de la température peuvent entraîner des modifications de la résistivité du sol. En zones arides, l'effet correspondant devrait être considérable dans la



plupart des cas. Pour réaliser des mesures temporelles s'étalant sur une longue période (entre l'hiver et l'été) et/ou portant sur de très faibles profondeurs, il faudra envisager une standardisation à la température de 25°C par l'utilisation de l'équation de Campbell *et al.* (1948). Pour cela il est indispensable d'effectuer à chaque fois des mesures de température au sein des différents milieux prospectés (Michot, 2003; Michot *et al.*, 2003; Besson, 2007; Amezketa, 2007a).

### 1.6. Prédiction de la conductivité électrique (EC) du sol

Les prédictions sont réalisées par des équations de prédiction issues des modèles statistiques ou géostatistique. Ces fonctions de régression ou règles sont calibrées en utilisant les données d'étalonnage puis validées, permettant ainsi d'évaluer la qualité des estimations par le calcul d'incertitudes de prédiction (Walter *et al.*, 2006). En outre, à la différence de l'expertise du pédologue, ces règles empiriques sont totalement extrapolables, et peuvent être améliorées constamment par l'ajout de nouvelles données (Lagacherie *et al.*, 2013).

De nombreux modèles empiriques sont utilisés pour prédire la E<sub>Ce</sub> à partir des mesures de E<sub>Ca</sub> et de quelques prélèvements de calibrations. Une approche utilisant une simple régression linéaire E<sub>Ce</sub> = f(E<sub>Ca</sub>) est développée par Wollenhaupt *et al.* (1986), alors que El Meddahi *et al.* (1993) utilisent leur modèle déterministe LEACHC pour prédire le comportement et le devenir des sels dans la zone racinaire.

Des approches de prédiction par des modèles stochastiques ont été explicitement développées par Rhoades et Corwin (1984) ; Slavish (1990) ; Lesch *et al.* (1998) ; Rhoades *et al.* (1999) et Amezketa (2007a) pour fournir des outils pratiques pour convertir les lectures EM38 en salinité (E<sub>Ce</sub>) du sol. Un modèle stochastique est un modèle linéaire de régression multiple à référence spatiale. Il est donné par la formule suivante :

$$\ln(E_{Ce}) = b_0 + b_1[\ln(EMh)] + b_2[\ln(EMv)] + b_3[x] + b_4[y] \quad [7]$$

où EMh et EMv représentent les lectures EM38, et x et y représentent les coordonnées spatiales des sites de mesures EM38. Néanmoins, la prédiction des niveaux de la salinité (lnE<sub>Ce</sub>) passe d'abord par l'estimation des paramètres de régression (b<sub>0</sub>, b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>, b<sub>3</sub>, et b<sub>4</sub>).

En effet, Lesch *et al.* (2000) développent le logiciel ESAP qui permet à la fois d'identifier les emplacements optimaux des sites d'échantillonnage à partir des données des enquêtes E<sub>Ca</sub> et de prédire ensuite la E<sub>Ce</sub> ou la E<sub>C1.5</sub> de trois couches prédéfinies (30 cm, 60 cm et 90 cm) en utilisant les conductivités électriques des sites prélevés selon la formule suivante :

$$(E_{C_{1.5}}) = b_0 + b_1z1 + b_2z2 + b_3u + b_4v + \varepsilon \quad [8]$$

où z1 et z2 sont définis : z1 = ln(E<sub>CaV</sub>) + ln(E<sub>CaH</sub>), z2 = ln(E<sub>CaH</sub>) – ln(E<sub>CaV</sub>) ; les variables (u,v) représentent les coordonnées spatiales des sites de mesures EM38 ; et ε représente le résidu.

Par ailleurs, la cartographie numérique des sols (Digital Soil Mapping) à haute résolution permet d'utiliser la conductivité électrique apparente du sol comme une mesure indirecte de la salinité du sol, tout en incluant dans les modèles d'autres covariables (teneur en gypse, humidité du sol, altitude de la parcelle, ...) décrivant le contexte local et susceptibles d'influencer la conductivité réelle de la solution du sol (McBratney *et al.*, 2003; Sauer *et al.*, 2013).

Dans ce sens, Cubist qui est un algorithme de régression fondé sur des règles de régression. Il permet la création d'un modèle prédictif basé sur les conditions des règles (partition de l'espace d'étalonnage en fonction des variables d'environnement associés) et les règles de prédiction linéaire (prédiction de la variable d'intérêt en combinant les valeurs des covariables environnementales) a été utilisé dans divers domaines (Quinlan, 1993; Rulequest Research, 2007; Minasny et McBratney, 2008; Walton, 2008; Minasny *et al.*, 2009). Cubist est reconnu comme un outil efficace dans la prédiction des propriétés pédologiques comme le stock de carbone organique du sol (SOC), du pH et de la conductivité électrique (EC) (Miklos *et al.*, 2010; Lacoste, 2012). Cubist est également capable de créer des règles compréhensibles qui décrivent les relations entre la réflectance infrarouge diffuse et les propriétés des sols (Minasny *et al.*, 2009).

### **1.7. Précision des prédictions**

L'échantillonnage indépendant est le plus recommandé pour d'éviter les biais, mais il n'est souvent pas utilisé pour des raisons de coût (évaluation externe) (Brus *et al.*, 2011; Lacoste, 2012). Sous Cubist, les modèles construits sont également évalués sur l'ensemble des données de calibrage d'où ils ont été produits (évaluation interne).

La validation croisée (évaluation interne et/ou externe) consiste le plus souvent à diviser le jeu de données initiales en  $n$  jeux de calibration ( $n$ -fold cross-validation), puis sélectionner un des  $n$  jeux comme ensemble de validation et les  $(n-1)$  jeux restants constitueront l'ensemble d'entraînement et à réitérer cette opération de la même façon pour les  $(n$ -fold -1) jeux qui n'ont pas encore été utilisés pour la validation (Lagacherie *et al.*, 2013). Cependant, ces données de validation ne sont pas véritablement indépendantes du jeu d'apprentissage ou d'entraînement puisqu'elles relèvent de la même stratégie d'échantillonnage (Brus *et al.*, 2011; Lagacherie *et al.*, 2013).

En outre, trois principaux indices d'erreur sont calculés à la fois pour l'évaluation interne et externe: (i) the Mean Absolute Error (MAE, Eq. 9), (ii) the Root Mean Square Error qui est une mesure de l'erreur moyenne (ou de précision) de la prédiction (RMSE, Eq.10), (iii) le coefficient de détermination qui mesure l'accord entre des données mesurées et prédites ( $R^2$ , Eq.11).

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - X_i| \quad [9]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n |y_i - X_i|^2}{n}} \quad [10]$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \bar{x}|^2}{\sum_{i=1}^n |X_i - \bar{x}|^2} \quad [11]$$

### 1.8. Conclusion partielle

L'utilisation des méthodes géophysiques électrique et à induction électromagnétique a été élargie à la cartographie à grande résolution de la variabilité spatiale des propriétés du sol. Leurs associations à des moyens de prédiction semblent être un outil incontournable de la cartographie numérique des sols. Cependant, ces méthodes non destructives du sol nécessitent d'être adaptées/calibrées au contexte local.

Par voie de conséquence, l'utilisation de l'EM 38 facilitera l'acquisition d'un grand nombre de mesure ECa pour prédire la variabilité spatiotemporelle de la salinité des sols de la zone d'étude (10 ha). En outre, elle (ECa) dévoilera l'état actuel de la salinité des sols qui servira de base à une recherche de stratégies d'irrigation adéquates limitant à la fois la salinisation secondaire et la remonté de la nappe.



**Dynamique spatiotemporelle de la salinité de sols sableux irrigués en milieu aride**

**Application à une palmeraie de la cuvette de Ouargla en Algérie**

## **CHAPITRE 2 - PRESENTATION DE LA REGION D'ETUDE**

*"Le succès, c'est d'aller d'échec en échec sans perdre son enthousiasme"*

Winston Churchill

## 2.1. Introduction

Ce chapitre a pour objectif de présenter la région d'étude localisée dans la wilaya de Ouargla et son contexte régional. Les informations disponibles concernant les facteurs naturels susceptibles d'influencer les sols sont présentées (géologie, géomorphologie, hydrogéologie et climat). L'occupation humaine et son développement récent sont passés en revue afin d'évaluer l'ampleur de l'agriculture en générale et de la phoeniciculture en particulier dans la région de Ouargla. Ce chapitre se termine par la présentation d'un aperçu sur la ressource hydrique et ses conséquences sur le sol et les cultures.

## 2.2. Situation géographique et cadre physique

La wilaya de Ouargla (Figure 2-1) se situe dans le sud-est de l'Algérie. Elle couvre une superficie de 154 300 Km<sup>2</sup> (RGPH, 1998). Elle est limitée au nord par la wilaya de Biskra, à l'ouest par la wilaya de Ghardaïa, au nord-ouest par la wilaya de Djelfa, à l'est par la wilaya d'El Oued et la Tunisie, au sud-est par la wilaya d'Illizi et au sud par la wilaya de Tamanrasset.

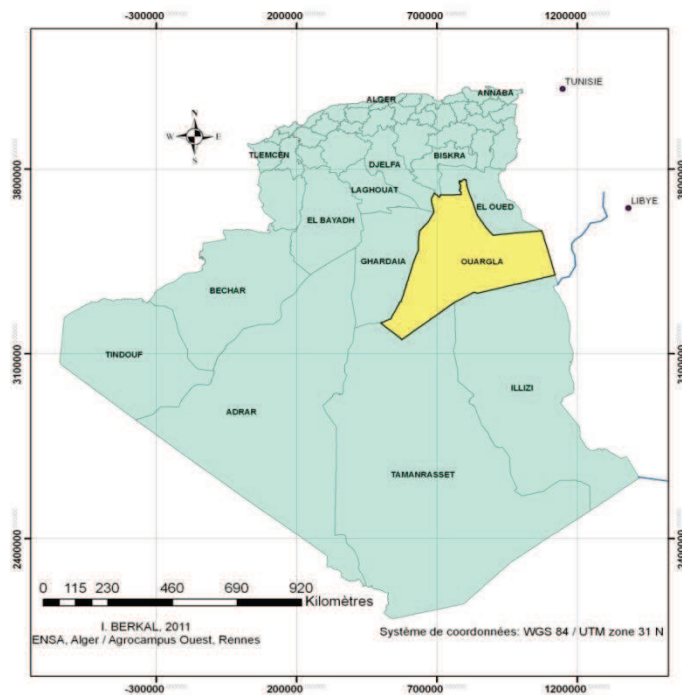


Figure 2-7. Situation géographique de la wilaya de Ouargla

La ville de Ouargla (Figure 2-2) et ses alentours se situent à une altitude moyenne de 140 m. La ville est construite dans le lit de la vallée fossile (Quaternaire) de l'oued M'ya qui draine le versant nord du plateau de Tademaït et qui s'achève à Sebkhât Sefioune (Rouillois-Brigol, 1975; Hamdi-Aïssa et Girard, 2000; Kouzmine, 2003).

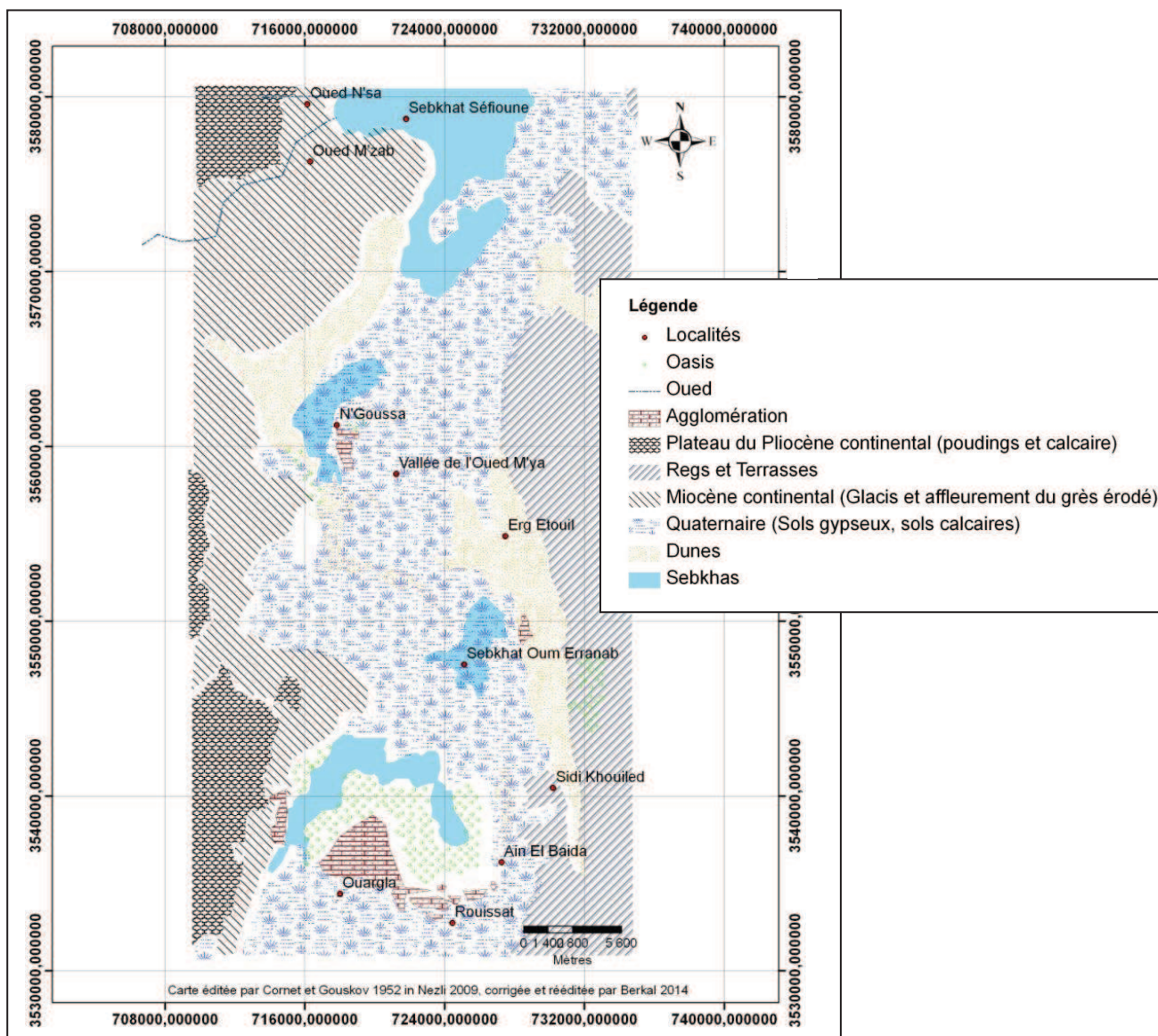


Figure 2-8. Carte des formations superficielles dans la vallée de Ouargla

## 2.3. Le milieu physique

### 2.3.1. La géologie

La région d'étude fait partie de la plateforme saharienne qui est constituée d'un bouclier précambrien composé de morceaux de la plateforme africaine (Rouvillois-Brigol, 1975). Elle se subdivise en trois sous-domaines constitués par les bassins du Grand Erg Occidental et du Grand Erg Oriental qui sont séparés par l'anticlinal du M'Zab, et par le bassin du plateau de la Hamada El Hamra (Figure 2-3) (UNESCO, 1972; Nezli, 2009).

Kouzmine (2003) rapporte que la cuvette du Bas-Sahara (Grand Erg Oriental) et le Grand Erg occidental sont séparés par une dorsale de 200 à 230 m d'altitude en moyenne d'orientation nord-sud liée à une surélévation structurale. Il s'agit d'un plateau gréseux (hamada) qui s'abaisse lentement vers l'est et qui se termine par un escarpement à l'ouest. Le même auteur fait remarquer que cette dorsale joue un rôle majeur dans la structuration de l'espace saharien.

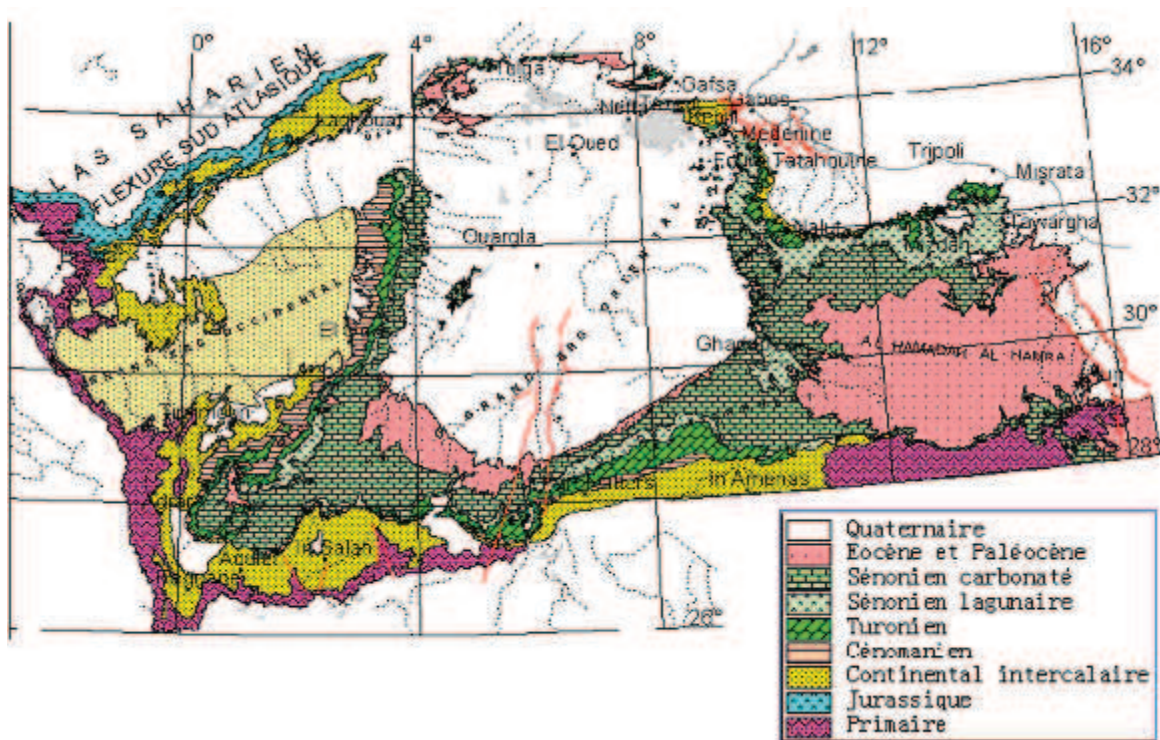


Figure 2-9. Extrait de la carte géologique du Sahara (Nezli, 2009)

La carte des affleurements géologiques de la cuvette de Ouargla (Figure 2-2) montre un revêtement tabulaire de terrains d'âge Tertiaire et de dépôts détritiques Quaternaires. Elle montre également un dépôt continental du Mio-Pliocène dans lequel alternent des sables siliceux, des grès, des argiles et parfois des marnes. Le Pliocène continental constitue la structure des regs sous forme d'une croûte calcaire, avec des poudingues ou des calcaires lacustres (O.N.A, 2004; Nezli, 2009).

### 2.3.2. La topographie

Le long de la vallée, les sebkhas et les massifs dunaires alternent avec des bas-fonds dans lesquels sont installées les cultures irriguées et les terrains bours<sup>2</sup>.

La vallée est pratiquement plane. Sa pente générale est légèrement inférieure à 1‰ (52 m de dénivelée par 55 Km) mais elle n'est pas rectiligne. Elle se subdivise en trois tronçons (Rouvillois-Brigol, 1975):

- du pied du Djebel Abbad à la rive nord de la Sebkhia de Ouargla, la pente est de 2 ‰.
- du nord de la Sebkhia jusqu'à la palmeraie de N'Goussa, nous notons une pente régulière de 1,8 ‰ (Figure 2-4).
- après le seuil de N'Goussa, la topographie devient pratiquement plane jusqu'aux rives de la sebkha Safioune où la pente est réduite à 0,6 ‰.

---

<sup>2</sup> Bours : parcelles agricoles délaissées



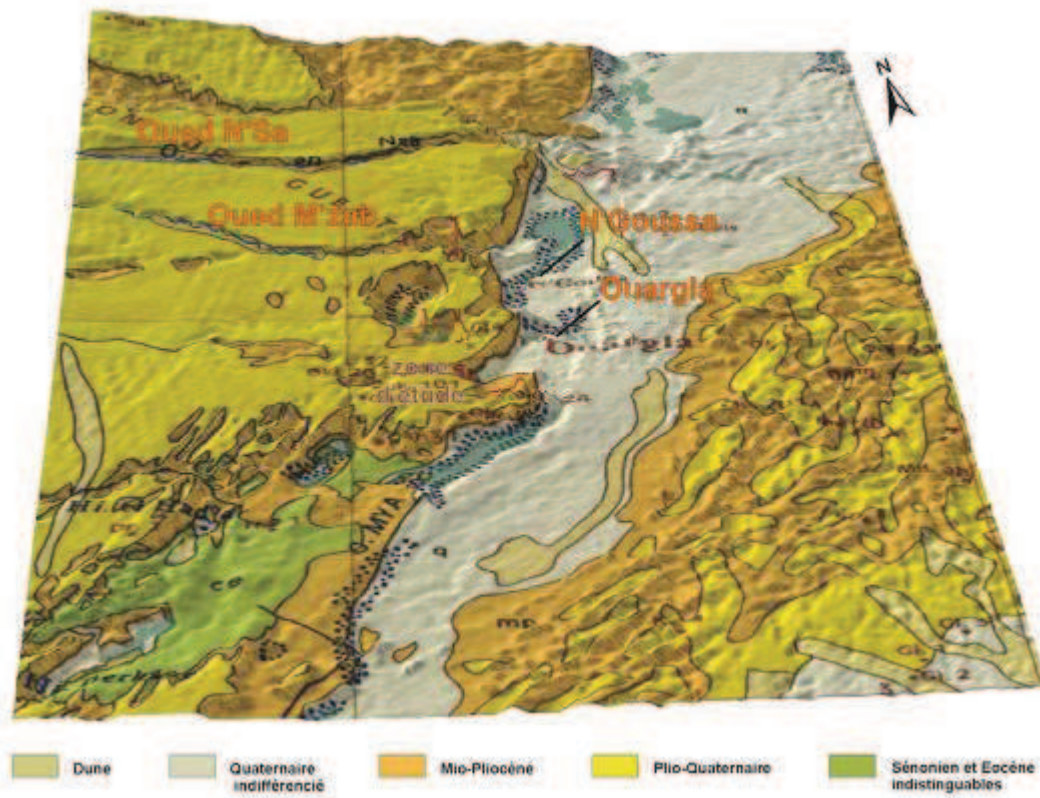


Figure 2-10. Esquisse géomorphologique de la région de Ouargla (ONA, 2004)

### 2.3.3. Pédologie de la région

Selon Daoud et Halitim (1994), la région de Ouargla se caractérise par une grande hétérogénéité de sols représentés par les Leptosols (yermic), les Arenosol aridic, les Stagnosols, Gleysols, les Solonchaks et par les Gypsisols.

Dans le Sahara septentrional algérien, on trouve des sols dénudés par des vents violents laissant sur place des concentrations de matériaux grossiers d'ablation (reg) ou *hamada*. Cet important agent morphogénétique qui est le vent, transporte les particules fines issues de l'altération mécanique des roches (fragmentation et ablation) pour former de vastes couvertures sableuses et des champs de dunes (erg).

La présence d'une nappe salée fluctuante combinée avec une irrigation mal contrôlée aggravée par un climat très évaporant conduit à la formation et à l'extension de sols salins et salin sodiques, avec parfois des encroûtements gypseux.

Dans la cuvette de Ouargla, les sols sablo-limoneux sont généralement plus siliceux en surface en raison de l'entraînement du gypse dissous vers les horizons profonds du sol. La concentration maximum en gypse se rencontre à environs 20 cm de profondeur passant vers le bas à un sol plus siliceux.

#### **2.3.4. L'hydrographie**

Le réseau hydrographique est composé de l'Oued M'ya qui est un oued fossile dont la source se situait au sud dans les massifs montagneux du Tademaït. Il traversait lors des dernières périodes pluviales du Pléistocène inférieur et de l'Holocène Ouargla avant de recevoir au niveau de la sebkha Safioune les apports de l'Oued M'zab et de l'Oued N'sa (Rouvillos-Brigol, 1975).

#### **2.4. Le Climat**

Le climat saharien se caractérise par la faiblesse et l'irrégularité des précipitations, une luminosité intense, une forte évaporation et une grande amplitude thermique.

D'après Rouvillos-Brigol (1975), le climat de Ouargla est un climat particulièrement contrasté. L'aridité s'exprime non seulement par des températures élevées en été et par la faiblesse des précipitations, mais surtout par l'importance de l'évaporation due à la sécheresse de l'air.

##### **2.4.1. Précipitations**

L'analyse pluviométrique de la région de Ouargla (Tableau 2-1) montre que les précipitations sont très rares et présentent une irrégularité mensuelle et annuelle. En effet, le mois le plus pluvieux est octobre avec seulement 8,3 mm en moyenne. Le cumul annuel moyen n'est que de 38,7 mm (ONM, 2010).

##### **2.4.2. Température**

Le Tableau 2-1 indique que la température moyenne annuelle est de 23,4 °C. La température maximale moyenne de 43,7 °C est obtenue au mois de juillet, alors que le mois le plus chaud est le mois d'aout avec une moyenne mensuelle de 35,1°C. Par contre, janvier est le mois le plus froid avec une moyenne mensuelle de 11,7°C et un minimum moyen mensuel de 4,9 °C. L'amplitude thermique mensuelle fluctue entre 13,6°C en janvier et 17,8°C en juillet (ONM, 2010).

**Tableau 2-3. Données climatiques de la station de Ouargla, données mensuelles sur la période 1997- 2009**

\*: Cumul annuel moyen ; Min moy: température minimale moyenne ; Max moy : température maximale moyenne.

Mois	Températures (°C)			Précipitation (mm)	Vitesse du vent (m/s)	Evaporation (mm)	Humidité (%)	Insolation (heure)
	Min.moy	Max.moy	Moyenne					
Janvier	4,9	18,5	11,7	7,9	2,8	102,0	60,1	246,3
Février	6,6	20,9	13,7	1,0	3,2	128,2	52,4	240,3
Mars	10,1	25,5	17,8	4,0	3,8	218,2	41,9	248,1
Avril	14,9	29,9	22,4	1,6	4,4	289,7	35,3	281,4
Mai	20,0	34,8	27,4	1,2	4,8	343,2	32,2	275,2
Juin	25,0	39,4	32,2	0,3	4,6	431,9	26,2	299,2
Juillet	25,9	43,7	34,8	0,5	4,2	484,1	24,6	337,3
Août	27,3	42,9	35,1	1,4	4,0	451,8	25,4	320,3
Septembre	23,7	37,6	30,6	3,6	4,1	315,9	38,0	254,4
Octobre	17,8	31,8	24,8	8,3	3,5	239,6	46,4	259,9
Novembre	10,1	23,9	17,0	7,0	2,8	137,3	56,5	246,6
Décembre	5,9	20,5	13,2	1,9	2,7	95,2	60,5	201,3
Moyenne	16,0	30,8	23,4	38,7*	3,7	3237,1*	41,6	267,5

### 2.4.3. Evaporation

L'évaporation est très forte dans la région de Ouargla. En effet, le Tableau 2-1 révèle qu'elle est de l'ordre de 3237 mm/an. Ce Tableau montre aussi que l'évaporation maximale mensuelle est de l'ordre de 484 mm/mois et qu'elle correspond au mois de juillet. Par contre, l'évaporation minimale est de l'ordre de 95 mm/mois, elle est enregistrée au mois le plus froid correspondant à décembre.

### 2.4.4. Insolation

La durée d'insolation dans la cuvette de Ouargla est de 267 heures/mois (Tableau 2-1).



### 2.4.5. Vents

Les vents sont fréquents durant toute l'année. Ils soufflent au printemps, en moyenne 50 jours par an. Les vents les plus fréquents sont de direction NNE-SSW, tandis que les plus violents sont de directions N, NE et W et sont à l'origine des tempêtes de sables. Les vitesses moyennes sont de 3,7 m/s, mais les vents les plus forts peuvent dépasser les 20 m/s (Tableau 2-1).

### 2.4.6. Synthèse climatique

Le diagramme ombrothermique de la station climatique de Ouargla établi pour la période 1997 - 2009 (Figure 2-5) révèle que la période sèche s'étale sur toute l'année. Cela veut dire qu'il ne peut y avoir d'agriculture sans le recours à l'irrigation.

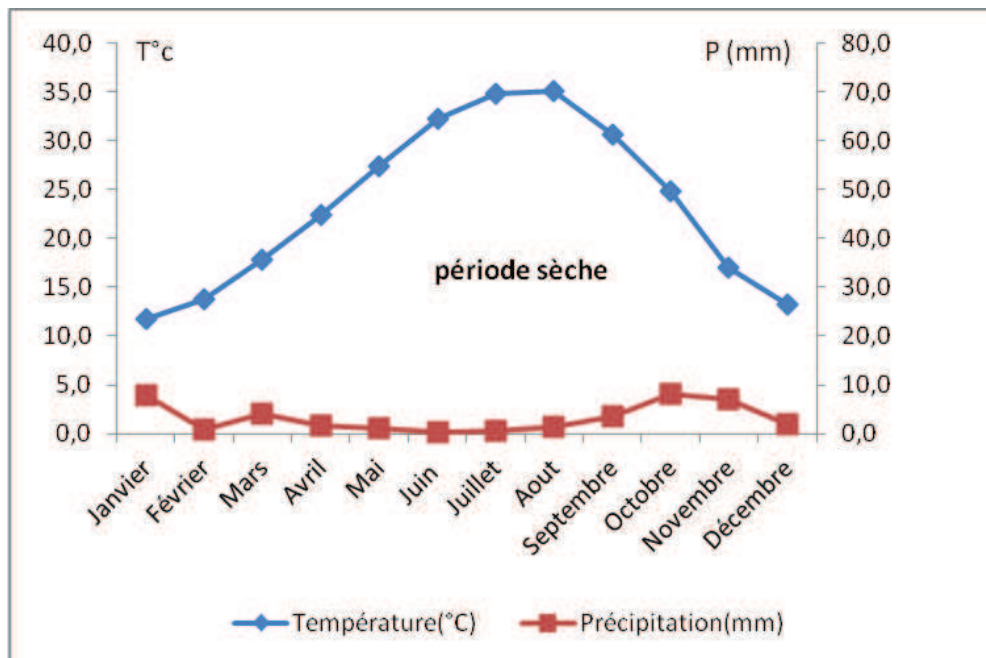


Figure 2-11. Diagramme ombrothermique de la station de Ouargla (1997-2009)

Stewart (1969) a établi une formule du quotient pluviothermique (Q3) plus simple que celle proposée par Emberger (1930):

$$\text{Avec : } Q_3 = \frac{3,43 \times P}{M - m}$$

P : pluviosité moyenne annuelle en mm ;

M: moyenne des températures maximales quotidiennes du mois le plus chaud en °C;

m : moyenne des températures minimales quotidiennes du mois le plus froid en °C.

Calculé pour la période 1999 à 2009, le Q<sub>3</sub> pour la région de Ouargla est égale à 3,42. De ce fait, selon ce quotient, le climat de Ouargla se situe dans l'étage bioclimatique saharien à hiver doux (Figure 2-6). Le diagramme pluviothermique et bioclimatique, inspiré de (Pouget, 1980), la classerait dans le climat saharien à hivers tempérés et (Le Houérou, 1989) dans l'hyperaride inférieure à hivers tempérés.

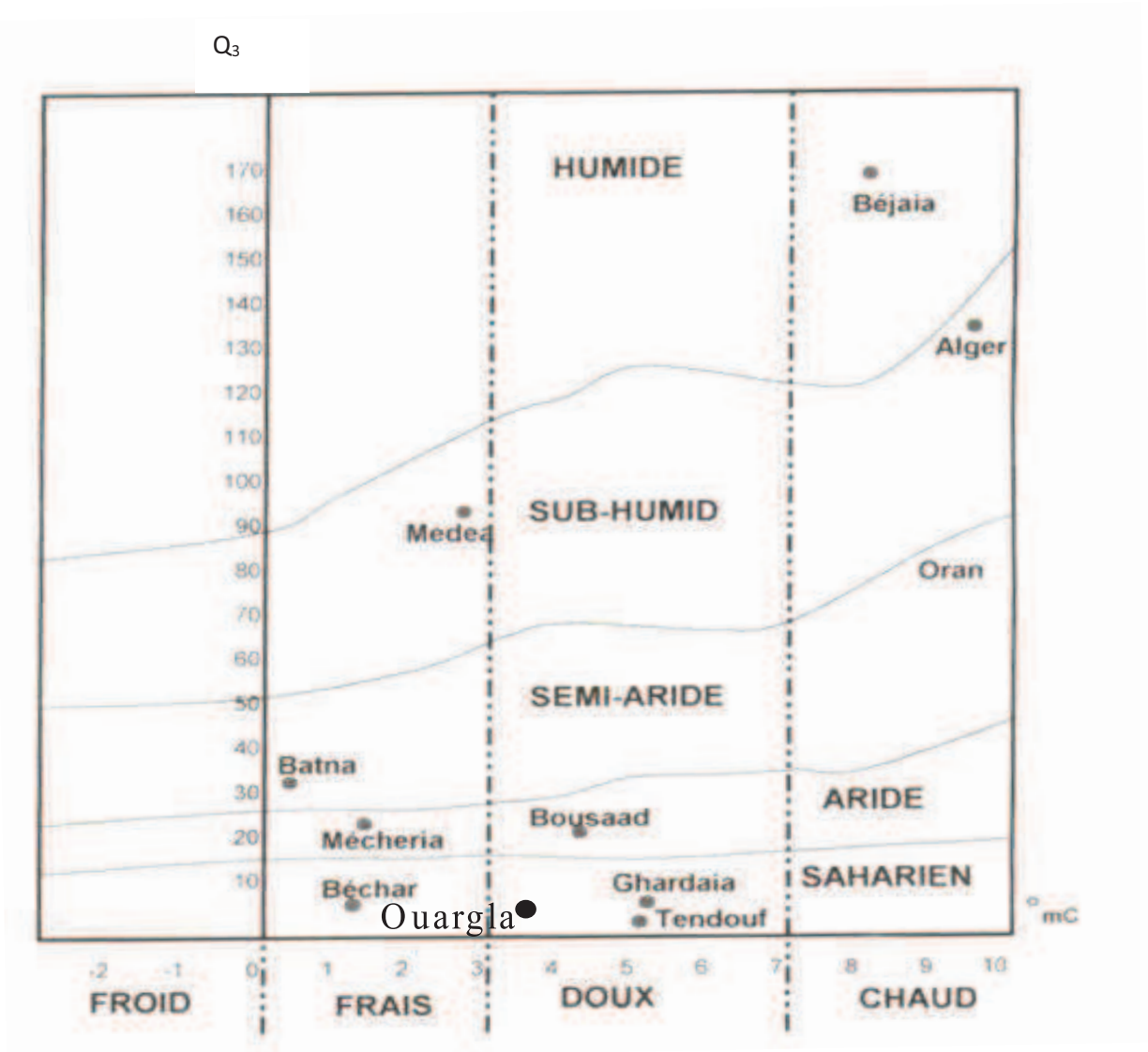


Figure 2-12. Climagramme d'Emberger pour la région de Ouargla

### 2.5. Conclusion partielle

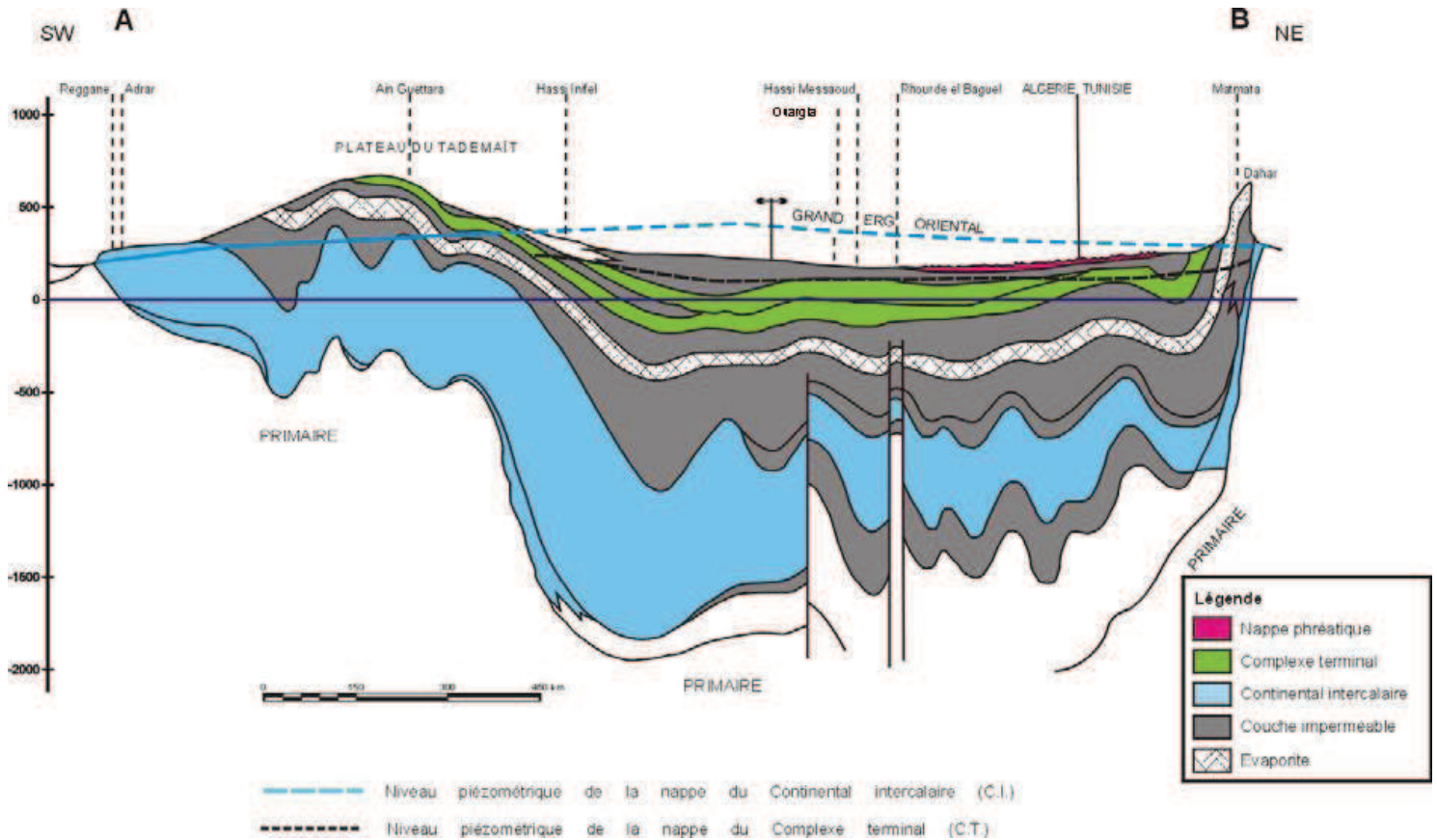
Le climat de la cuvette de Ouargla se caractérise par une faiblesse et une irrégularité des précipitations et par une très forte évapotranspiration due à la sécheresse et aux fortes températures de l'air. La période sèche s'étale sur toute l'année ce qui accentue la vulnérabilité des sols au risque de la salinisation.

### 2.6. Hydrogéologie de la région

La cuvette de Ouargla appartient au Bas-Sahara algérien. Il s'agit d'un immense bassin sédimentaire de 1000 km<sup>2</sup>, en forme de synclinal dissymétrique, particulièrement bien doté en couches perméables favorables à la circulation souterraine des eaux. Certaines de ces couches (Tableau 2-2), recouvertes de terrains imperméables, assurent l'existence de nappes captives alors que d'autres, situées au sommet des dépôts et sans couverture étanche, permettent la formation de nappes phréatiques (UNESCO, 1972) (Figure 2-7).

**Tableau 2-4. Chronolithostratigraphie de la zone d'étude (ANRH, 2004)**

Chronostratigraphie		Unités hydrogéologiques		Prof. (m)	Lithostratigraphie
Quaternaire		Nappe phréatique		20	Mio-Pliocène
Tertiaire		Nappe du Complexe Terminal	Nappe des sables	120	Eocène évaporitique
			Imperméable		
Secondaire	Crétacé		Nappes des calcaires (Sénono-Eocène)	520	Eocène carbonaté Sénonien carbonaté
			Imperméable	700	Sénonien lagunaire
			Nappe du Turonien		Turonien
			Imperméable	1100	Cénomaniens Vraconien
		Nappe du Continental Intercalaire	Nappe de l'Albien	2000	Albien Aptien Barrémien



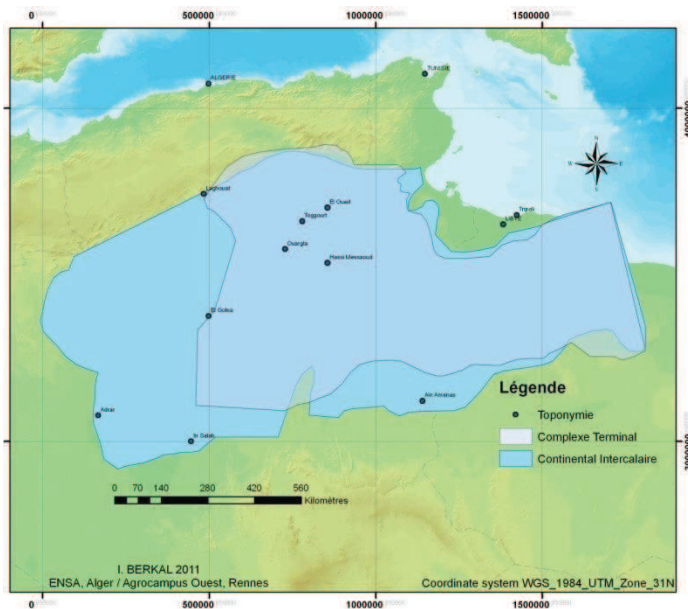
**Figure 2-13. Coupe hydrogéologique à travers le Sahara (UNESCO, 1972)**

Bénéficiant de cette structure, les eaux souterraines constituent plusieurs ensembles superposés :

- les nappes phréatiques des formations continentales superficielles,
- la nappe artésienne des calcaires marins du Sénonien et de l'Eocène et les nappes artésiennes du Continental Terminal sableux (Mio-Pliocène) regroupées avec la précédente sous le nom de Complexe Terminal (sub-surface),
- la puissante nappe artésienne du Continental Intercalaire gréseux (profonde) (Figure 2-7) (UNESCO, 1972; Dubost, 1992; O.N.A, 2004; Seguin, 2005; Gonçalves *et al.*, 2013).

Ces trois nappes ont fait l'objet de nombreuses études dont la première synthèse a été réalisée par UNESCO (1972).

Le bassin du Sahara septentrional (Figure 2-8) est bien doté en formations aquifères favorables à la circulation souterraine des eaux. Il comprend le grand Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS) qui désigne la superposition de deux principales couches aquifères profondes : le Complexe Terminal (CT) et le Continental Intercalaire (CI). Ce système transfrontalier recouvre une étendue de plus d'un million de km<sup>2</sup> partagée entre l'Algérie, la Tunisie et la Libye, dont l'accumulation ne peut être expliquée par le climat actuel. En effet, la recharge actuelle n'est que de 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>/an avec une durée de renouvellement plus longue de la nappe du Continental Intercalaire (Ould Babassy et Besbes, 2006; Besbes et Horriche, 2007; O.S.S, 2008; Nezli, 2009; O.S.S, 2010).



**Figure 2-14. Extension des formations du Système Aquifère du Sahara Septentrional**

### 2.6.1. La nappe phréatique superficielle

La nappe phréatique superficielle est épaisse de 1 à 8 m. Elle repose sur des argiles évaporitiques épaisses, imperméables et étanches qui occupent tout le fond de la vallée de Ouargla et l'isole des nappes artésiennes sous-jacentes (O.N.A, 2004).

La lithologie des formations constitutives de la nappe a été mise en évidence par des sondages réalisés par ENAGEO (1990). C'est ainsi qu'on distingue des sables fins à moyens argileux au sud de la ville et des sables riches en gypse vers la sebkha Safioune.

La nappe s'écoule librement des points hauts vers les points bas, perpendiculairement aux isopièzes et n'a aucune possibilité de remonter de la sebkha Safioune vers le chott de Ouargla ou la sebkha d'Oum Raneb. Sa frange capillaire surgit souvent à la surface du sol sous forme de chotts (Nezli, 2004).

L'alimentation de la nappe phréatique ne peut provenir que d'une cause anthropique. Le niveau de la nappe phréatique est réglé par un équilibre entre les entrées et les sorties. Les entrées sont principalement constituées par les eaux d'irrigation et l'eau destinée aux ménages (provenant des nappes artésiennes profondes), des rares crues des oueds M'zab et N'sa. Les sorties sont essentiellement dues à la transpiration de la végétation, à l'évaporation des eaux de la nappe remontant par capillarité (lorsque la nappe phréatique est peu profonde) et par l'écoulement vers les points bas constitués par le Chott et les sebkhas (Idder, 1998; O.N.A, 2004; Nezli, 2009; Nezli *et al.*, 2009).

Les chroniques rapportent que la nappe phréatique s'est déjà rapprochée à plusieurs reprises de la surface du sol. D'abord en 1881 quand les fossés entourant le Ksar ont été comblés pour lutter contre le paludisme. Par contre, lorsque le réseau de drainage a été rénové et prolongé (drains nouveaux et drains collecteurs) de 1949 à 1951, le niveau de la nappe phréatique a baissé de plus de 1 mètre (O.N.A, 2004).

La nappe phréatique se caractérise par une conductivité électrique très forte qui traduit une minéralisation excessive de ses eaux. Elle est influencée plus par les évaporites que par les carbonates, et plus par les chlorures que par les sulfates. Le faciès géochimique dominant est chloruré sodique (Nezli, 2009).

La conductivité électrique des eaux de cette nappe présente des variations spatiales et temporelles notables. Dans leur évaluation de la qualité des eaux des nappes du bas Sahara, Tabouche et Achour (2004) l'avaient mesurée entre 4 et 6 dS/m, Hamdi-Aïssa et Girard (2000) à 18 dS/m, alors que Nezli (2009) l'a trouvée autour de 15 dS/m avec des extrêmes qui peuvent atteindre les 100 dS/m. Elle est exceptionnellement à 800 dS/m dans les chotts (Nezli, 2009) et rejoint de ce fait le résultat de Daoud et Halitim (1994) pour la cuvette de Ouargla.



### 2.6.2. Les nappes du Complexe Terminal

Les formations du Complexe Terminal sont très hétérogènes (UNESCO, 1972; O.N.A, 2004; Ould Babassy et Besbes, 2006; Besbes et Horriche, 2007; Nezli, 2009). Cette nappe a été désignée sous le nom de Complexe Terminal car elle est contenue dans diverses couches perméables du Crétacé supérieur et du Tertiaire, essentiellement le Sénonien supérieur carbonaté, l'Eocène inférieure carbonaté et le Mio-Pliocène sableux. C'est un réservoir qui intègre également les formations carbonatées du Turonien.

La profondeur du Complexe Terminal est comprise entre 100 et 600 mètres et le débit exploité était de l'ordre 2 m<sup>3</sup>/s ou environ 62 million de m<sup>3</sup>/an en 2002 (O.N.A, 2004; Besbes et Horriche, 2007; O.S.S, 2008). Les salures sont de l'ordre de 3 à 7 g/l (3 à environ 12 dS/m) selon l'UNESCO (1972) alors que Nezli (2009) distingue une conductivité électrique mesurée en 2007 de l'ordre de 5 dS/m pour le Mio-Pliocène et 4 dS/m pour le Sénonien.

### 2.6.3. Le Continental Intercalaire

Ce système hydrologique souvent appelé « nappe albienne » est constituée de grès fins, gris, à ciment argileux, parfois dolomitiques, avec intercalation de marnes dolomitiques et argiles sableuses. A Ouargla, le Continental Intercalaire est exploité entre 1150 m et 1350 m de profondeur (UNESCO, 1972; Dubost, 1992; O.N.A, 2004; Besbes et Horriche, 2007; Nezli, 2009).

Selon Besbes et Horriche (2007), le débit total exploité (Algérie, Tunisie et Libye) atteint 30 m<sup>3</sup>/s, soit 950 millions de m<sup>3</sup>/an. Le niveau d'artésianisme a régressé dans les régions exploitées mais reste important dans le secteur central du bassin. La conductivité électrique des eaux de cette nappe est de 3,4 dS/m (Nezli, 2009).

### 2.7. Agriculture et élevage

Les régions sahariennes ont connues des mutations remarquables lors de ces deux dernières décennies. En effet, la superficie agricole est passée de 102 196 hectares en 1984 à 188 608 hectares en 2002 et le patrimoine phœnicicole est passé de 8 024 430 de palmiers en 1988 à 12 035 650 en 2001 (Chaouch, 2006). Selon Babahani (2011), le nombre de palmiers dattiers aurait atteint les 17 millions de pieds.

Dans la région de Ouargla, l'agriculture a toujours constitué un élément clé dans le développement. D'une part, elle constitue sur le plan économique une activité non négligeable pour les populations oasiennes et d'autre part, sur le plan écologique, la palmeraie représente un maillon important dans l'adoucissement d'un climat austère et remplit des fonctions écologiques et sociales indéniables (Bouammar, 2010).

Selon la direction des services agricoles de la wilaya de Ouargla (DSA, 2008), la superficie agricole avoisinerait les 28 000 ha. A l'instar des autres wilayas du Sud, c'est la culture du palmier dattier qui est prédominante dans la wilaya et dans la région de Ouargla avec respectivement 2290707 et 983702 palmiers (DPAT, 2006). La région de Ouargla, avec près d'un million de palmiers, serait classée troisième région agro-écologique derrière les Zibans et Oued Righ.

La palmeraie ou verger phœnicicole est un écosystème très particulier à trois strates. La strate arborescente et la plus importante est représentée par le palmier dattier *Phoenix dactilifera*. La strate arborée est composée d'arbres comme les figuiers, grenadier, citronnier, oranger, vigne, mûrier, abricotier, acacias, tamarix et d'arbustes comme le rosier. Enfin, la strate herbacée est constituée par les cultures maraîchères, fourragères, céréalières, condimentaires...etc. (Toutain, 1979). La palmeraie est une succession de jardins aussi différents les uns des autres du point de vue architecture, composition faunistique, floristique, âge, conduite, entretien, conditions microclimatiques...etc. et qui forment un ensemble assez vaste qui nous rappelle l'aspect d'une forêt (Bouammar, 2010).

Nous pouvons distinguer entre deux types de zones agricoles dans la vallée de Oued M'ya. Les Oasis anciennes (anciennes palmeraies) appelées aussi Ghaba (forêt) en raison de la fonction écologique qui leur est assignée et les zones de mise en valeur agricole nouvellement aménagées.

Les anciennes palmeraies sont localisées à El Ksar, M'khadma, Bamendil, Rouissat, Ain Baida, Chott, et N'Goussa. Les zones de mise en valeur agricole se situent quant à elle au niveau de Hassi ben Abdallah et N'Goussa principalement. C'est la structure même de la plantation qui détermine son rangement dans la catégorie d'exploitation ancienne ou moderne.

La structure de l'exploitation ancienne (ou Ksourienne) est caractérisée par une plantation très dense de palmiers. Elle est qualifiée même à tort de plantation anarchique (Figures 2-9-I). Néanmoins, elle répond à plusieurs fonctions : (i) une fonction écologique (lieu d'adoucissement du climat) ; (ii) une fonction sociale (lieu de repos et de villégiature, habitat) et (iii) d'une fonction économique où la production est destinée principalement à l'autoconsommation (Bouammar, 2010).



Dans les nouveaux périmètres, on parle souvent de ferme agricole dont la structure répond à une logique productiviste ou logique de marché. Sa taille doit permettre une rentabilité économique sinon elle n'a pas lieu d'être. La plantation est alignée (Figures 2-9-II) et conditionnée par des exigences d'ordre agronomique et technique. L'alignement des plantations confère souvent à l'exploitation son caractère moderne. C'est une nouvelle forme d'organisation caractérisée par une spécialisation parfois monoculturelle.

Ces nouveaux espaces agricoles peuvent être classés selon plusieurs critères, notamment la taille, la nature des produits ou les systèmes de culture.



**Figure 2-15. Exemples illustrant les différents types de palmeraies (I) anciennes : (a) Sidi Khouiled, (b) Bouameur, (c) Bamendil ; (II) modernes : (d) et (e) avec culture intercalaire (orge), (f) avec amendement sableux**

Nous soulignons la nuance entretenue dans l'exploitation oasisienne entre cultures sous-jacentes et cultures intercalaires. Par cultures sous-jacentes, nous sous-entendons les cultures sous palmier de même que pour les cultures intercalaires. Néanmoins, si le premier terme est utilisé lorsque la densité de palmiers est élevée et que les palmiers ne sont pas alignés (Figures 2-9-I-a, b), le deuxième exprime un alignement, c'est-à-dire des rangées de palmiers intercalées généralement par des cultures sous forme de planches (Figures 2-9-II-d, e).

La phœniciculture est le système de culture dominant avec 62,7 % des superficies agricoles en 2002. Ce taux sera sans doute appelé à augmenter du fait de la priorité que lui accordent les différents programmes de développement agricoles et de par la reconversion progressive constatée de certains systèmes de cultures (céréalières et maraîchers) vers le système phœnicicole.

Les cultures fourragères, essentiellement représentées par la luzerne et l'orge en vert, occupent des superficies très réduites et sont généralement destinées à la satisfaction des besoins du cheptel de la petite exploitation familiale.

La céréaliculture qui est pratiquée pendant plus d'une décennie dans la zone a pratiquement disparue. En effet, sur les 11 exploitations que comptait Ouargla, il ne reste que deux exploitations qui cultivent des fourrages.

L'arboriculture fruitière est représentée par des espèces rustiques locales bien adaptées aux conditions sahariennes mais son rendement reste néanmoins faible. Les principales espèces cultivées sont le grenadier, le figuier, l'abricotier et la vigne. La production est destinée essentiellement à l'autoconsommation. Actuellement, des tentatives d'introduction et d'extension de l'olivier sont en cours.

Les produits maraîchers ont connus un essor important mais restent encore insuffisants pour satisfaire la demande locale.

Parmi les cultures sous serres, c'est surtout les cucurbitacées telles que les melons, pastèques, concombres et les courgettes qui sont avantagées. Il est à noter aussi l'introduction et la relative expansion de la culture de la pomme de terre dans la zone et qui, auparavant, se limitait à la région du Souf.

L'élevage dans la région est constitué essentiellement de caprins (57182 têtes), d'ovins (45037) et de Camelins (12548) (DPAT, 2006). Il y a actuellement une tentative d'intégrer la pisciculture à l'activité agricole.

## 2.8. Exploitation des ressources hydriques

Au Sahara septentrional et à Ouargla en particulier, toutes les eaux destinées à l'alimentation en eau potable, l'irrigation et à l'industrie proviennent des eaux souterraines. Cependant, la qualité de ces eaux (salinité) dans certaines régions est le plus souvent médiocre. Cette salinité, dont une partie est d'origine géologique (primaire) s'accroît continuellement par une mauvaise gestion de la ressource en eau et en sols et aboutie le plus souvent à une salinisation secondaire.

En effet, la qualité des eaux dans les différentes régions sahariennes et notamment, celles situées au centre et au nord (Ouargla, El Oued, Biskra) est mauvaise et sa salinité peut dépasser les 10 dS/m (ABHS, 2006).

L'irrigation est une pratique obligatoire pour le développement de l'agriculture saharienne. Cependant, l'utilisation abusive de la ressource eau dans la cuvette de Ouargla engendre un problème majeur en aval. Il est caractérisé par un déséquilibre entre le volume d'eau apporté et celui évacué (Idder, 2007).

Historiquement, l'exploitation de la nappe du Mio-Pliocène est extrêmement ancienne. C'est cette nappe qui a permis la création des palmeraies irriguées à Ouargla et dans l'Oued Righ (Rouvillos-Brigol, 1975). En outre, les forages ont commencé à atteindre la nappe calcaire du Sénonien qu'entre 1953 et 1954, alors que le premier forage jusqu'à l'Albien à Ouargla n'a vu le jour qu'au milieu de 1957 (Rouvillos-Brigol, 1975).

Les débits pompés sont considérables. Ils sont de l'ordre de 20 à 40 l/s pour un forage au Complexe Terminal et de 100 à 200 l/s pour un forage au Continental Intercalaire. Dans le bas Sahara, on estime que le volume pompé aujourd'hui est environ 3 fois plus grand que le volume des prélèvements traditionnelles (Côte, 1998).

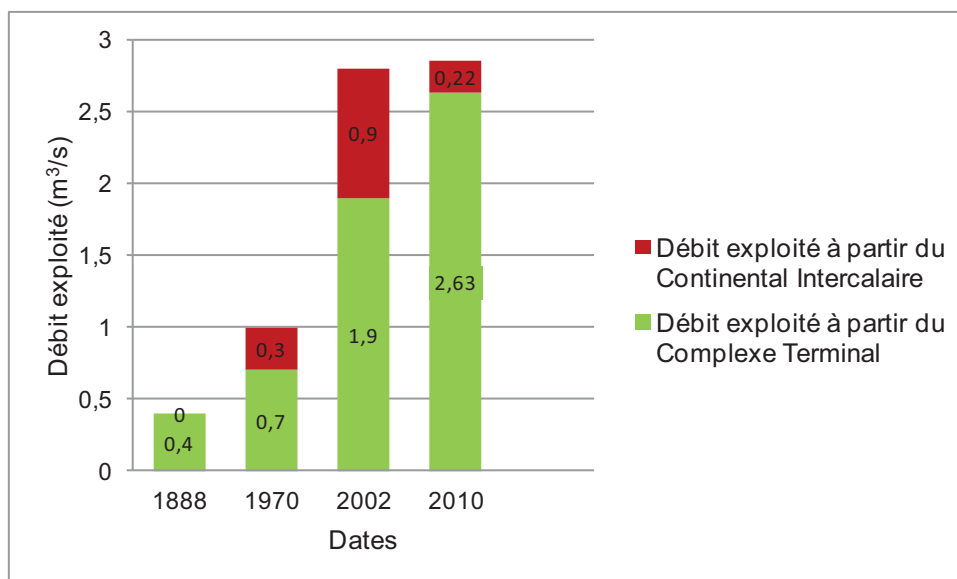
En 1888, le débit total dont disposait la région de Ouargla était de l'ordre de 0,4 m<sup>3</sup>/s (Bel, 1969). La multiplication importante des forages a permis une augmentation très sensible des débits exploités qui ont atteint 0,7 m<sup>3</sup>/s en 1970 pour les deux nappes du Complexe Terminal. À cette même époque, on dénombrait, dans la cuvette, une centaine de forages opérationnels dans la nappe des calcaires et 4 dans la seconde (Rouvillos-Brigol, 1975).

Les effluents urbains de la ville de Ouargla augmentent régulièrement. Les apports dus à l'irrigation et à la distribution urbaine ont été estimés en 1969 par Lelièvre cité par Rouvillois-Brigol (1975) à 850 l/s. En 2002, le nombre de forages exploités est passé à 154 pour la nappe du Mio-Pliocène et à 31 pour la nappe du Sénonien et le débit total prélevé dans ces deux aquifères a atteint près de 1,9 m<sup>3</sup>/s (O.N.A, 2004).

Le dernier inventaire effectué par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques de Ouargla fait état de 186 forages pour la nappe du Mio-Pliocène et 46 pour la nappe du Sénonien pour un débit total d'exploitation cumulé de 2,63 m<sup>3</sup>/s (Idder *et al.*, 2011).

Pour la nappe du Continental Intercalaire, on comptait, à Ouargla en 1970, 2 forages qui fournissaient un débit de 0,3 m<sup>3</sup>/s (Rouvillois-Brigol, 1975). En 2002, le nombre de forage est passé à 3 fournissant un débit total de 0,9 m<sup>3</sup>/s. En 2010, le débit exploité à partir de cette nappe a connu une certaine régression (0,22 m<sup>3</sup>/s) pour retrouver à peu près son niveau de 1970. Cette régression est due à la suppression de l'un des trois forages (décision prise compte tenu des problèmes engendrés par les eaux de cet aquifère).

La figure 2-10 récapitule clairement l'historique des débits exploités à partir du Complexe Terminal et du Continental Intercalaire pour les périodes citées précédemment.



**Figure 2-16. Evolution des débits exploités à partir des nappes du Complexe Terminal et du Continental Intercalaire**

Les estimations de [Idder \*et al.\* \(2011\)](#) relatives aux volumes d'eau drainée ou excédentaire, basés sur une balance volume d'irrigation – ETP, révèlent que sur l'ensemble des palmeraies irriguées dans la cuvette de Ouargla, ce volume a été estimé à près de 14 millions de m<sup>3</sup> par an qui vont rejoindre chaque année la nappe superficielle. A titre comparatif, la quantité moyenne des eaux excédentaires, évaluée en 1964 selon le même procédé, n'était que de l'ordre de 5,5 millions de m<sup>3</sup> par an (SCET, 1965, in [Idder \*et al.\* 2011](#)).

Selon les services agricoles de Ouargla ([DSA, 2008](#)), les excédents agricoles trouvent en grande partie leur origine dans le fait que les débits utilisés pour l'arrosage (0,4 à 1 l/s/ha selon les secteurs) sont sensiblement les mêmes quelle que soit la période de l'année, alors que les besoins sont très variables d'une saison à l'autre.

Pour presque les mêmes raisons, plusieurs régions du Bas Sahara connaissent le problème de la montée de la nappe superficielle constituant de véritables lacs. Cette situation qui menace à la fois l'environnement et le potentiel productif, voir même les agglomérations, touche de grands espaces de la cuvette de Ouargla et, plus au nord, la vallée de l'oued Righ et les ghouts<sup>3</sup> du Souf ([ABHS, 2006](#)).

Les travaux de réhabilitation du réseau d'assainissement et de collectes des eaux usées pour remédier au problème de la remontée des eaux dans la cuvette de Ouargla touche à sa fin. Ces travaux concernent principalement la réalisation de 21 stations de pompage et de relevage, 97 Km de collecteurs d'assainissement, 10 stations de relevage des eaux de drainage, 37 Km de réseau de drainage, 03 stations d'épuration et un canal de transfert des eaux sur une distance de 41 Km vers l'exutoire (sebkha Sefioune) ([O.N.A, 2004](#)).

En conclusion, les fluctuations du niveau de la nappe phréatique sont étroitement liées à l'histoire des palmeraies, à l'exploitation des ressources en eau artésienne et aux efforts d'assainissement consentis pour lutter contre les nuisances qui en résultent.

---

<sup>3</sup> Gout : fond de vastes cratères, permettant aux arbres de puiser directement par leurs racines l'eau de la nappe phréatique proche.

## 2.9. Estimation du bilan d'eau

Le bilan d'eau (O.N.A, 2004) pour la cuvette de Ouargla est synthétisé par le tableau 2-3.

### Tableau 2-5. Bilan d'eau de la zone de Ouargla

AEP : Alimentation Eau Potable ; EVT : Eaux évapo-Transpirées

<b>Entrées</b>	<b>M<sup>3</sup>/j</b>	<b>M<sup>3</sup>/j</b>
Précipitations	730	
Forages AEP	49309	
Agriculture	102810	
<b>Sorties</b>		
EVT humain		3960
EVT palmeraie		93945
EVT végétation ville		6772
Eau libre		12849
Sebkha		8314
Pompage vers Oum Raneb		26470
Ecoulement		539
<b>Totaux</b>	<b>152849</b>	<b>152849</b>

## 2.10. Conclusion partielle

Les oasis de Ouargla sont alimentées par des eaux provenant des nappes souterraines héritées des derniers épisodes pluvieux du Quaternaire, du Mio-Pliocène, de l'Eocène et du Sénonien carbonatés et de l'Albien. Cependant, les stratégies inadaptées des pratiques d'irrigations et la mauvaise qualité des eaux conjuguées à un climat très évaporant ont engendré une salinisation des sols de ces écosystèmes.



**Dynamique spatiotemporelle de la salinité de sols sableux irrigués en milieu aride**

**Application à une palmeraie de la cuvette de Ouargla en Algérie**

## **CHAPITRE 3. PROTOCOLE EXPERIMENTAL ET METHODES D'ETUDE DES SOLS**

*"Tout le monde savait que c'était impossible à faire; Puis un jour est venu un homme qui ne le savait pas. Et il l'a fait"*

Winston Churchill

### 3.1. Introduction

Ce chapitre a pour objectif de présenter le site expérimental caractérisé par une oasis de la cuvette de Ouargla et la méthodologie adoptée pour la cartographie de la salinité par induction électromagnétique. Les détails des deux méthodes de prédiction de la salinité utilisées lors de cette étude seront également présentés.

### 3.2. Le site expérimental

Cette recherche a été réalisée dans une palmeraie située au sein de l'exploitation expérimentale de l'université de Ouargla.

#### 3.2.1. Historique de l'exploitation

L'exploitation a été créée en 1959 par le service français pour la mise en valeur, sous l'appellation de périmètre de "GARET-CHEMIA". Au début des années 1970, le périmètre est transformé en groupe de mise en valeur (G.M.V). Il était alors constitué de coopératives attribuées en lots de 0,72 ha comportant 88 palmiers chacun. En 1979, l'exploitation a été confiée à l'Institut de Technologie de l'Agronomie Saharienne (ITAS) qui a intégré plus tard l'université Kasdi Merbah de Ouargla.

L'exploitation de l'université est située au sud-ouest de Ouargla, à six kilomètres environ du centre ville (Figure 3-1). Ses coordonnées WGS 84 / U.T.M zone 31 N, sont à une longitude de 819,82 km et 3547,22 km de l'altitude.

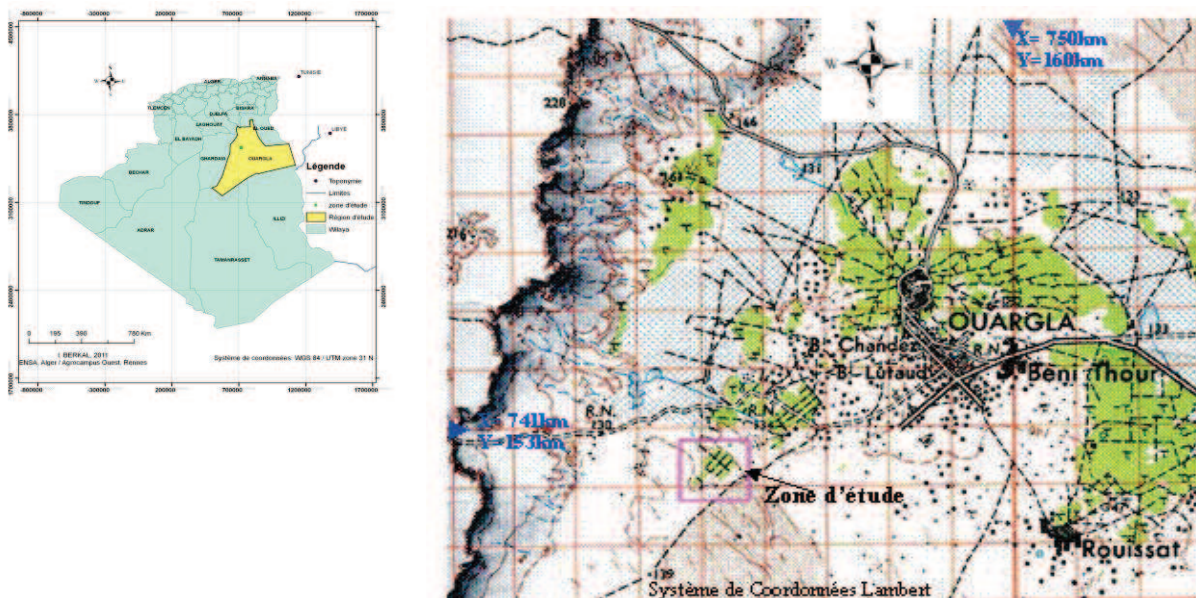


Figure 3-17. Situation géographique de l'exploitation de l'université

L'exploitation s'étend sur une superficie de 32 hectares dont 14 hectares sont aménagés et répartis sur quatre parcelles notées A, B, C et D (Figure 3-2). Chaque parcelle s'étale sur une superficie de 3,6 hectares cultivée principalement avec du palmier dattier (*Phoenix dactylifera*) planté en carré de 9 m × 9 m (Figure 3-3). Le nombre théorique de palmiers est de 1145 mais le nombre réel n'est que de 1095. La composition variétale de cette exploitation phœnicicole est constituée de déglet noir, ghars, déгла béida, variétés communes et des dokkars (mâles), ainsi que des djebbars (pieds jeunes).

Une parcelle d'environ un hectare mitoyenne à la parcelle A est cependant dédiée à la plasticulture (tomate- piment- laitue) et à l'aquaculture (Photo 3-1). On y trouve également les cultures fourragères sous les palmiers dattiers mais elles ne sont pratiquées qu'à des fins expérimentales. Le reste de l'exploitation est réservé aux pistes et aux drains qui entourent les parcelles. Des extensions de l'exploitation situées à l'ouest et au nord, correspondant aux secteurs E, F et G sont pratiquement inexploitées (Figure 3-2).



**Photo 3-1. Parcelle réservée à la plasticulture et l'aquaculture**

Le réseau d'irrigation par planche est alimenté par les eaux de deux forages, l'un puisant dans la nappe du Sénonien et l'autre dans celle du Mio-Pliocène (Photos 3-2a, b, c, d) (cf. § 2.6.2). En outre, ces planches sont le lieu de cultures fourragères (orge principalement) (Photo 3-2d). La fertilisation est pratiquée avec des fumiers de caprins et destinée prioritairement aux cultures intercalaires.



**Photo 3-2. Planches d'irrigations : (a), (b), (c) sans aucune culture ; (d) avec culture intercalaire**

Les quantités d'eau qui alimentent les parcelles ont été estimées par la méthode "volumétrique" (ou jaugeage capacitif) permettant de déterminer le débit directement à partir du temps nécessaire pour remplir d'eau un récipient d'une contenance déterminée (Tableau 3-1). Selon nos estimations, le temps d'irrigation dans chaque parcelle est d'environ 5 heures par jour une fois par semaine (Tableau 3-2). On peut donc calculer les volumes d'eau apportés aux parcelles considérées (Tableau 3-1).

Ces quantités doublent quand la fréquence d'irrigation passe d'une à deux journées par semaine pendant l'été, saison durant laquelle les exigences des cultures sont les plus grandes.



**Tableau 3-6. Quantités d'eau apportées aux parcelles**

Parcelles	Débit (l/s)	Quantités d'eau apportées (litres)
A2	1,7	30600
C2	2	36000
B1	3,2	57600
D1	3	54000
<b>Total</b>	<b>9,9</b>	<b>178200</b>

Les palmes issues de l'élagage des organes en voie de dessiccation du palmier, effectué généralement juste après la récolte, sont transportées loin de la palmeraie ou incinérées localement.

La pollinisation du palmier se fait par le vent (anémophilie). Cependant, le nombre réduit de palmiers mâles oblige à pratiquer aussi une pollinisation artificielle (Peyron, 2000; Si Bennasseur, 2005). Cependant, le manque en grimpeurs de palmiers limite ce type de pollinisation et donc l'introduction des épillets de pollen. Il en est de même pour les traitements phytosanitaires, la coupe des palmes sèches et l'arrachage du "lif" et des restes des hampes florales.

La récolte des dattes est réalisée d'octobre à novembre. Le rendement global, toutes variétés confondues, a atteint environ 28 qx/ha (Zenkheri, pers. Com.). Elle est généralement de qualité moyenne.

Le réseau de drainage est constitué de drains à ciel ouvert qui débouchent sur un collecteur principal. Tous les drains sont plus ou moins ensablés. Ils sont peu fonctionnels et la végétation hydrophile y est très développée (cf. Photo 3-3). Le dernier curage des drains a été réalisé lors de notre troisième campagne de mesures (mars 2010). Il a concerné les parcelles B1, B2-1, D1 et D2-1, alors que celui de A2 a été réalisé quelque temps avant la campagne 2 (octobre 2009). Toutefois, ce curage ne concerne pas les 4 drains qui entourent les parcelles citées plus haut, mais simplement 1 drain et parfois deux drains par parcelle. Cette opération n'a aucune périodicité, mais coïncide seulement avec l'opération de revivification des parcelles abandonnées. Ces drains ont l'avantage de maintenir la nappe phréatique en dessous de la profondeur critique pour le palmier.



**Photo 3-3. Exemples illustrant l'état du réseau de drainage**

L'ouverture de nouveaux drains secondaires et d'un deuxième collecteur (1980) a donné naissance à la subdivision actuelle des parcelles (Figure 3-2).

Les brises vent sont constitués d'une double rangée d'eucalyptus et de casuarina située au sud de B2-1 et D2-1 et à l'Est de la parcelle A2. L'absence d'une protection au sud et à l'ouest de l'exploitation cause des problèmes d'ensablement pour les parcelles découvertes.

### **3.2.2. La zone d'étude**

La zone d'étude (Figure 3-2), d'une superficie approximative de 10 ha, présente les caractéristiques suivantes :

- elle se présente sous la forme d'un glacis d'une grande homogénéité topographique intra-parcellaire. Le sol est développé dans des matériaux parentaux récents (alluvions anciennes et dépôts éoliens du Quaternaire) (§ 2.3.1) à dominance de texture sableuse.
- elle se trouve localement dans une zone peu élevée (environ 135 m) à environ 1,8 km d'un chott situé au Nord-ouest. La dénivelée topographique entre le chott et l'exploitation est d'environ 2 m avec quelques contre-pentes.
- elle est constituée d'une zone de palmeraie (A2, B1, B2-1, B2-2, C2, D1 et D2-1) et d'une zone de sol nu adjacente (E2 et F)
- la palmeraie présente un gradient de dégradation: (i) palmeraie saine (A2, C2, B1 et D1); (ii) palmeraie modérément dégradée (B2-1 et D2-1) et (iii) palmeraie très dégradée (B2-2). Cette dégradation se manifeste par la taille du palmier dattier et de son rendement quantitatif et qualitatif.

Les parcelles A1 et C1 sont exclues de cette étude à cause de leur conduite agricole différente due aux travaux pratiques des étudiants de l'université. La parcelle D2-2 est, quant à elle, une extension récente du nouveau pôle de l'université de Ouargla et n'a pu donc être considérée dans le cadre de la présente étude.





Figure 3-18. Délimitation du site expérimental (image Google Earth, 2001)



Figure 3-19. Agencement des palmiers

Le choix de la zone d'étude s'est porté sur cette palmeraie qui présente plusieurs avantages :

- une homogénéité texturale des sols caractérisée par une prédominance des sables (> 50 %) et une teneur en argile faible (< 10 %),
- la possibilité de comparer une zone de palmeraie actuellement exploitée et irriguée à une zone en sol nu, immédiatement adjacente à la palmeraie et présentant des conditions pédologiques à priori analogues,
- une instrumentation facile du dispositif expérimental
- la possibilité de pouvoir utiliser les données hydrogéologiques et pédologiques préexistantes sur cette zone d'étude.

### **3.3. Méthode d'étude et de suivi de la salinité**

Le protocole comporte principalement 3 volets :

- a. Une caractérisation de l'état initial de la salinité au sein de la zone d'étude par l'utilisation conjointe de méthodes géophysiques et de mesures ponctuelles de la conductivité électrique, dont la localisation sera guidée par la cartographie géophysique. La technique géophysique retenue est la mesure de la conductivité apparente des sols par l'induction électromagnétique (EM 38).
- b. Un suivi saisonnier de la salinité à l'échelle de la palmeraie par un suivi géophysique contrôlé par des mesures ponctuelles et associé à un suivi des déterminants potentiels de la salinité (hauteur de nappe, apports d'eau d'irrigation)
- c. Une modélisation de l'évolution de la salinité à l'échelle de la palmeraie en tenant compte de l'état initial observé et de l'évolution au cours de la période d'étude, des conditions climatiques, des niveaux de la nappe, des apports d'eau par irrigation et de l'évapotranspiration (ETP).

En cas de succès de la modélisation, celle-ci pourra servir en fin de thèse à des simulations sur des approches optimales d'irrigation limitant les risques de salinisation des sols.

L'ensemble des données acquises sera intégré dans un Système d'Information Géographique (SIG) qui permettra d'organiser et de croiser les données, mais aussi d'alimenter en entrée la modélisation.

### 3.3.1. Caractérisation de l'état initial de la salinité de la palmeraie

La salinité pouvant varier à faibles distances, il n'apparaît pas judicieux de cartographier celle-ci à partir de prélèvements ponctuels pour mesurer la conductivité électrique, sans connaissance préalable de la structure spatiale de la salinité. La démarche proposée s'inspire de travaux récents (Lesch *et al.*, 1998; Corwin et Lesch, 2003; Amezketa, 2007b; Ghazouani, 2009) qui mettent en place une reconnaissance préalable de la salinité par des méthodes géophysiques et ce avant de caractériser plus finement la variabilité spatiale par des mesures analytiques. Elle comporte de ce fait deux étapes : l'analyse géophysique exhaustive de la zone d'étude et la calibration des mesures de résistivité.

#### 3.3.1.1. Analyse géophysique exhaustive de la zone d'étude

Il s'agit d'une mesure de la conductivité électromagnétique selon un plan d'échantillonnage systématique, caractérisé par l'échantillonnage du centre d'un inter-rang de palmiers sur 2 tous les 20 mètres (Figure 3-4).

Cette première caractérisation qui a été effectuée en mars 2009 a permis de réaliser 500 mesures ponctuelles en position verticale (ECaV) et 500 mesures en position horizontale (ECaH) de l'EM 38.

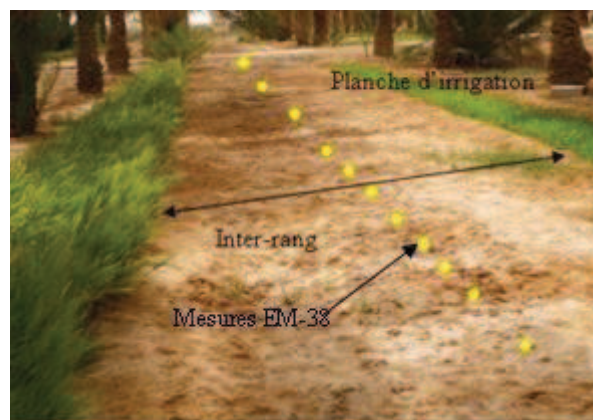
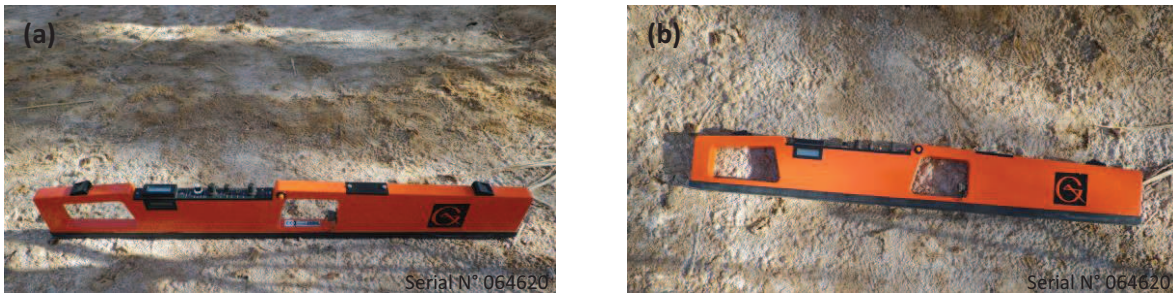


Figure 3-20. Stratégie de mesures électromagnétiques

Le Geonics EM 38 posé directement sur le sol permet la mesure de la conductivité apparente du sol en milliSiemens/mètre (mS/m) jusqu'à 150 cm de profondeur en mode dipôle vertical (ECaV) et 75 cm de profondeur en mode horizontal dipôle (ECaH) (Photo 3-4). Les mesures ont été effectuées quelques jours après l'irrigation, *i.e.*, lorsque la teneur en eau du sol était proche de la capacité au champ.



**Photo 3-4. Le Geonics EM-38 MK2 : (a) mode vertical, (b) mode horizontal**

Les données de conductivité électromagnétique acquises ont fait l'objet d'un traitement géostatistique (calcul de variogramme) pour déterminer les distances de corrélation de la propriété et évaluer si une cartographie des tendances générales peut être obtenue avec une telle densité d'échantillonnage ou s'il faut l'accroître. In fine, on obtiendra une carte géostatistique des tendances générales de variation de la conductivité électrique apparente à l'échelle de la zone d'étude.

### **3.3.1.2. Calibration des mesures de résistivité**

L'objectif ici est de vérifier que les mesures de la conductivité électromagnétique sont bien corrélées à des variations de la salinité et que l'effet d'autres paramètres (teneurs en eau, variations texturales) peut être soit corrigé ou négligé. Parmi les 500 points précédemment étudiés, nous en avons retenu 30 selon une approche aléatoire stratifiée en fonction des niveaux de la conductivité. Pour chaque point retenu, nous avons effectué des mesures de la conductivité électrique des extraits dilués au 1/5ème ( $EC_{1:5}$ ) et de l'humidité pondérale à trois niveaux de profondeur, 0-10 cm, 10-25 cm et 25-50 cm. Toutes les mesures ont été géoréférencées à l'aide d'un récepteur GPS Garmin 72.

Le traitement des données est fait sur la base de l'étude des corrélations entre les  $EC_{1:5}$  mesurées aux trois niveaux de profondeur, l'humidité pondérale et la conductivité électrique apparente ( $E_{Ca}$ ). Une carte d'estimation de la conductivité électrique à l'échelle de la zone d'étude sera alors établie.

### **3.3.2. Suivi de la dynamique saisonnière de la salinité et de ses déterminants**

A partir des résultats de l'analyse de la structure spatiale de la salinité de mars 2009 (§ 3.3.1), nous avons opté pour un maillage systématique plus serré de 10 m pour mieux appréhender la variabilité spatiale et temporelle. Ce suivi a été étalé sur trois campagnes de mesures (octobre 2009, mars 2010 et novembre 2010) choisies pour correspondre à priori à des périodes de fluctuations bien marquées de la nappe superficielle qui est haute en mars et basse en octobre (O.N.A, 2004). De ce fait, les mesures effectuées permettent de couvrir un cycle hydrologique complet. Ainsi, nous avons réalisé 900, 898 et 655 mesures (Figures 2, 3, 4 et 5 - annexe I)

correspondant respectivement aux trois dates retenues. La réduction du nombre de mesures lors de la campagne 4 (novembre 2010) s'explique par l'abandon du secteur B2-2 suite à des travaux d'aménagements dans la palmeraie. A chaque date, des mesures géophysiques ont été couplées à 30 mesures ponctuelles de conductivité électrique permettant ainsi de contrôler la calibration (Figures 2, 3, 4 et 5 - annexe I; Tableau 3-2).

Parallèlement à cela, nous avons réalisé un suivi hebdomadaire du niveau de la nappe par l'intermédiaire de sept piézomètres répartis sur la zone d'étude (Figure 3-6 ; Tableau 3-2). La salinité de l'eau de cette nappe a été mesurée en mars 2010 pour les piézomètres C2 et E2 et en décembre 2010 pour le reste des piézomètres. D'autres informations complémentaires, à l'instar de l'estimation des quantités d'eau apportées par irrigation, ont été nécessaires pour envisager une modélisation.

### **3.4. Analyse des données**

Les méthodes d'analyse de données ont pour but de rechercher les individus pour lesquels la variance est maximale.

#### **3.4.1. Correction de température**

Les lois de correction de l'effet température sur la conductivité électrique de la solution du sol ou du sol lui-même ont très tôt été recherchées. Avant de procéder à l'analyse statistique des résultats, nous avons effectué des corrections en rapportant toutes les données à la température standard de 25 °C (Keller et Frischknecht, 1966; Michot, 2003; Besson, 2007; Amezketa, 2007a) par la relation :

$$\sigma_T = \sigma_{25^\circ\text{C}} [1 + \alpha (T - 25^\circ\text{C})]$$

où  $\sigma_T$  est la conductivité apparente à la température T,  $\sigma_{25^\circ\text{C}}$  est la conductivité apparente à la température de référence de 25 °C et  $\alpha$  le coefficient de température qui est égale à 0,02.

#### **3.4.2. Les statistiques descriptives**

L'analyse descriptive de tendance centrale (moyenne, médiane et mode) et de dispersion (étendue, écart-type variance et coefficient de variation) des variables étudiées est nécessaire à la connaissance de la structure des paramètres du sol. Ces statistiques ont été réalisées en utilisant le tableur Excel et le logiciel Statistica dans sa version 7.1.



### 3.4.3. Les analyses graphiques

Les représentations graphiques (Histogrammes) permettent d'identifier la distribution de la variable étudiée. Combinée à l'analyse des paramètres précédemment décrits, cette approche permet de mieux comprendre le « comportement » de la variable. Dans le cas où les variables analysées ne suivent pas une loi normale, il est impératif de les transformer en d'autres formes à l'instar du logarithme népérien (ln).

### 3.4.4. L'approche statistique de prédiction

C'est une approche qui permet de décrire les corrélations spatiales des propriétés des sols et de prédire, avec une précision connue, la valeur en des sites non reconnus (Walter, 2002).

Dans cette étape de prédiction de la salinité, nous avons utilisé le programme Cubist version 2.04 conçu à l'ACPA relevant de l'université de Sydney en Australie (Rulequest Research, 2007). Cette approche statistique est fondée sur la construction d'arbres de décision. Elle est connue dans le traitement de données manquantes, et elle est capable de tenir compte des relations non linéaires entre les variables.

Cubist est caractérisé par sa capacité à analyser des bases de données importantes. Il construit des arbres de régressions où la prédiction contient des modèles linéaires de régression plutôt que des valeurs discrètes. Ce programme crée un ensemble de règles compréhensibles, où chaque règle est associée à un modèle linéaire multivarié (Minasny et McBratney, 2008; Minasny *et al.*, 2009; Miklos *et al.*, 2010).

Les modèles Cubist donnent généralement de meilleurs résultats que ceux produits par des techniques simples comme la régression linéaire multivariées, tout en étant facile à comprendre (Rulequest Research, 2007). Dans cet ordre d'idées, nous avons construit des modèles pour la zone d'étude et des modèles généraux applicables sur d'autres parcelles tout en intégrant d'autres variables susceptibles d'avoir un effet dans les prédictions de la EC<sub>1:5</sub>.

### 3.4.5. L'approche déterministe de prédiction

C'est une approche qui prend en compte les propriétés du sol qui influenceraient la conductivité électrique du sol, telles que la texture et la teneur en eau du sol (Rhoades *et al.*, 1989; Rhoades *et al.*, 1999; Corwin et Lesch, 2003). C'est une autre méthode aux fonctions pré-spécifiées de prédiction pour la détermination de la salinité à plusieurs niveaux de profondeur. C'est une méthode dite déterministe développée par l'USDA au Salinity Laboratory de Riverside en Californie avec ESAP software Version 2.35R (Lesch *et al.*, 2000; Corwin et Lesch, 2003; Amezketta, 2007b). Elle est basée sur la fonction log linéaire de Rhoades (1992) tel que  $\ln(ECa) = B_0 + B_1 \ln EM_H + B_3 (\ln EM_H - \ln EM_V)$ , avec  $B_0$ ,  $B_1$  et  $B_3$  comme coefficients empiriques. Cette fonction permet d'aboutir à la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée en mS/m ou en dS/m à trois profondeurs prédéfinies



dans ce programme (0–30, 30–60 et 60–90). En outre, elle permet d'intégrer certains paramètres du sol, en l'occurrence le taux d'argile, la densité apparente et la teneur en eau. Durant ces traitements, le taux moyen d'argile a été fixé à 2 % et la densité apparente à  $1,31 \text{ g/cm}^3$ . En tenant compte de l'état de l'humidité des parcelles lors des mesures à l'EM 38, nous avons fixé la teneur en eau à 100 % de la capacité au champ pour les parcelles C2, A2, B1, et D1, à 75 % pour la parcelle B2-1 et 50 % pour B2-2, D2-1, E2 et F.

### 3.5. Création d'une base de données géoréférencées

Il s'agit de créer une base de données numérique qui sert à stocker et à gérer des données géoréférencées de natures diverses. Compte tenu des relations spatiales entre ces données, il sera alors possible de croiser et de traiter ces données (Brabant, 1993; Legros, 1996).

En raison de l'importance des données issues des différentes campagnes de mesures, de la description morphologique et analytique des fosses pédologiques, des suivis hebdomadaires du niveau piézométrique de la nappe phréatique et des analyses chimiques de ses eaux ainsi et de celles des eaux d'irrigation, la création d'une base de données s'avère donc fondamentale pour gérer et organiser ce flux d'informations. Pour ce faire, nous avons utilisé Arc GIS version 9.3, version française. Cette démarche, combinée aux traitements géostatistiques, permettra de produire une information nouvelle et pertinente apportant un nouvel éclairage sur le sujet traité. En outre, elle permettra d'alimenter en entrée la modélisation (§ 3.3-c).

La symbologie graduée de Arc GIS permet le croisement des cartes et par là une comparaison des prédictions de la salinité aux quatre dates de campagnes. En effet, chaque gamme de salinité de l'extrait 1/5 (Durand, 1983) à qui nous avons rajouté trois classes pour mieux différencier les fortes salinités ( $EC \geq 4 \text{ dS/m}$ ), a été représentée par une taille et une couleur de symbole gradué. In fine, on obtiendra douze cartes de salinité prédite, *i.e.* une carte pour chaque campagne (mars et octobre 2009 ; mars et novembre 2010) sur trois profondeurs (0-10 ; 10-25 et 25-50 cm).

Un organigramme résumant le processus et les méthodes employées en entreprenant cette étude est présentée dans la figure 3-5. Le tableau 3-2, quant à lui, représente les dates des différentes étapes d'investigations.

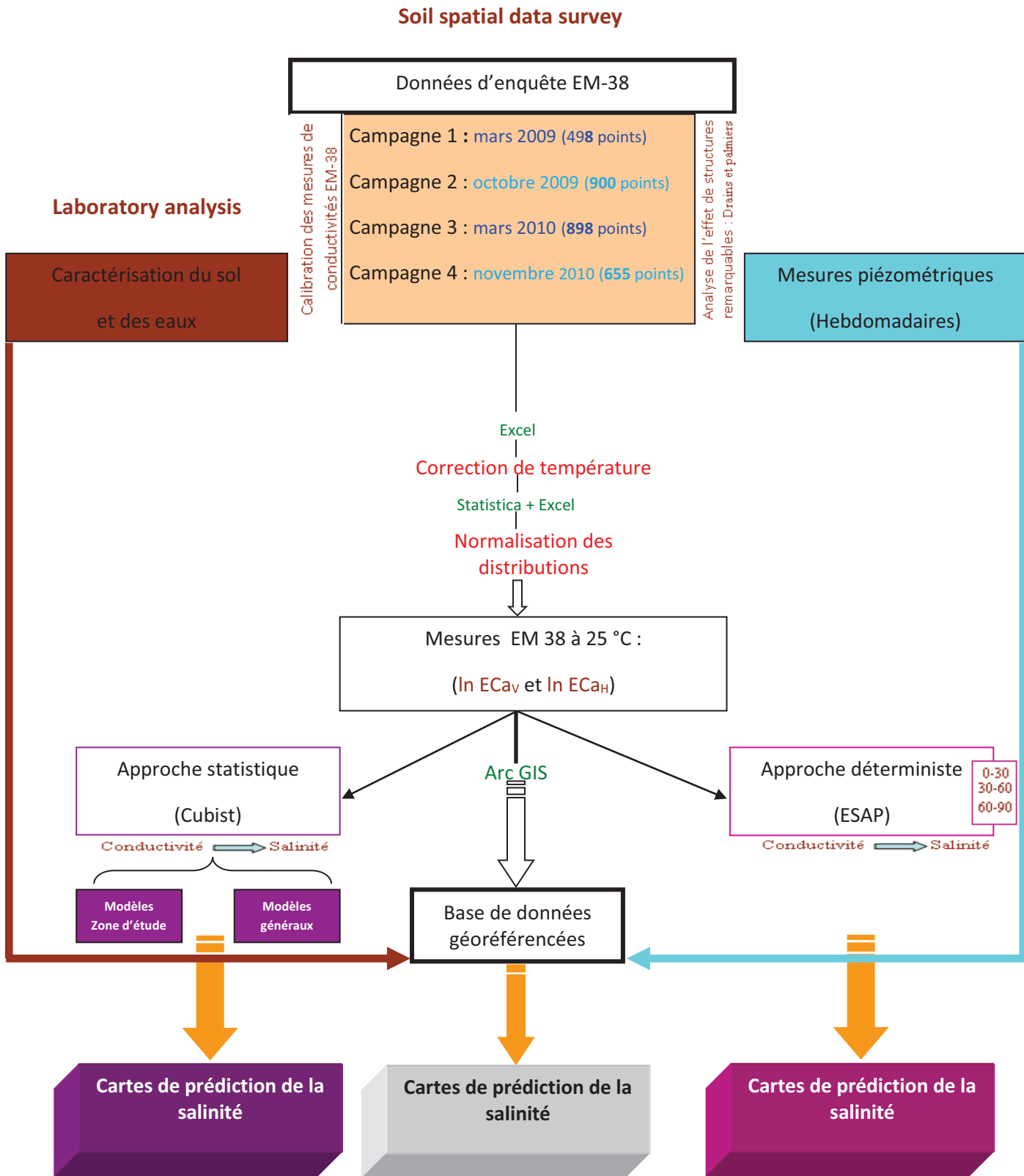


Figure 3-21. Organigramme de la méthodologie adoptée pour l'investigation

Tableau 3-7. Chronogramme des étapes d'investigations de terrain

	2009												2010											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1																								
2																								
3																								
4																								
5																								
6																								
7																								
8																								
9																								
10																								
11																								
12																								
13																								
14																								
15																								
16																								
17																								
18																								
19																								
20																								
21																								
22																								
23																								
24																								
25																								
26																								
27																								
28																								
29																								
30																								
31																								

- Mesures géophysiques (EM 38)
- Mesures piézométriques
- Descriptions de profils
- Analyses des eaux de la nappe phréatique
- Mesures piézométriques + Mesures EM 38
- Irrigation des parcelles désignées

### 3.6. Caractérisation pédologique de la zone d'étude

Sur la base d'une prospection pédologique effectuée à la tarière qui a mis en évidence une homogénéité du sol, nous avons décidé de décrire et d'échantillonner un profil pédologique pour chaque parcelle. Une fosse pédologique a été de ce fait ouverte à des fins de caractérisation morphologique et analytique des solums au centre de chaque parcelle pour éviter les effets des drains (Figure 3-6). Les profils C2 et E2, ont été creusés en octobre 2009, et le reste des profils en mars 2010.

Les échantillons ont été séchés à l'air libre, tamisés à 2 mm puis analysés au laboratoire.

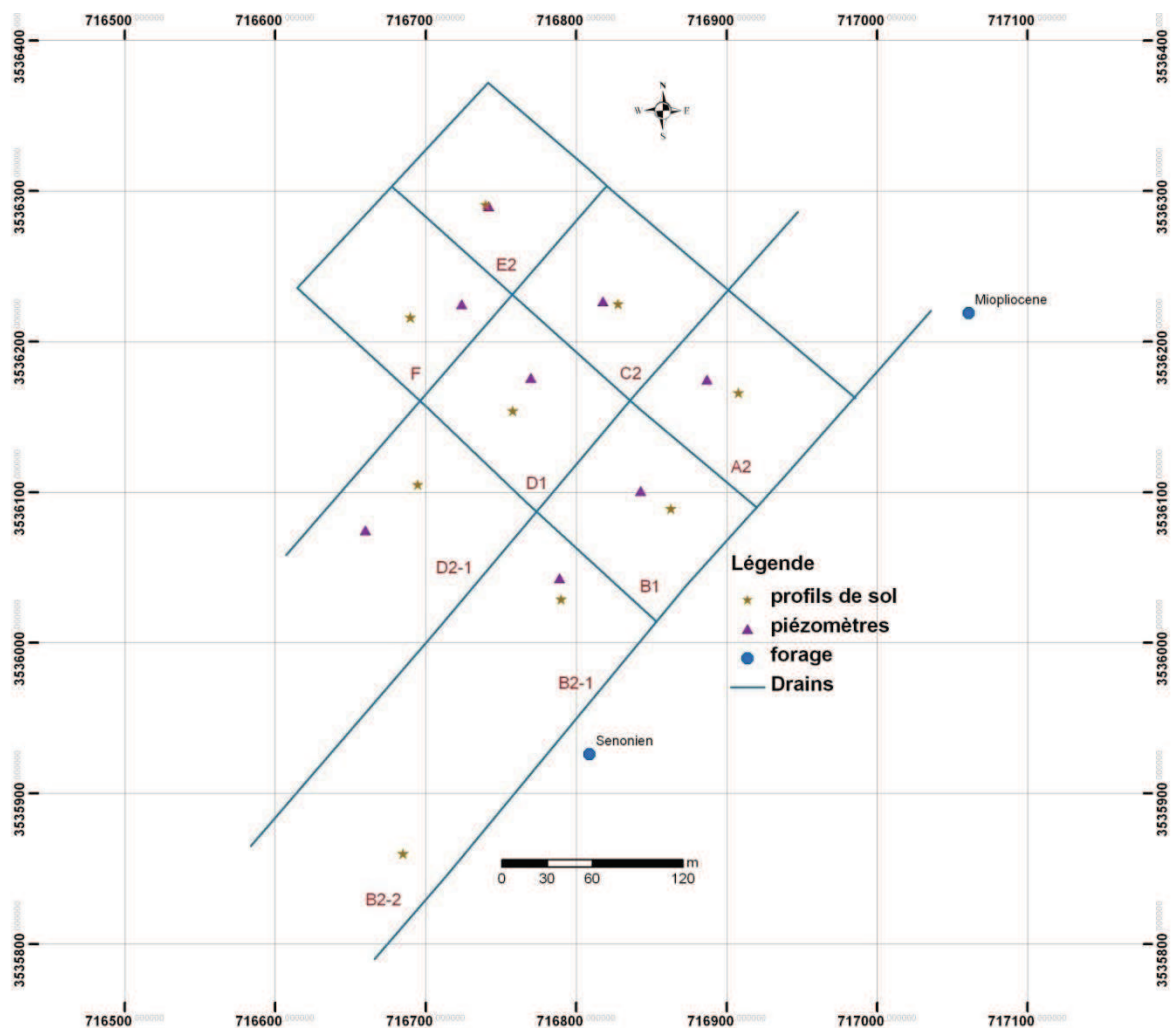


Figure 3-22. Plan d'échantillonnage des sols et des eaux de la palmeraie de l'université de Ouargla

### 3.6.1. Analyses au laboratoire

Les analyses de sols et des eaux ont été effectuées aux laboratoires de la Faculté des sciences de la nature et de la vie de l'université Kasdi Merbah de Ouargla, alors que l'analyse du gypse a été réalisée au laboratoire des travaux publics de Ouargla. L'analyse granulométrique, par contre, a été réalisée au laboratoire des sciences du sol de l'école nationale supérieure agronomique d'Alger.

#### 3.6.1.1. Analyses physiques

La teneur pondérale en eau ( $\omega_{H_2O}$ ) du sol a été mesurée juste après chaque prélèvement. La démarche suivie repose sur la norme NF ISO 11465 (AFNOR, 1999).

La masse volumique du sol correspond à sa masse par unité de volume du sol sec en place. Elle est déterminée par la méthode du cylindre. Cette technique consiste à prélever un volume de terre effectué avec un cylindre enfoncé directement dans le sol et dont les extrémités sont soigneusement arasées. L'échantillon est recueilli, séché à 105 °C et pesé. Elle est exprimée en  $g/cm^3$ .

La granulométrie est déterminée par la méthode internationale à la pipette de Robinson selon la norme NF X 31-107. Cette méthode, basée sur la loi de Stokes, est réalisée sans décarbonatation.

#### 3.6.1.2. Analyses chimiques

La mesure du pH se fait selon la norme NF ISO 10390. Son principe repose sur la mise en suspension de l'échantillon de sol séché à l'air avec un rapport sol /eau de 1/5 dans une solution de chlorure de potassium (KCl) : pH KCl ou dans de l'eau : pH eau (AFNOR, 1999a).

La conductivité électrique a été mesurée sur un extrait dilué de 1/5, selon la norme NF ISO 11265 et le résultat est corrigé à une température de 25 °C. Elle est exprimée en dS/m.

Pour passer à la conductivité électrique sur pâte saturée ( $EC_e$ ) i.e. mesure de référence de la salinité qui tient en compte la texture du sol, la conductivité électrique de l'extrait dilué 1/5 ( $EC_{1:5}$ ) doit être multiplié par un facteur (f) empirique (Slavich et Petterson, 1993; Gibbs, 2000; Shirokova *et al.*, 2000) :  $EC_e = f \times EC_{1:5}$ .

En outre, il est toujours recommandé d'affiner le facteur (f) aux conditions locales et aux différentes textures du sol pour réussir la conversion. Dans le cas des sols sableux de la palmeraie de l'université de Ouargla, nous avons calculé un (f) moyen de 18,8. Ce résultat concorde bien avec les coefficients de nombreux auteurs sur des sols sableux. En effet, Gibbs (2000) le trouve à 17, les auteurs de Subsoils manuel (Adcock *et al.*, 2006) à 12,5 et Slavich et Petterson (1993) trouvent un coefficient moyen de 22,7.

Les cations échangeables alcalins et alcalino-terreux ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  et  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ ) sont extraits selon les méthodes de dosage figurant dans la norme NF X 31-108. Elle procède par une extraction directe des cations par agitation en présence d'acétate d'ammonium (AFNOR, 1999a). Le dosage se fait par spectrométrie d'adsorption atomique.

Le dosage des anions carbonate ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) et bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ) a été réalisé par titration à l'acide sulfurique en présence des indicateurs (Phénolphtaléine et orange de méthyle). La fin de la réaction est indiquée par le changement de couleur à l'orange (virage).

Les chlorures sont déterminés par la méthode de MOHR basée sur la titration de l'extrait de sol par le nitrate d'argent en présence de chromate de potassium ( $\text{K}_2\text{CrO}_4$ ) jusqu'à l'apparition de la couleur rouge brique.

La teneur en sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) est déterminée selon la norme NF ISO 11048 par la méthode gravimétrique basée sur la précipitation des sulfates sous formes de sulfate de baryum par l'attaque de l'extrait par une solution de chlorure de baryum.

Le calcaire total est déterminé par calcimétrie volumétrique au calcimètre de Bernard.

La matière organique a été déterminée par dosage du carbone organique. La teneur en carbone organique est déterminée directement par oxydation humide. La méthode Anne (norme AFNOR X 31-109) consiste en une oxydation de la matière organique par une quantité en excès de dichromate de potassium en milieu sulfurique.

Pour passer du taux de carbone au taux de matière organique, on utilise un coefficient multiplicateur de 1,72.

Le gypse a été analysé par une méthode chimique (gravimétrie) qui consiste à doser les ions  $\text{SO}_4^{2-}$  libérés après attaque à l'HCl à 10 % puis au chlorure de baryum ( $\text{BaCl}_2$ ) en fin formation des sulfates de baryum ( $\text{BaSO}_4$ ).



### **3.6.2. Caractérisation des eaux des forages et de la nappe phréatique**

Les eaux de la nappe phréatique et celles des deux forages ont été analysées pour déterminer leurs compositions chimiques et donc leur éventuel rôle dans la salinisation des sols.

Les eaux sont prélevées et analysées au laboratoire. Les eaux de la nappe phréatique provenaient des piézomètres installés dans chaque parcelle. Ces analyses ont porté sur la conductivité électrique, le pH, le SAR, et le dosage des cations et des anions.

### **3.6.3. Typologie des sels**

#### **3.6.3.1. Hypothèse de la formation des sels**

La constitution des sels s'obtient par la combinaison des cations et des anions, à condition que les teneurs de ces derniers dans la solution du sol soient connues. Le principe choisi pour la formation des sels repose sur la méthode de Bazilevich et Pankova (1968) cité par [Servant \(1975\)](#) (cf. annexe III).

**Dynamique spatiotemporelle de la salinité de sols sableux irrigués en milieu aride**

**Application à une palmeraie de la cuvette de Ouargla en Algérie**

## **CHAPITRE 4 - CARACTERISATION DES EAUX ET DES SOLS DE LA ZONE D'ETUDE**

*" Il ne sert à rien de dire "Nous avons fait de notre mieux. Il faut réussir à faire ce qui est nécessaire"*

*Winston Churchill*

#### **4.1. Introduction**

Ce chapitre a pour objectif de présenter le matériel d'étude caractérisé par les sols et les eaux du site d'étude. La description des profils et les analyses physicochimiques du sol réalisées au laboratoire constituent la principale source d'informations disponibles pour caractériser le sol, apprécier ses aptitudes, comprendre et modéliser son fonctionnement.

#### **4.2. Caractéristiques du sol et des eaux de l'exploitation**

Les sols de la palmeraie étudiée ont subi des modifications de leurs caractéristiques physico-chimiques sous les effets des fluctuations de la nappe phréatique, de la qualité de l'eau d'irrigation, du climat et des actions anthropiques.

Dans ce qui suit, nous présentons les caractéristiques morphologiques et analytiques des sols étudiés ainsi que les caractéristiques physico-chimiques de l'eau d'irrigation et de la nappe phréatique.

##### **4.2.1. Description morphologique et analyse du sol**

Les sols de la palmeraie ont été caractérisés par 9 profils profonds de 110 cm à raison de 1 profil par parcelle. La description morphopédologique des parcelles et leurs principales caractéristiques analytiques (Tableaux 4-1 à 4-9) classent les sols étudiés selon la World Reference Base (WRB) (FAO, 2006a) dans le groupe des Solonchaks (Salic, Aridic).

Toutes les données de ce travail ont été géoréférencées dans le système WGS 84 / UTM zone 31 N.

##### **4.2.1.1. Caractérisation du sol des parcelles non cultivées**

Peu de travaux ont été réalisés sur les parcelles non cultivées ; on peut néanmoins citer les travaux de Benbrahim (2001), Idder (2006) et Berrabah (2009) sur la dynamique des sels solubles, leur mode de fixation, leur cristallisation ainsi que leur inventaire dans le profil.

#### 4.2.1.1.1. *Caractérisation morphologique et analytique du profil E2*

Le profil de la parcelle E2 décrit et échantillonné le 23 février 2009 sous un temps ensoleillé, correspond à un sol nu. Sa longitude est de 716,740 km et sa latitude de 3536,291 km.



**Ayz - 0-10 cm** : couleur à l'état humide 7,5YR 5/6 (brun fort), pas d'effervescence à l'HCl, peu humide, texture sableuse, pas de racines, meuble, croute de battance en surface avec des efflorescences salines, taches de gypse pulvérulent, petit cristaux de sel, transition nette et régulière.

**Cyz1 - 10-35 cm** : couleur à l'état humide 7,5YR 6/6 (jaune rougeâtre), pas d'effervescence à l'HCl, peu humide, texture sableuse, pas de racines, compact, gypse pulvérulent blanchâtre, nombreux gros et petits cristaux de sels donnant une couleur blanche à la base de l'horizon, transition nette et régulière.

**Photo 4-5. Profil E2** **Cyz2 - 35-85 cm** : couleur à l'état humide 7,5YR 4/6 (brun fort), pas d'effervescence à l'HCl, humide, texture sableuse, pas de racines, compact, cristaux de sels sur tout l'horizon avec des accumulations dans des poches, gypse pulvérulent blanchâtre dans l'horizon, transition nette et régulière.

**Cy - > 85 cm** : couleur à l'état humide 7,5YR 5/6 (brun fort), pas d'effervescence à l'HCl, humide, texture limono-argilo-sableuse, quelques racines de tamarix, compact, petits cristaux de sels sur tout l'horizon avec des accumulations dans des poches.

**Tableau 4-8 - Résultats des analyses du profil E2**

Caractéristiques		Horizons			
		Ayz	Cyz1	Cyz2	Cy
Profondeur (cm)		0-10	10-35	35-85	> 85
Densité apparente		1,3	1,5	1,4	1,4
Calcaire total (%)		1,2	0,6	0,5	0,7
Gypse (%)		28,9	25	36	51,7
pHeau 1/5		7,8	7,5	7,5	7,5
pH KCl 1/5		7,6	7,5	7,5	7,5
EC <sub>1:5</sub> (dS.m <sup>-1</sup> ) à 25 °C		29,5	8,1	8,3	3,8
Humidité (%)		15,3	17,1	35,6	36,1
Granulométrie (%)	A (< 2µm)	< 1	< 1	2,5	8,8
	Lf (2-20µm)	2,3	2,5	2,65	3,1
	Lg (20-50µm)	4,5	3,7	3,6	3,5
	S.f (50-200µm)	54,5	56,1	57	58,1
	S,g (200-2000µm)	38,7	37	34	26,4
Classe texturale		Sableuse	Sableuse	Sableuse	Sableuse
Bilan ionique de l'extrait aqueux 1/5 (még/l)	Na <sup>+</sup>	99,2	33,8	26,2	23,5
	K <sup>+</sup>	1,1	0,3	1,3	2,3
	Ca <sup>2+</sup>	42,5	18,3	16,5	24,2
	Mg <sup>2+</sup>	100,2	26,8	20,0	9,8
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,3	0,2	0,4	0,2
	Cl <sup>-</sup>	48,8	11,7	7,0	5,3
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	193,2	64,2	54,3	52,2
Faciès chimique global		Sulfaté magnésien	Sulfaté sodique	Sulfaté sodique	Sulfaté calcique
Matière organique (%)		0,6	0,4	0,4	0,5

Le sol de la parcelle E2 est sableux sur tout le profil et sa densité apparente varie entre 1,3 et 1,5 g/cm<sup>3</sup>. Ce sol est peu calcaire à non calcaire ( $0,5 \% \leq \text{CaCO}_3 \leq 1,2 \%$ ) (Baize, 1988) mais les taux de gypse sont très élevés. Ils varient entre 25 % et 52 %. Le profil E2 est très salé à extrêmement salé, cela est confirmé par des valeurs très élevée de la conductivité électrique ( $3 \text{ dS.m}^{-1} \leq \text{EC}_{1:5} \leq 30 \text{ dS.m}^{-1}$ ). Par contre, il est très pauvre en matière organique (Djili, 2000). Le sol de cette parcelle se caractérise également par un pH alcalin ( $7,5 \leq \text{pH} \leq 7,8$ ) (Baize, 1988) et un faciès chimique sulfaté sodique, sulfaté magnésien et sulfaté calcique selon la profondeur.

#### 4.2.1.1.1. Répartition des ions dans le profil E2

Selon les figures 4-1 (a) et 4-1 (b), la surface du profil correspond à un maximum de salinité (profil salin de type A). La  $\text{EC}_{1:5}$  est maximale à la surface du profil ( $29,5 \text{ dS.m}^{-1}$ ). Ce profil salin est liée à l'action de la dynamique des sels caractérisée par une remonté capillaire. Le profil ionique indique que le sodium (21 %) et les sulfates (42 %) sont les deux ions dominants dans le sol de cette parcelle.

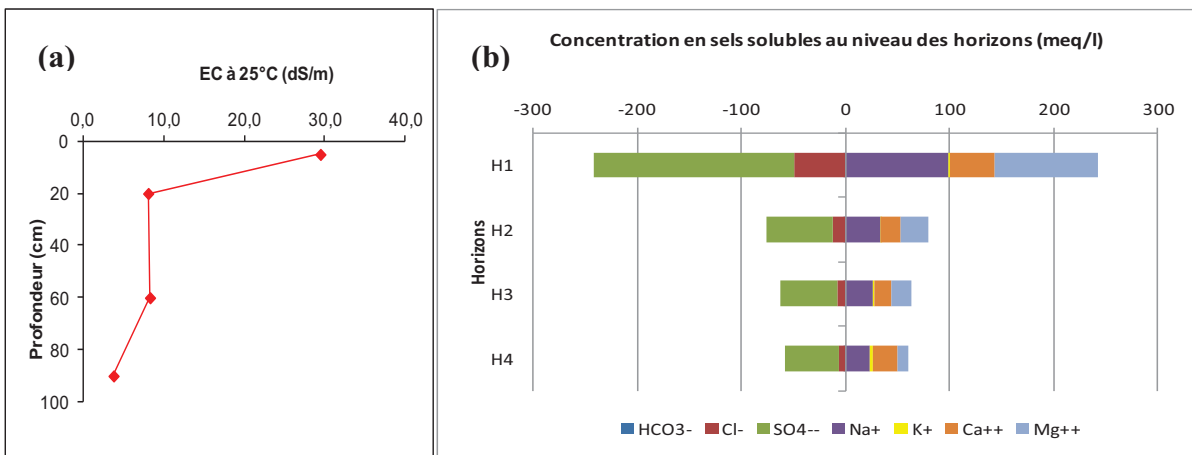


Figure 4-23. Profils (a) salin, (b) ionique de la parcelle E2

La figure 4-2 montre que le sulfate de sodium ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) et le  $\text{NaCl}$  colonisent à eux seuls tous les horizons avec un taux dépassant 50 % du total des sels. L'anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ) est également présente avec un taux moyen qui dépasse 17 %.



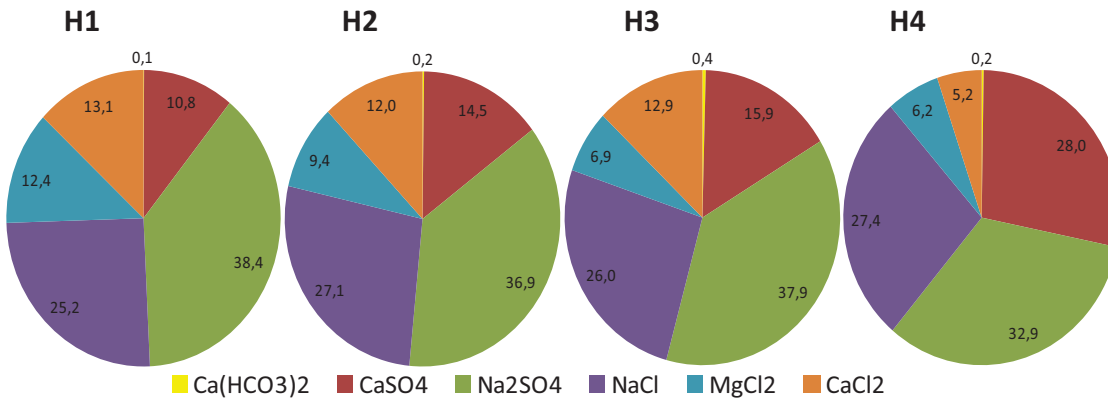


Figure 4-24. Pourcentages des sels dans le profil E2

#### 4.2.1.1.2. Caractérisation morphologique et analytique du profil F

Le profil de la parcelle F décrit et échantillonné le 15 mars 2010, correspond à un sol nu avec une végétation naturelle (tamarix). Il est situé à l'ouest de la palmeraie à une longitude de 716,690 km et une latitude de 3536,216 km.



**Az - 0-25 cm :** couleur à l'état humide 7,5YR 5/6 (brun fort), effervescence à l'HCl faible, humide, texture sablo-limoneuse, pas de racines, meuble, croute de battance en surface avec des efflorescences salines, pas de gypse, pas de cristaux de sel, petites concrétions saline à la base de l'horizon, transition nette et régulière.

**Cyz - 25-85 cm :** couleur 7,5 YR 5/6 (brun fort), effervescence à l'HCl nulle, humide, limono-argilo-sableuse, quelques racines vivantes, compact, quelques taches de gypse pulvérulent sur toute la matrice de l'horizon, quelques amas de gypse dures, nombreux gros cristaux de sels dans tout l'horizon, transition nette et régulière.

**Cy - 85-100 cm :** couleur 7,5 YR 6/6 (jaune rougeâtre), faible effervescence à l'HCl, humide, texture sablo-limoneuse, pas de racines, compact, gypse pulvérulent blanchâtre dans tout l'horizon avec une accumulation à la base et formation d'un encroûtement par endroit, transition nette et régulière.

**Cz - > 100 cm :** couleur 7,5 YR 5/6 (brun fort), effervescence à l'HCl nulle, humide, texture limono-argilo-sableuse, quelques fines racines d'atriplex, compact, petits de cristaux de sels dans tout l'horizon.

Tableau 4-9. Résultats des analyses du profil F

Caractéristiques		Horizons			
		Az	Cyz	Cy	Cz
Profondeur (cm)		0-25	25-85	85-100	> 100
Densité apparente		1,3	1,3	1,4	1,4
Calcaire total (%)		1,8	0,5	1,0	0,9
Gypse (%)		5,5	10,1	11,7	8,0
pHeau 1/5		8,0	7,7	7,8	7,9
pH <sub>KCl 1/5</sub>		7,8	7,6	7,8	7,8
EC <sub>1:5</sub> (dS.m <sup>-1</sup> ) à 25 °C		34,3	7,7	5,0	4,0
Humidité (%)		13,7	28,5	31,1	38,8
Granulométrie (%)	A (< 2µm)	1,0	< 1	< 1	0,4
	Lf (2-20µm)	1,2	0,8	0,9	1,1
	Lg (20-50µm)	6,9	4,7	5,4	6,3
	S.f (50-200µm)	66,8	71,3	70,2	68,8
	S,g (200-2000µm)	24,1	23,2	23,5	23,4
Classe texturale		Sableuse	Sableuse	Sableuse	Sableuse
Bilan ionique de l'extrait aqueux 1/5 (méq/l)	Na <sup>+</sup>	70,3	36,4	37,8	39,3
	K <sup>+</sup>	0,5	0,4	0,4	0,3
	Ca <sup>2+</sup>	8,7	6,7	4,2	5,2
	Mg <sup>2+</sup>	97,7	27,3	26,2	24,2
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,2	0,2	0,3	0,3
	Cl <sup>-</sup>	18,2	6,0	4,6	4,4
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	166,4	60,5	58,1	56,2
Faciès chimique global		Sulfaté magnésien	Sulfaté sodique	Sulfaté sodique	Sulfaté sodique
Matière organique (%)		0,3	0,3	0,3	0,2

La texture du sol est dans sa totalité sableuse. Le sol est non à peu calcaire ( $0,5 \% \leq \text{CaCO}_3 \leq 1,8 \%$ ) (Baize, 1988). Cependant, il est modérément gypseux (FAO, 2006b). Les taux de gypse sont moyennement élevés surtout dans la partie médiane ( $5 \% \leq \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \leq 12 \%$ ). Le sol est très pauvre en matière organique ( $\text{MO} \leq 1 \%$ ) (Djili, 2000) et son pH du sol est alcalin ( $7,7 \leq \text{pH} \leq 8$ ). Les valeurs de la conductivité électrique ( $\text{EC}_{1:5}$ ) sont très élevées surtout en surface ( $4 \text{ dS.m}^{-1} \leq \text{EC}_{1:5} \leq 35 \text{ dS.m}^{-1}$ ), d'où un sol très salé à extrêmement salé, le faciès chimique dominant est sulfaté sodique.

#### 4.2.1.1.2.1. Répartition des ions dans le profil F

Le mouvement de sel est ascendant dans le profil (Figure 4-3a), d'où d'un profil salin de type A (Servant, 1975). Dans ce profil, il y a une forte accumulation des ions dans l'horizon de surface (Figure 4-3b). Le profil de cette parcelle nue est dominé par les ions sodium et sulfate.

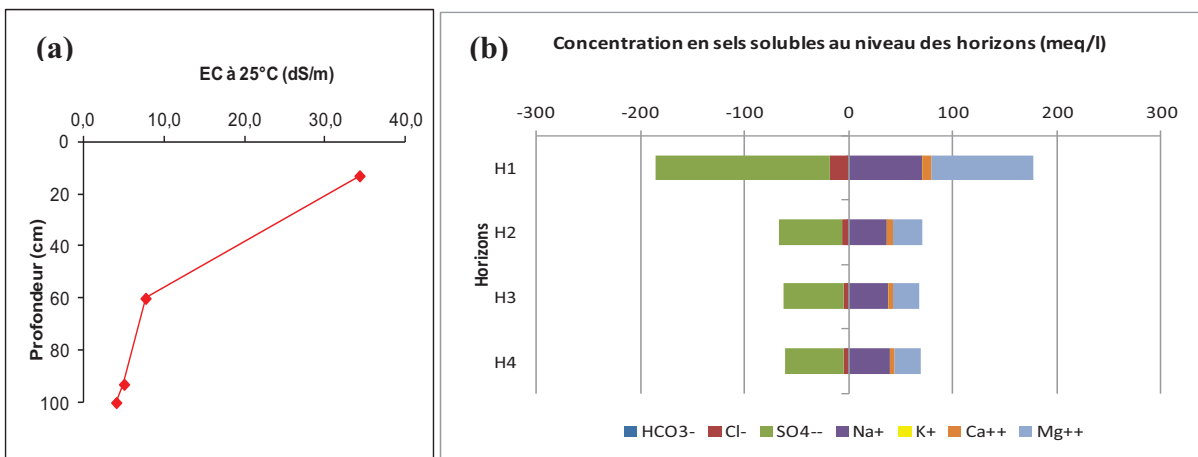


Figure 4-25. Profils (a) salin, (b) ionique de la parcelle F

L'accumulation remarquable des sels dans l'horizon de surface est à la faveur du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (47 %) qui salinise la presque la moitié de cet horizon suivi du  $\text{CaCl}_2$  (24 %) et du  $\text{NaCl}$  (21 %) (Figure 4-4).

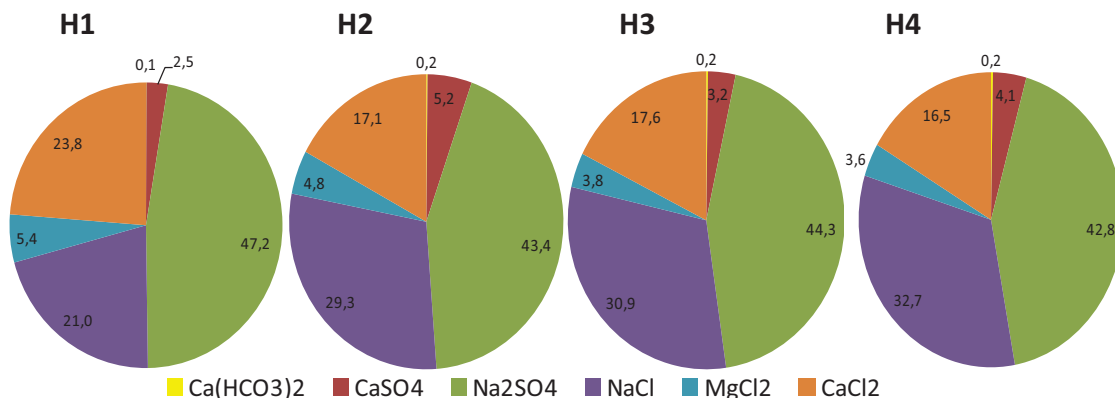


Figure 4-26. Répartition des sels dans le profil F

#### 4.2.1.2. Caractérisation du sol des parcelles cultivées

Selon les études réalisées sur l'exploitation de 2001 jusqu'à 2009 (Benbrahim, 2001; Idder, 2006; Berrabah, 2009), il ressort que la salinité est le paramètre le plus variable. Ce paramètre qui affecte fortement les sols mérite donc un suivi minutieux et constant.

##### 4.2.1.2.1. Caractérisation morphologique et analytique du profil A2

Le profil de la parcelle A2 décrit et échantillonné le 14 mars 2010 est situé dans une palmeraie comportant de l'orge en culture intercalaire. Ce profil est à une longitude de 716,908 km et à une latitude de 3536,166 km.



Photo 4-7. Profil A2

**Ayz - 0-10 cm :** couleur 7,5 YR 6/6 (jaune rougeâtre), effervescence à l'HCl faible, humide, texture sableuse, très peu de racines, meuble, tache de gypse pulvérulent, transition nette et régulière.

**Cy1 - 10-20 cm :** couleur à l'état humide 7,5YR 5/6 (brun fort), effervescence à l'HCl faible, humide, texture sablo-limoneuse, pas de racines, traces noires de racines mortes dégradées, peu compact, amas de gypse individualisés, transition ondulée entre 18 et 22 cm de profondeur.

**Cy2 - 20-80 cm :** couleur à l'état humide 7,5YR 7/6 (jaune rougeâtre), effervescence à l'HCl faible, humide, texture sablo-limono-argileuse, présence de racines à la surface de l'horizon (entre 20 et 50 cm), compact, gypse pulvérulent blanchâtre dans tout l'horizon avec une accumulation à la base et formation d'un encroûtement, transition nette et régulière.

**Cz - > 80 cm :** couleur 7,5 YR 6/6 (jaune rougeâtre), effervescence à l'HCl nulle, humide, texture sableuse, pas de racines, compact, petit cristaux de sels dans tout l'horizon.

Tableau 4-10. Résultats des analyses du profil A2

Caractéristiques		Horizons			
		Ayz	Cy1	Cy2	Cz
Profondeur (cm)		0-10	10-20	20-80	> 80
Densité apparente		1,3	1,3	1,3	1,2
Calcaire total (%)		2,0	1,9	2,1	1,2
Gypse (%)		15,7	22,1	51,9	3,7
pHeau 1/5		8,0	7,8	7,4	7,4
pH KCl 1/5		7,9	7,6	7,2	7,3
EC <sub>1:5</sub> (dS.m <sup>-1</sup> ) à 25 °C		11,4	5,6	3,8	2,6
Humidité (%)		25,2	28,4	42,0	39,9
Granulométrie (%)	A (< 2µm)	2,0	1,9	1,3	2,0
	Lf (2-20µm)	1,7	2,0	2,0	1,9
	Lg (20-50µm)	7,2	6,8	8,1	7,2
	S.f (50-200µm)	49,5	46,9	60,2	59,5
	S,g (200-2000µm)	39,6	42,3	28,5	29,4
Classe texturale		Sableuse	Sableuse	Sableuse	Sableuse
Bilan ionique de l'extrait aqueux 1/5 (még/l)	Na <sup>+</sup>	33,2	24,3	13,4	32,2
	K <sup>+</sup>	4,2	3,4	2,4	0,1
	Ca <sup>2+</sup>	7,0	6,8	18,1	2,2
	Mg <sup>2+</sup>	10,8	9,2	9,7	11,8
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,2	0,2	0,2	0,4
	Cl <sup>-</sup>	0,3	1,2	2,2	2,2
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	51,8	49,4	48,2	40,8
Faciès chimique global		Sulfaté sodique	Sulfaté sodique	Sulfaté calcique	Sulfaté sodique
Matière organique (%)		0,6	0,5	0,3	0,6

La texture du sol est sableuse dans tout le profil. Le sol de ce cette parcelle est hypocalcaire ( $\text{CaCO}_3 \leq 15 \%$ ) (AFES, 2008) et fortement gypseux (FAO, 2006b) surtout au niveau des horizons médians ( $22 \% \leq \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \leq 52 \%$ ). Le sol est très pauvre en matière organique ( $\text{MO} < 1 \%$ ) et son pH est alcalin ( $7,4 \leq \text{pH} \leq 8$ ). Les valeurs de la conductivité électrique ( $\text{EC}_{1:5}$ ) sont très élevées ( $2 \text{ dS.m}^{-1} \leq \text{EC}_{1:5} \leq 12 \text{ dS.m}^{-1}$ ), ce qui rend le sol très salé à extrêmement salé. Le faciès chimique des horizons de ce profil est à majorité sulfaté sodique.

#### 4.2.1.2.1. Répartition des ions dans le profil A2

Dans ce profil, l'horizon de surface correspond à un maximum de salinité (profil salin de type A) (Figure 4-5). Il s'agit d'un profil dont la dynamique saline est caractérisée par une remonté capillaire, avec une dominance pour les cations dans le sens  $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$  et pour les anions dans le sens  $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^-$ .

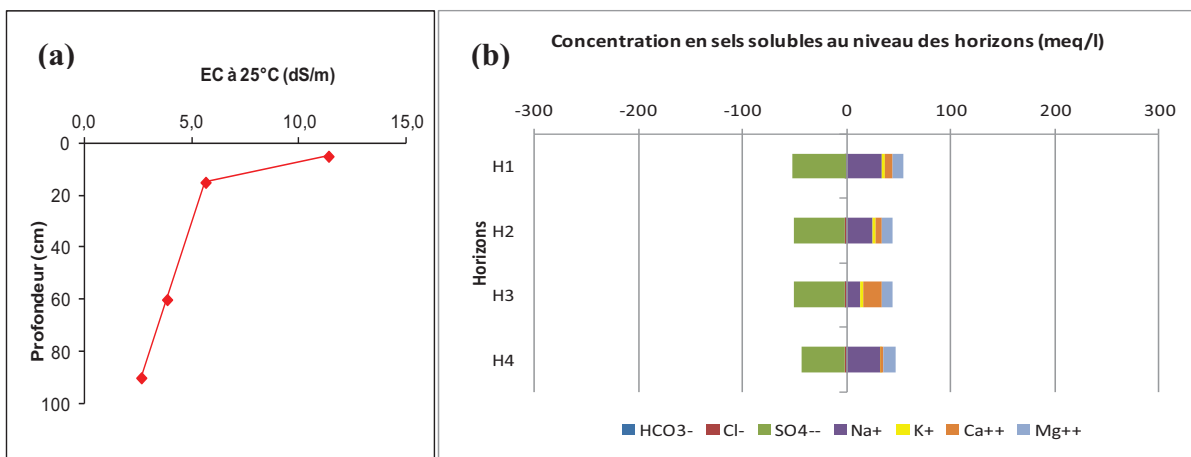


Figure 4-27. Profils (a) salin, (b) ionique de la parcelle A2

La figure 4-6 montre que les sels neutres  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  et le  $\text{NaCl}$  se démarquent largement par rapport aux autres sels dans le solum, alors que le  $\text{CaSO}_4$  est remarquablement présent dans la partie médiane du profil à plus de 25 %.

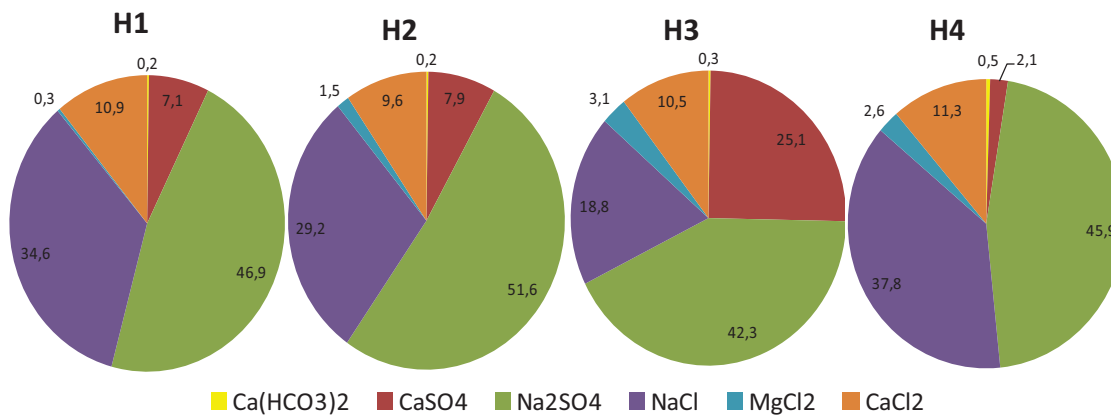


Figure 4-28. Répartition des sels dans le profil A2



#### 4.2.1.2.2. *Caractérisation morphologique et analytique du profil C2*

Le profil de la parcelle C2 est décrit et échantillonné le 22 février 2009. Il correspond à un sol cultivé avec du palmier dattier et une culture intercalaire (orge) en expérimentation. Il est localisable à une longitude de 716,828 km et une latitude de 3536,225 km.

Le premier horizon a été décapé pendant les opérations d'aménagement de la palmeraie.



**Photo 4-8. Profil C2**

**Cyz - 0-40 cm :** couleur à l'état humide 7,5YR 5/6 (brun fort), effervescence à l'HCl nulle, humide, texture limono-sablo-argileuse, très peu de racines, compact, petit cristaux de sels dans tout l'horizon, transition nette et régulière.

**Cy - 40-90 cm :** couleur à l'état humide 7,5YR 7/6 (jaune rougeâtre), effervescence à l'HCl nulle, humide, texture limono-sablo-argileuse, nombreuses racines de différents diamètres en haut de l'horizon (entre 40 et 60 cm), compact, gypse pulvérulent blanchâtre dans tout l'horizon avec une accumulation à la base et formation d'un encroûtement, transition nette et régulière.

**Cyz - > 90 cm :** couleur à l'état humide 7,5YR 5/6 (brun fort), effervescence à l'HCl nulle, humide, texture limono-sablo-argileuse, pas de racines, compact, petit cristaux de sels dans tout l'horizon.

**Tableau 4-11. Résultats des analyses du profil C2**

Caractéristiques		Horizons		
		Cyz	Cy	Cyz
Profondeur (cm)		0-40	40-90	> 90
Densité apparente		1,3	1,3	1,2
Calcaire total (%)		1,3	1,3	1,1
Gypse (%)		56,2	57,2	51,1
pHeau 1/5		7,7	7,7	7,9
pH <sub>KCl 1/5</sub>		7,6	7,6	7,7
EC <sub>1:5</sub> (dS.m <sup>-1</sup> ) à 25 °C		5,0	5,8	4,0
Humidité (%)		25,7	43,7	39,6
Granulométrie (%)	A (< 2µm)	7,1	5,9	5,9
	Lf (2-20µm)	1,2	1,4	2,0
	Lg (20-50µm)	3,1	3,1	2,6
	S.f (50-200µm)	52,2	52,8	50,3
	S,g (200-2000µm)	36,4	36,8	39,3
Classe texturale		Sableuse	Sableuse	Sableuse
Bilan ionique de l'extrait aqueux 1/5 (még/l)	Na <sup>+</sup>	10,7	16,3	15,3
	K <sup>+</sup>	2,3	0,3	3,3
	Ca <sup>2+</sup>	25,3	22,1	17,3
	Mg <sup>2+</sup>	13,2	17,0	12,6
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,2	0,2	0,2
	Cl <sup>-</sup>	1,7	3,5	2,1
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	53,8	54,0	50,3
Faciès chimique global		Sulfaté calcique	Sulfaté calcique	Sulfaté calcique
Matière organique (%)		0,5	0,5	0,6

Le sol de la parcelle C2 possède une homogénéité texturale sableuse avec une présence d'une zone racinaire de 50 cm d'épaisseur. Ce sol de cette parcelle est non à peu calcaire ( $1\% \leq \text{CaCO}_3 \leq 1,5\%$ ) (Baize, 1988) et ses taux de gypse sont très élevés dans tout le solum ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} > 50\%$ ). Le sol est très pauvre en matière organique ( $\text{MO} < 1\%$ ). Le pH du solum est alcalin ( $7 \leq \text{pH} \leq 8$ ). Les sols de la parcelle C2 sont très salés à extrêmement salés ( $4 \text{ dS.m}^{-1} \leq \text{EC}_{1:5} \leq 6 \text{ dS.m}^{-1}$ ) (Aubert, 1976). Le faciès chimique de ce profil est dans son ensemble sulfaté calcique.

#### 4.2.1.2.1. Répartition des ions dans le profil C2

Le profil salin de cette parcelle correspond au type B (Servant, 1975). La figure 4-7b montre que le profil ionique suit l'allure du profil salin avec une dominance des ions  $\text{Mg}^{2+}$  (13 %) et  $\text{SO}_4^{2-}$  (49 %) en moyenne.

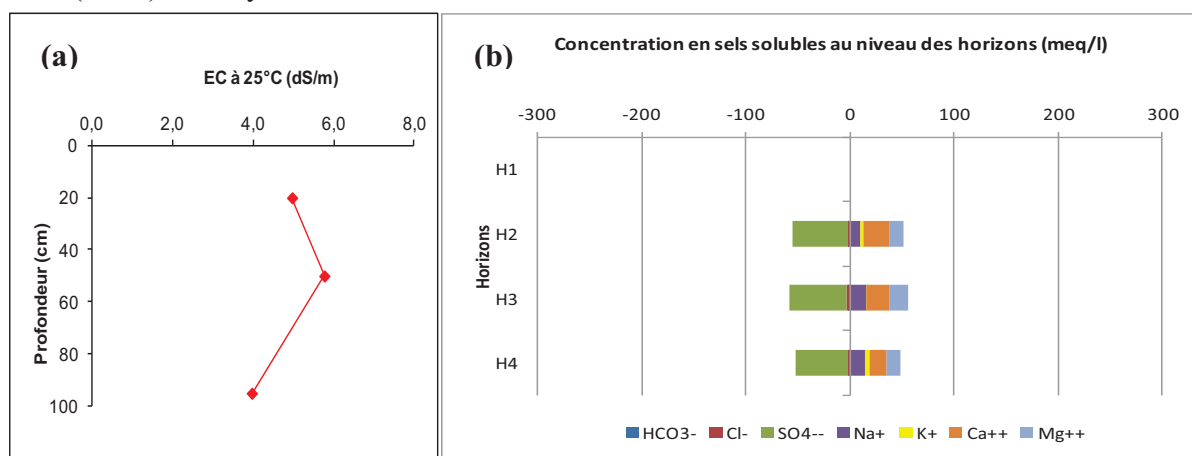


Figure 4-29. Profils (a) salin, (b) ionique de la parcelle C2

Nous pouvons noter (Figure 4-8) que les sulfates de sodium ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) et de calcium ( $\text{CaSO}_4$ ) se démarquent largement par rapport aux autres sels dans tout le profil avec respectivement 39 % et 26 % en moyenne.

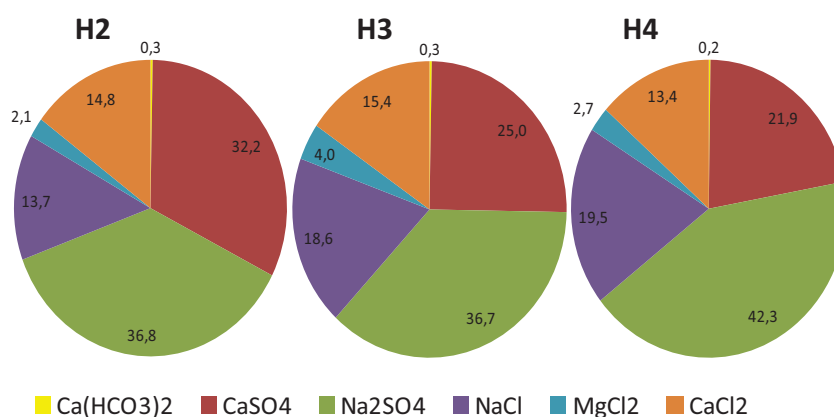
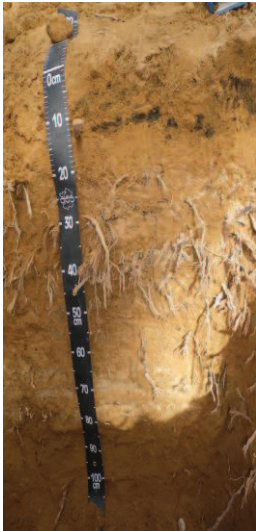


Figure 4-30. Pourcentages des sels dans le profil C2

#### **4.2.1.2.3. Caractérisation morphologique et analytique du profil B1**

Le profil B1 se situe dans une parcelle irriguée et cultivée uniquement par du palmier dattier. Il a été décrit et échantillonné le 13 mars 2010. Ce profil est situé à une longitude de 716,863 km et à une latitude 3536,089 km.

Le premier horizon a été décapé et remanié sur les 20 premiers centimètres pendant les opérations d'aménagement de la palmeraie.



**Cyz - 20-55 cm :** couleur 7,5 YR 5/6 (brun fort), faible effervescence à l'HCl, humide, texture sablo-limoneuse, nombreuses racines de différents diamètres, compact, cristaux de sels dans tout l'horizon, transition nette et régulière.

**Cyz - 55-80 cm :** couleur 7,5 YR 7/6 (jaune rougeâtre), faible effervescence à l'HCl, humide, texture sablo-limoneuse, quelques racines, compact, gypse pulvérulent blanchâtre dans tout l'horizon avec une accumulation à la base et formation d'un encroûtement, transition nette et régulière.

**Cz - > 80 cm :** couleur 7,5 YR 5/6 (brun fort), faible effervescence à l'HCl, humide, texture sablo-limono-argileuse, très peu de racines, compact, petit cristaux de sels dans tout l'horizon.

**Photo 4-9. Profil B1**

**Tableau 4-12. Résultats des analyses du profil B1**

Caractéristiques		Horizons		
		Cz	Cyz	Cz
Profondeur (cm)		20-55	55-80	> 80
Densité apparente		1,3	1,4	1,3
Calcaire total (%)		2,9	2,9	1,7
Gypse (%)		15,5	39,8	16,9
pHeau 1/5		7,6	7,8	7,8
pH <sub>KCl 1/5</sub>		7,5	7,7	7,8
EC <sub>1:5</sub> (dS.m <sup>-1</sup> ) à 25 °C		2,3	2,8	2,0
Humidité (%)		28,6	42,9	34,5
Granulométrie (%)	A (< 2µm)	1,3	< 1	1,6
	Lf (2-20µm)	2,0	1,3	1,8
	Lg (20-50µm)	7,5	5,7	6,7
	S.f (50-200µm)	57,31	62,4	57,3
	S,g (200-2000µm)	32,5	30,9	32,7
Classe texturale		Sableuse	Sableuse	Sableuse
Bilan ionique de l'extrait aqueux 1/5 (még/l)	Na <sup>+</sup>	15,1	15,1	14,8
	K <sup>+</sup>	0,3	0,1	0,3
	Ca <sup>2+</sup>	4,7	10,3	5,2
	Mg <sup>2+</sup>	15,8	15,8	11,8
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,2	0,4	0,3
	Cl <sup>-</sup>	2,5	2,2	0,5
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	40,0	40,7	37,2
Faciès chimique global		Sulfaté magnésien	Sulfaté magnésien	Sulfaté sodique
Matière organique (%)		0,3	0,3	0,2

La texture du sol est en totalité sableuse. Le sol est peu calcaire ( $1 \% \leq \text{CaCO}_3 \leq 3 \%$ ) (Baize, 1988) alors que les taux de gypse sont très élevés dans le profil de cette parcelle ( $15 \% \leq \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \leq 40 \%$ ). Cependant, le sol est très pauvre en matière organique ( $\text{MO} < 1 \%$ ) et le pH du sol est alcalin ( $7,5 \leq \text{pH} \leq 8$ ). Les valeurs de la conductivité électrique ( $\text{EC}_{1:5}$ ) sont très élevées ( $2 \text{ dS.m}^{-1} \leq \text{EC}_{1:5} \leq 3 \text{ dS.m}^{-1}$ ), ce qui rend le sol très salé. Le faciès chimique global de ce sol est sulfaté sodique magnésien et sulfaté sodique.

#### 4.2.1.2.3.1. Répartition des ions dans le profil B1

Le profil salin (Figure 4-9a) de cette parcelle présente un horizon médian salé (profil salin de type B) avec une  $\text{EC}_{1:5}$  de  $3,8 \text{ dS.m}^{-1}$  qui serait due à l'évaporation de la solution du sol et la remonté de la nappe phréatique. Le profil ionique (Figure 4-9b) concorde avec le profil salin de la même figure avec en ordre décroissant la distribution des cations ( $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$ ) et les anions ( $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^-$ ).

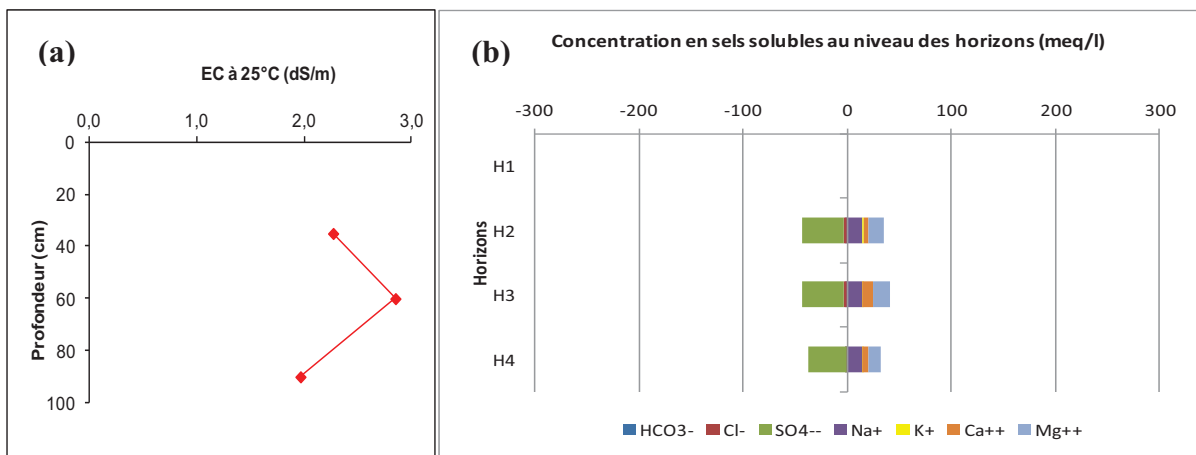


Figure 4-31. Profils (a) salin, (b) ionique de la parcelle B1

La figure 4-10 indique que le profil est salinisé majoritairement avec du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  et le  $\text{NaCl}$  à plus de 60 %. Par ailleurs, les horizons du profil sont également salinisés avec du  $\text{CaSO}_4$  à plus de 13 %.

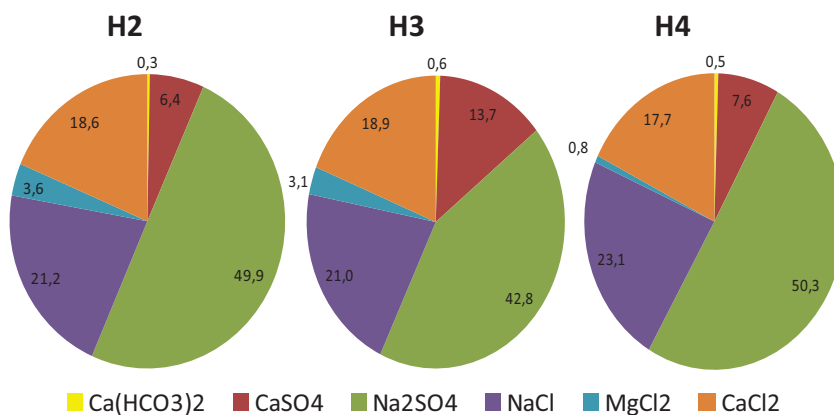


Figure 4-32. Répartition des sels dans le profil B1



#### 4.2.1.2.4. *Caractérisation morphologique et analytique du profil D1*

Le profil de la parcelle D1 est situé dans une parcelle bien entretenue, cultivée avec du palmier dattier et une culture intercalaire (orge) dans les planches d'irrigations. Il a été échantillonné le 15 mars 2010. Il se situe à une longitude de 716,758 km et une latitude de 3536,154 km.

Le premier horizon a été décapé et remanié lors des opérations d'aménagement de la palmeraie sauf dans certains endroits où il subsiste.



**Photo 4-10. Profil**

**Cz - 0-40 cm :** couleur 7,5 YR 5/6 (brun fort), faible effervescence à l'HCl, humide, texture limono-sablo-argileuse, nombreuses racines de différents diamètres, peu compact, nombreux cristaux de sels de tailles variables entre les racines, transition nette et régulière.

**Cy - 40-65 cm :** couleur 7,5 YR 6/6 (jaune rougeâtre), faible effervescence à l'HCl, humide, texture sableuse, quelques racines de petits diamètres, compact, gypse pulvérulent blanchâtre dans tout l'horizon et une accumulation de concrétion gypseuse sous forme de petits feuillés cristallins à la base de l'horizon, transition nette et régulière.

**Cyz - > 65 cm :** couleur 7,5 YR 5/6 (brun fort), pas d'effervescence à l'HCl, humide, texture limono-sablo-argileuse, quelques racines, compact, quelques taches de gypse pulvérulent, petits cristaux de sels, accumulation de gros cristaux de sels qui masque presque toute la base de l'horizon.

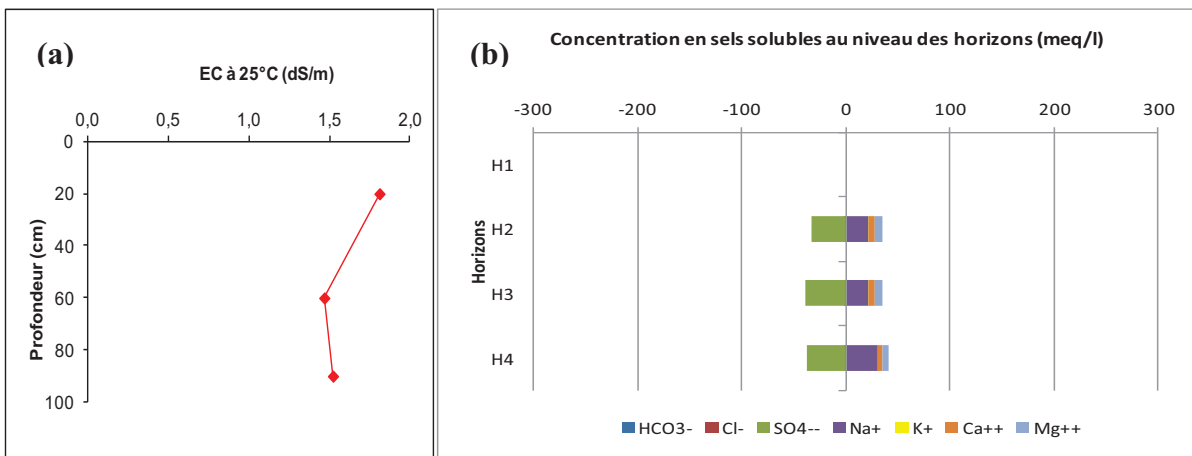
**Tableau 4-13. Résultats des analyses du profil D1**

Caractéristiques		Horizons		
		Cz	Cy	Cyz
Profondeur (cm)		0- 40	40-65	> 65
Densité apparente		1,3	1,4	1,3
Calcaire total (%)		1,8	1,1	1,4
Gypse (%)		18,6	35,0	8,6
pHeau 1/5		7,9	8,1	7,6
pH KCl 1/5		7,7	8,0	7,5
EC <sub>1:5</sub> (dS.m <sup>-1</sup> ) à 25 °C		1,8	1,5	1,5
Humidité (%)		25,4	33,2	46,2
Granulométrie (%)	A (< 2µm)	1,9	1,9	1,7
	Lf (2-20µm)	2,2	2,3	1,9
	Lg (20-50µm)	6,9	7,0	7,7
	S.f (50-200µm)	65,4	58,4	55,5
	S,g (200-2000µm)	23,7	30,5	33,2
Classe texturale		Sableuse	Sableuse	Sableuse
Bilan ionique de l'extrait aqueux 1/5 (még/l)	Na <sup>+</sup>	21,7	21,5	31,2
	K <sup>+</sup>	0,3	0,3	0,3
	Ca <sup>2+</sup>	6,0	6,3	3,4
	Mg <sup>2+</sup>	7,0	7,0	7,1
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,3	0,3	0,3
	Cl <sup>-</sup>	0,6	0,6	0,6
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	32,6	38,0	36,6
Faciès chimique global		Sulfaté sodique	Sulfaté sodique	Sulfaté sodique
Matière organique (%)		0,1	0,1	0,2

La texture du sol est partout sableuse. Le sol est non à peu calcaire ( $1\% \leq \text{CaCO}_3 \leq 2\%$ ) (Baize, 1988) mais les taux de gypse sont élevés en surface et dans la partie médiane du profil ( $8\% \leq \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \leq 35\%$ ). Le sol est à très pauvre en matière organique ( $\text{MO} \leq 1\%$ ) et son pH est alcalin ( $7,6 \leq \text{pH} \leq 8,1$ ). Les valeurs de la conductivité électrique ( $\text{EC}_{1:5}$ ) sont moyennement élevées dans le profil ( $1,5 \text{ dS.m}^{-1} \leq \text{EC}_{1:5} \leq 2 \text{ dS.m}^{-1}$ ), ce qui fait que le sol soit modérément salé. Le faciès chimique global des horizons est sulfaté sodique.

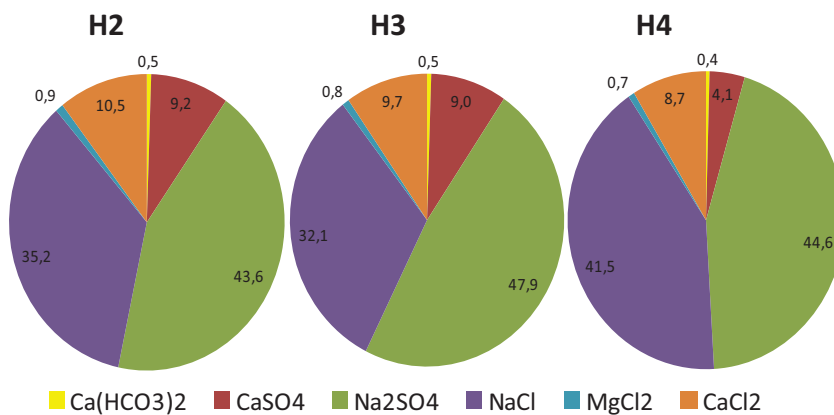
**4.2.1.2.4.1. Répartition des ions dans le profil D1**

La salinité du profil D1 (Figure 4-11a) est relativement homogène (type C). La dominance ionique est attribuée aux cations sodium et aux anions sulfates.



**Figure 4-33. Profils (a) salin, (b) ionique de la parcelle D1**

Les sels  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (45 %) et le  $\text{NaCl}$  (36 %) sont largement dominants dans tous les horizons du profil. Cependant, le  $\text{CaSO}_4$  est moyennement élevés avec 7 % en moyenne. En outre, le chlorure de calcium ( $\text{CaCl}_2$ ) est peu variable autour de 9 % dans le profil.



**Figure 4-34. Répartition des sels dans le profil D1**

#### 4.2.1.2.5. *Caractérisation morphologique et analytique du profil D2-1*

Le profil D2-1 se situe dans une parcelle comportant du palmier dattier, non irriguée et en état d'abondant. Il a été échantillonné le 10 mars 2010 aux coordonnées 716,695 km de longitude et 3536,105 km de latitude.

La surface du sol a été décapée et remaniée pendant les opérations d'aménagement de la palmeraie.



Photo 4-11. Profil D2-

**Ay - 0-15 cm** : couleur 7,5 YR 4/6 (brun fort), faible effervescence à l'HCl, humide, texture sableuse, fines racines et quelques racines mortes, compact, taches blanches de gypse pulvérulent, transition nette et régulière.

**Cky - 15-40 cm** : couleur 7,5 YR 4/6 (brun fort), faible effervescence à l'HCl, sec, texture sablo-limoneuse, fines racines, compact, nombreuses taches blanches de gypse pulvérulent dans tout l'horizon, quelques amas de gypse de petites tailles peu friables, taches de calcaire pulvérulent à effervescence moyenne, transition nette et régulière.

**C - 40-80 cm** : couleur 7,5 YR 5/6 (brun fort), effervescence à l'HCl nulle, humide, texture sableuse, nombreuses racines vivantes, peu compact, transition graduelle et irrégulière.

**Cz - > 80 cm** : couleur 7,5 YR 5/6 (brun fort), effervescence à l'HCl faible, humide, texture sableuse, quelques racines vivantes et de racines mortes, compact.

Tableau 4-14. Résultats des analyses du profil D2-1

Caractéristiques		Horizons			
		Ay	Cky	C	Cz
Profondeur (cm)		0-15	15-40	40-80	> 80
Densité apparente		1,2	1,3	1,3	1,3
Calcaire total (%)		2,2	2,4	4,1	4,4
Gypse (%)		6,8	4,1	5,5	3,7
pHeau 1/5		8,0	7,7	7,8	7,9
pH KCl 1/5		7,8	7,6	7,7	7,9
EC <sub>1:5</sub> (dS/m) à 25 °C		4,4	1,5	1,3	0,5
Humidité (%)		7,4	4,8	9,6	12,5
Granulométrie (%)	A (< 2µm)	1,7	2,0	2,1	2,1
	Lf (2-20µm)	2,0	1,9	1,7	1,9
	Lg (20-50µm)	7,6	7,6	6,8	7,8
	S.f (50-200µm)	57,1	54,6	53,7	49,4
	S,g (200-2000µm)	31,6	33,9	35,6	38,7
Classe texturale		Sableuse	Sableuse	Sableuse	Sableuse
Bilan ionique de l'extrait aqueux 1/5 (méq/l)	Na <sup>+</sup>	32,3	28,1	27,1	25,0
	K <sup>+</sup>	1,2	0,2	0,2	0,2
	Ca <sup>2+</sup>	4,3	2,6	3,1	2,2
	Mg <sup>2+</sup>	31,4	29,7	27,9	26,1
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,2	0,2	0,3	0,4
	Cl <sup>-</sup>	6,1	16,9	13,2	11,7
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	56,1	35,0	39,1	33,2
Faciès chimique global		Sulfaté sodique	Sulfaté magnésien	Sulfaté magnésien	Sulfaté magnésien
Matière organique (%)		0,5	0,6	0,4	0,3

La texture du sol de cette parcelle est sableuse dans tout le profil. Le sol est peu calcaire ( $2\% \leq \text{CaCO}_3 \leq 5\%$ ) (Baize, 1988) et il est modérément gypseux ( $4\% \leq \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \leq 7\%$ ) (FAO, 2006b). Le profil est très pauvre en matière organique ( $\text{MO} \leq 1\%$ ) et son pH du sol est alcalin ( $7,7 \leq \text{pH} \leq 8$ ). La figure 4-13a montre un profil salin ascendant. Les valeurs de la conductivité électrique ( $\text{EC}_{1:5}$ ) sont élevées en surface et faibles en profondeur ( $0,5 \text{ dS.m}^{-1} \leq \text{EC}_{1:5} \leq 5 \text{ dS.m}^{-1}$ ), ce qui rend la salinité très variable dans le profil. Le faciès chimique global est sulfaté magnésien et sodique.

#### 4.2.1.2.5.1. Répartition des ions dans le profil D2-1

Les concentrations des ions (Figure 4-13b) sont plus fortes dans les horizons supérieurs (profil salin de type A), ce qui dénote d'un mouvement ascendant des sels solubles. Le magnésium (25 %) et les sulfates (36 %) sont les ions dominants dans le solum.

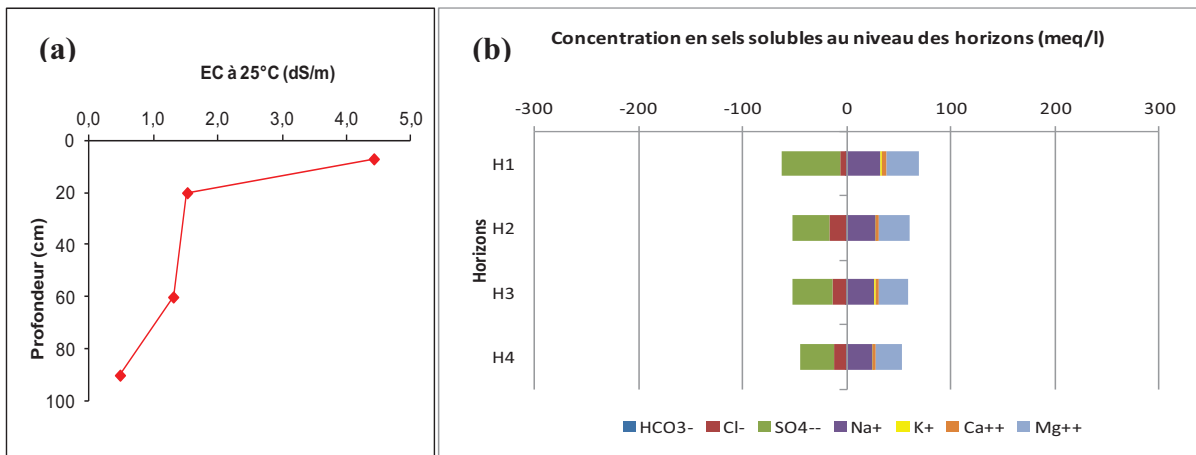


Figure 4-35. Profils (a) salin, (b) ionique de la parcelle D2-1

La concentration des sels dans l'horizon de surface est au profit du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (43 %) et du  $\text{NaCl}$  (27 %). Cependant, le  $\text{CaSO}_4$  est légèrement présent dans les horizons de ce profil mais avec des taux qui ne dépassent pas 4 % (Figure 4-14).

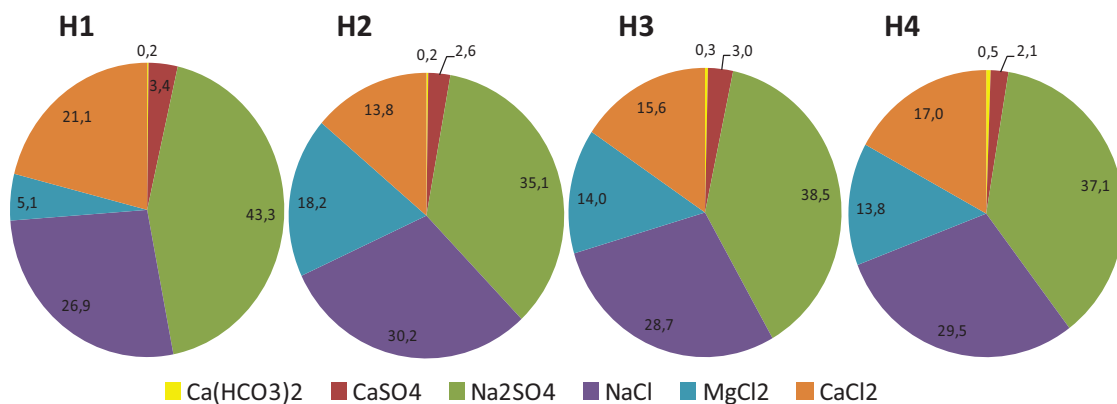


Figure 4-36. Répartition des sels dans le profil D2-1



#### 4.2.1.2.6. *Caractérisation morphologique et analytique du profil B2-1*

Le profil de la parcelle B2-1 est situé dans une parcelle cultivée avec du palmier dattier peu entretenue, irriguée occasionnellement. Il a été échantillonné le 14 mars 2010 aux coordonnées 716,790 km de longitude et 3536,029 km de latitude.



**Photo 4-12. Profil B2-**

**Ayz - 0-7 cm :** couleur 7,5 YR 5/6 (brun fort), faible effervescence à l'HCl, peu humide, texture sableuse, pas de racines, meuble, transition nette et régulière.

**Cy - 7-35 cm :** couleur 7,5 YR 5/6 (brun fort), faible effervescence à l'HCl, sec, texture sableuse, pas de racines, compact, petites taches de gypse pulvérulent, quelques amas de gypse, transition nette et régulière.

**C - 35-80 cm :** couleur 7,5 YR 6/6 (jaune rougeâtre), moyenne effervescence à l'HCl, sec, texture sableuse, nombreuses racines vivantes, compact, transition nette et régulière.

**Cy - > 80 cm :** couleur 7,5 YR 6/6 (jaune rougeâtre), moyenne effervescence à l'HCl, peu humide, texture sableuse, quelques racines vivantes, compact, quelques amas de gypse de petites tailles peu friables avec formation d'un encroûtement gypseux à 110 cm de profondeur, quelques nodules calcaire durs.

**Tableau 4-15. Résultats des analyses du profil B2-1**

Caractéristiques		Horizons			
		Ayz	Cy	C	Cy
<b>Profondeur (cm)</b>		<b>0-7</b>	<b>7-35</b>	<b>35- 80</b>	<b>&gt; 80</b>
<b>Densité apparente</b>		1,3	1,4	1,2	1,2
<b>Calcaire total (%)</b>		2,0	0,6	1,4	1,8
<b>Gypse (%)</b>		20,3	40,3	7,3	5,5
<b>pHeau 1/5</b>		8,2	8,2	7,9	8,0
<b>pH KCl 1/5</b>		8,1	8,1	7,8	7,8
<b>EC<sub>1:5</sub> (dS.m<sup>-1</sup>) à 25 °C</b>		21,7	3,6	0,7	0,7
<b>Humidité (%)</b>		6,5	4,2	2,3	3,1
<b>Granulométrie (%)</b>	<b>A (&lt; 2µm)</b>	1,9	2,1	2,0	2,1
	<b>Lf (2-20µm)</b>	2,0	2,1	2,2	2,0
	<b>Lg (20-50µm)</b>	6,7	6,2	7,1	6,8
	<b>S.f (50-200µm)</b>	48,0	48,7	58,8	60,6
	<b>S,g (200-2000µm)</b>	41,4	40,8	29,9	28,5
<b>Classe texturale</b>		Sableuse	Sableuse	Sableuse	Sableuse
<b>Bilan ionique de l'extrait aqueux 1/5 (még/l)</b>	<b>Na<sup>+</sup></b>	42,3	24,8	23,2	21,1
	<b>K<sup>+</sup></b>	0,5	0,7	0,1	0,1
	<b>Ca<sup>2+</sup></b>	13,6	12,8	2,7	1,4
	<b>Mg<sup>2+</sup></b>	16,5	15,6	11,8	4,0
	<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	0,3	0,2	0,2	0,2
	<b>Cl<sup>-</sup></b>	3,5	1,8	1,1	1,1
	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	64,7	47,9	28,2	19,3
<b>Faciès chimique global</b>		Sulfaté sodique	Sulfaté sodique	Sulfaté sodique	Sulfaté sodique
<b>Matière organique (%)</b>		0,7	0,8	0,9	0,5

La texture du sol est sableuse sur tout le profil. Le sol est non à peu calcaire ( $0,6 \% \leq \text{CaCO}_3 \leq 2 \%$ ) (Baize, 1988) et les taux de gypse sont très élevés, surtout au niveau des horizons de surface et de subsurface ( $5 \% \leq \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \leq 40 \%$ ). Le sol est très pauvre en matière organique ( $0,50 \% \leq \text{MO} \leq 0,9 \%$ ) et son pH du sol est alcalin ( $7,8 \leq \text{pH} \leq 8,1$ ). Les valeurs de la conductivité électrique ( $\text{EC}_{1:5}$ ) sont très fortes surtout en surface ( $0,7 \text{ dS.m}^{-1} \leq \text{EC}_{1:5} \leq 22 \text{ dS.m}^{-1}$ ), ce qui rend le sol légèrement salé à extrêmement salé. Le faciès chimique global est sulfaté sodique.

#### 4.2.1.2.6.1. Répartition des ions dans le profil B2-1

La figure 4-15a montre un profil salin de type A. Les valeurs de la conductivité électrique confirment bien cette tendance. Le profil ionique (Figure 4-15b) indique une dominance cationique et anionique suivante dans le sens  $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$  et  $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^-$ .

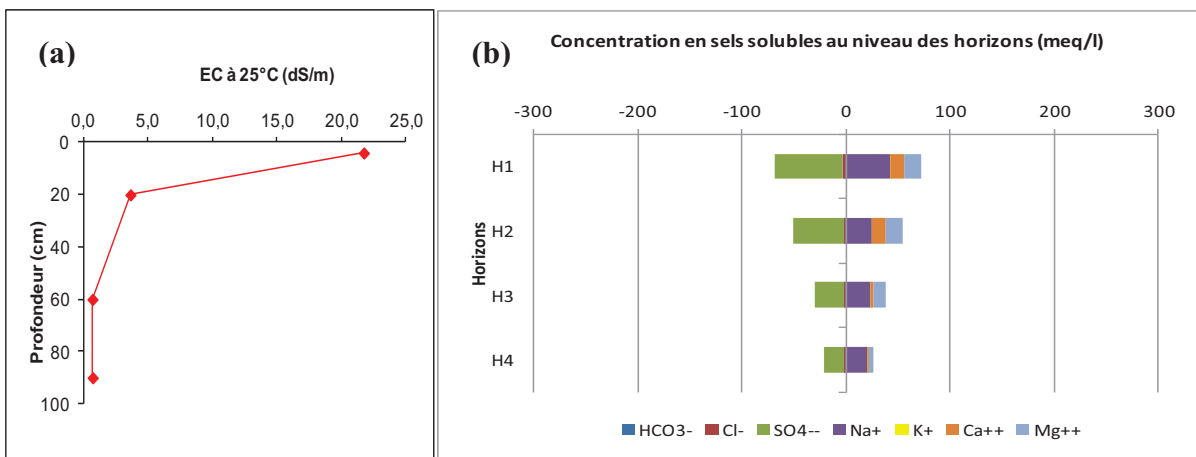


Figure 4-37. Profils (a) salin, (b) ionique de la parcelle B2-1

La figure 4-16 révèle que le  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  et le  $\text{NaCl}$  se démarquent largement par rapport aux autres sels dans le profil. En effet, le  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  est présent dans la majorité des horizons avec des taux qui varient entre 39 % et 42 %, et le  $\text{NaCl}$  occupe plus de 28 % des sels de tous les horizons. Le  $\text{CaSO}_4$  salinise les horizons de surface et de subsurface respectivement à 11 % et 14 %, alors qu'il salinise les horizons de profondeur ( $> 35 \text{ cm}$ ) à moins de 5 %.

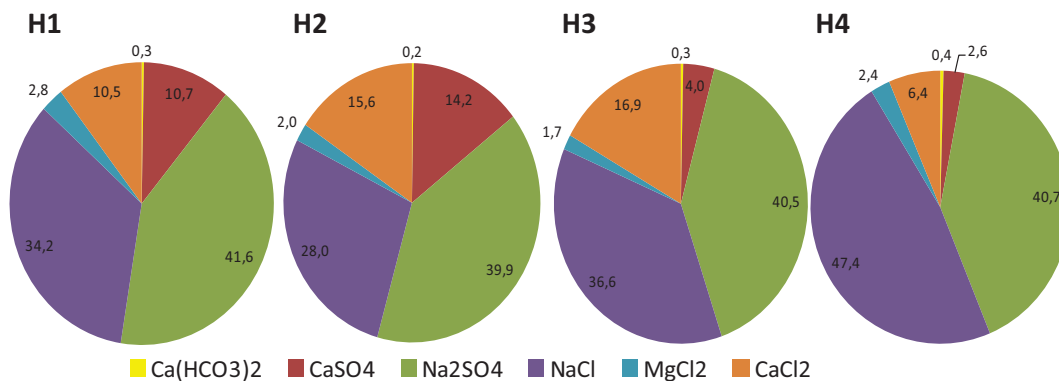


Figure 4-38. Répartition des sels dans le profil B2-1

#### 4.2.1.2.7. *Caractérisation morphologique et analytique du profil B2-2*

La parcelle B2-2 est cultivée avec du palmier dattier mais en état d'abondant. Son profil a été décrit et échantillonné le 8 mars 2010 sous un temps nuageux avec des moments de soleil. Le profil a été ouvert après une nuit de pluie au sud de la palmeraie dans la parcelle la plus élevée. Il se trouve à une longitude de 716,685 km et une latitude de 3535,860 km.



**Az - 0-10 cm** : couleur 7,5YR 6/6 (jaune rougeâtre), effervescence à l'HCl faible, humide sur les 5 premiers centimètres et sec en profondeur, texture sablo-limoneuse, pas de racines, meuble, pas d'accumulation de gypse, pas de cristaux de sels, transition nette et régulière.

**Cy1 - 10-20 cm** : couleur 7,5 YR 6/6 (jaune rougeâtre), effervescence à l'HCl faible, sec, texture sableuse, quelques fines racines mortes, compact, quelques taches de gypse pulvérulent sur toute la matrice de l'horizon, quelques amas de gypse dures, pas de cristaux de sels, transition nette et régulière.

**Photo 4-13. Profil B2-**

**Cy2 - 20-35 cm** : couleur 7,5 YR 6/6 (jaune rougeâtre), pas d'effervescence à l'HCl, sec, texture sableuse, quelques fines racines mortes, compact, quelques concrétions gypseuse, pas de cristaux de sels, transition nette et régulière.

**Ccy - > 35 cm** : couleur 7,5 YR 6/6 (jaune rougeâtre), effervescence à l'HCl faible, peu humide, texture sableuse, nombreuses racines vivantes, compact, quelques taches de gypse pulvérulent, quelques cristaux de gypse, quelques nodules calcaire.

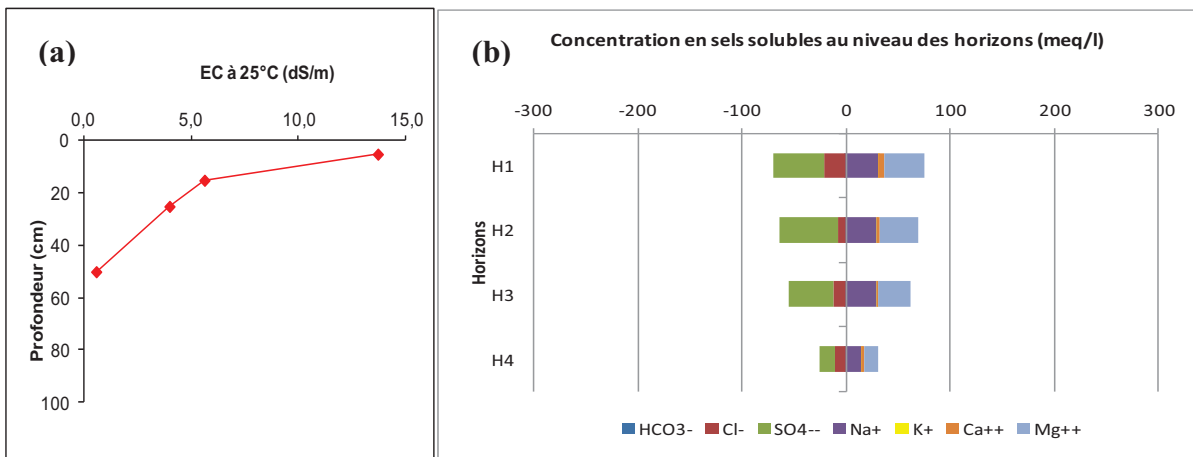
**Tableau 4-16. Résultats des analyses du profil B2-2**

Caractéristiques		Horizons			
		Az	Cy1	Cy2	Ccy
<b>Profondeur (cm)</b>		<b>0-10</b>	<b>10-20</b>	<b>20-35</b>	<b>&gt; 35</b>
<b>Densité apparente</b>		1,3	1,3	1,3	1,4
<b>Calcaire total (%)</b>		1,9	1,6	1,6	1,6
<b>Gypse (%)</b>		6,4	3,7	3,7	17,3
<b>pHeau 1/5</b>		7,9	7,8	7,8	7,9
<b>pH KCl 1/5</b>		7,8	7,7	7,7	7,8
<b>EC<sub>1:5</sub> (dS.m<sup>-1</sup>) à 25 °C</b>		13,7	5,6	4,0	0,6
<b>Humidité (%)</b>		9,6	5,6	10,3	2,6
<b>Granulométrie (%)</b>	<b>A (&lt; 2µm)</b>	2,0	2,0	2,0	2,0
	<b>Lf (2-20µm)</b>	2,3	2,8	2,8	2,0
	<b>Lg (20-50µm)</b>	6,0	6,2	6,2	7,3
	<b>S.f (50-200µm)</b>	48,4	48,9	48,9	50,5
	<b>S,g (200-2000µm)</b>	41,4	40,2	40,2	38,1
<b>Classe texturale</b>		Sableuse	Sableuse	Sableuse	Sableuse
<b>Bilan ionique de l'extrait aqueux 1/5 (még/l)</b>	<b>Na<sup>+</sup></b>	31,2	29,3	28,9	14,1
	<b>K<sup>+</sup></b>	0,3	0,3	0,1	0,1
	<b>Ca<sup>2+</sup></b>	5,0	2,9	2,3	3,3
	<b>Mg<sup>2+</sup></b>	39,2	37,1	30,6	13,7
	<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	0,3	0,4	0,4	0,2
	<b>Cl<sup>-</sup></b>	20,2	7,5	11,6	10,1
	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	48,8	56,2	42,6	15,3
<b>Faciès chimique global</b>		Sulfaté magnésien	Sulfaté magnésien	Sulfaté magnésien	Sulfaté sodique
<b>Matière organique (%)</b>		0,3	0,1	0,1	0,7

La texture du sol est en totalité sableuse. Le sol de cette parcelle est hypocalcaire ( $1\% \leq \text{CaCO}_3 \leq 2\%$ ) (AFES, 2008), les taux de gypse par contre sont élevés ( $3\% \leq \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \leq 18\%$ ) (Tableau 4-9). Le sol est pauvre à très pauvre en matière organique ( $\text{MO} \leq 1$ ) avec un pH alcalin ( $7,8 \leq \text{pH} \leq 8$ ). Les valeurs de la conductivité électrique ( $\text{EC}_{1:5}$ ) sont très élevées surtout en surface ( $0,6 \text{ dS.m}^{-1} \leq \text{EC}_{1:5} \leq 14 \text{ dS.m}^{-1}$ ), ce qui rend le sol légèrement salé à extrêmement salé. Le faciès chimique de ce profil est dans sa majorité sulfaté magnésien.

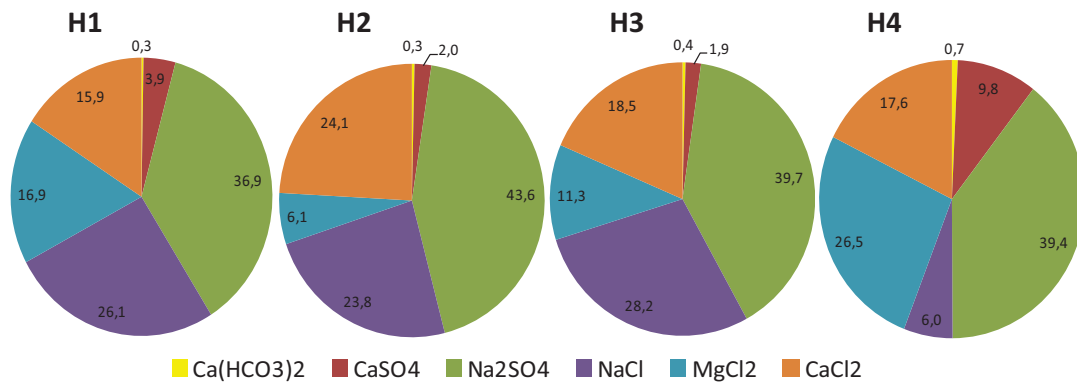
**4.2.1.2.7.1. Répartition des ions dans le profil B2-2**

La salinité du profil B2-2 (Figure 4-17a) est importante en surface (profil salin type A). Elle s'exprime par un mouvement ascendant des cations et des anions (Figure 4-17b) avec une dominance décroissante des cations  $\text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$  et des anions  $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^-$ .



**Figure 39. Profils (a) salin, (b) ionique de la parcelle B2-2**

La figure 4-18 indique que c'est le  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  qui a une notable présence dans le profil. Son taux varie entre 37 % en surface et 40% en profondeur ( $> 10 \text{ cm}$ ). Les sels  $\text{NaCl}$  et le  $\text{CaCl}_2$  sont fortement présent aussi dans ce profil avec respectivement une moyenne de 21 % et de 19 % des sels totaux du profil. En revanche, le  $\text{CaSO}_4$  est à moins de 5 % en moyenne dans tout les horizons du profil.



**Figure 4-40. Répartition des sels dans le profil B2-2**



#### 4.2.2. Caractéristiques des eaux d'irrigation

L'irrigation de la palmeraie est assurée par les eaux des forages du Mio-Pliocène et du Sénonien (Tableau 4-10).

- Le Mio-Pliocène qui est légèrement artésien et qui possède un débit de 40 l/s est le forage le plus ancien (réalisé en 1959). Il est situé à proximité de la parcelle A1 (Figure 3-7). Les parcelles irriguées à partir de ce forage sont les parcelles "A" et occasionnellement "C" alors que la grande partie de cette eau est destinée aux besoins de l'université et à l'irrigation de son espace vert.

- Le forage du Sénonien, réalisé en 1986, est situé au sud-est de la parcelle B2-1 (Figure 3-7). Il a un débit de 18 l/s avec une température de 18 C°.

**Tableau 4-17. Résultats de l'analyse des eaux des forages**

Forages	EC à 25°C (mS.cm <sup>-1</sup> )	SAR	pH	cations (méq/l)				anions (méq/l)		
				Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Mio-Pliocène	5,3	6,9	7,3	26,3	0,1	6,0	22,8	1,2	13,2	43,2
Sénonien	3,7	12,4	8,1	40,1	0,2	7,6	13,2	3,0	25,4	29,5

Selon le digramme de classification des eaux d'irrigation de Riverside (US. Salinity Laboratory Staff, 1954), modifié par Durand (1983) (cf. Figure 6-annexe I), les eaux du forage du Mio-Pliocène appartiennent à la classe C5S3. Cette eau devrait être utilisée sur des sols à texture grossière avec beaucoup de précautions. Son utilisation est sans risque pour le palmier dattier qui pourrait supporter des salures allant jusqu'à 15 mS.cm<sup>-1</sup> (Durand, 1983).

Les eaux du forage du Sénonien appartiennent à la classe C4S4 (US. Salinity Laboratory Staff, 1954). C'est une eau qui doit être apportée en excès vu son fort danger d'alcalinisation. Elle est néanmoins tolérée sur des sols très perméables.

### 4.2.3. Caractéristiques de l'eau de la nappe phréatique

Les eaux de la nappe phréatique ont été échantillonnées au niveau de chaque piézomètre. Les résultats sont regroupés dans le tableau 4-11.

**Tableau 4-18. Résultats d'analyses de l'eau de la nappe phréatique**

Piézomètres	EC à 25°C (mS.cm <sup>-1</sup> )	SAR	pH	cations (még/l)				anions (még/l)		
				Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
E2	34,0	33,7	8	214	0,8	11,9	68,6	8,2	217,5	71,2
F	8,8	8,8	7,5	42,8	0,7	31,0	16,2	4,5	59,8	21,6
A2	12,5	11,3	7,4	64,2	0,7	27,6	37,3	4,5	75,4	47,6
C2	19,7	18,0	7,7	103,1	0,3	22,7	42,9	7,5	94,0	63,6
B1	4,6	5,3	7,2	31,2	1,2	29,6	40,4	3,0	77,8	26,0
D1	8,2	8,2	7,3	36,8	1,2	26,5	13,5	5,0	18,8	51,9
B2-1	7,5	7,1	7,2	44,8	1,3	27,6	41,5	6,0	90,2	13,0

Les eaux phréatiques sont extrêmement salées. Les valeurs de la conductivité électrique peuvent atteindre 34 mS.cm<sup>-1</sup> dans le piézomètre de la parcelle nue (E2) qui présente aussi un danger d'alcalisation avec un SAR de 34. En plus, ces eaux sont fortement alcalines (pH<sub>eau</sub>=8). Dans les piézomètres des parcelles cultivées, les eaux sont également extrêmement salées (7,5 mS.cm<sup>-1</sup> ≤ EC ≤ 20 mS.cm<sup>-1</sup>) avec un pouvoir alcalisant moyen (SAR < 10). Il est cependant admis, dans cette palmeraie et dans d'autres palmeraies à Ouargla, de ne pas utiliser les eaux de cette nappe superficielle.

### 4.3. Conclusion partielle

L'étude des neuf (9) profils (Figure 3-7) de sols de cette palmeraie indique que les sols sont caractérisés par une texture sableuse et une structure particulière. Leur teneur en matière organique est très faible dans tous les horizons (< 0,5 %). Les racines du palmier dattier des parcelles cultivées sont regroupées entre 35 et 60 cm de profondeur.

La description morphologique des profils a révélé la présence d'accumulations salines dans la plupart des horizons de cette palmeraie, allant de quelques cristaux de sels dans la matrice de l'horizon à une accumulation sous forme d'une couche de quelques centimètres d'épaisseur (Profil F).

Les analyses physicochimiques ont révélé que les parcelles non irriguées ont une forte conductivité électrique (EC<sub>1:5</sub>) par rapport aux parcelles irriguées. La nappe phréatique fluctuante située à faible profondeur et le fort pouvoir évaporant de cette zone sont responsables de cette salinisation. La parcelle occasionnellement irriguée (B2-1) est la plus affectée par la salinité dans son horizon de surface.

Plusieurs sols de cette palmeraie, surtout dans la partie nord et centre, contiennent en profondeur des taux élevés en gypse allant jusqu'à l'encroûtement. Les parcelles irriguées sont les plus affectées par ce paramètre. Les horizons de sols de cette palmeraie sont dans leurs majorités hypocalcaires (< 15 %).

Les analyses physicochimiques des eaux de la nappe phréatique fluctuante indiquent que les sols de cette palmeraie sont menacés par une salinisation primaire due à la forte conductivité électrique ( $13 \text{ mS.cm}^{-1}$  en moyenne) des eaux de la nappe. Par ailleurs, les eaux d'irrigations des forages du Mio-Pliocène ( $5 \text{ mS.cm}^{-1}$ ) et du Sénonien ( $4 \text{ mS.cm}^{-1}$ ) présentent également un risque de salinisation secondaire qui limiterait leur utilisation sans aménagements et précautions.

**Dynamique spatiotemporelle de la salinité de sols sableux irrigués en milieu aride**

**Application à une palmeraie de la cuvette de Ouargla en Algérie**

**CHAPITRE 5 - QUANTIFICATION DES VARIATIONS SPATIALES ET  
TEMPORELLES DE LA SALINITE DES SOLS PAR SUIVI  
ELECTROMAGNETIQUE**

*"A pessimist sees the difficulty in every opportunity; an optimist sees the opportunity in every  
difficulty"*

Winston Churchill

Ce chapitre comprend essentiellement un article publié dans la revue *Soil Research*, constituant *in extenso* le chapitre 5.

## SEASONAL MONITORING OF SOIL SALINITY BY ELECTROMAGNETIC CONDUCTIVITY IN IRRIGATED SANDY SOILS FROM A SAHARAN OASIS

Ismaïel Berkal <sup>A, B, \*</sup>, Christian Walter <sup>A</sup>, Didier Michot <sup>A</sup>, Kaddour Djili <sup>C</sup>

**A** Agrocampus Ouest, INRA, UMR 1069 Sol Agro et hydrosystème Spatialisation, F-35000 Rennes, France

**B** Univ Ouargla, Fac. des sciences de la nature et de la vie, Lab. de Recherche sur la Phœniciculture, Ouargla 30 000, Algeria

**C** École Nationale Supérieure Agronomique - Algiers, Hacén Badi El Harrach 16051, Algeria

\* Corresponding author e-mail: [berkal.is@univ-ouargla.dz](mailto:berkal.is@univ-ouargla.dz)

**ABSTRACT:** Monitoring soil salinity over time is a crucial issue in Saharan oases to anticipate salinization related to insufficient irrigation management. This project tested the ability of electromagnetic conductivity (EM) surveys to describe, by means of regression tree inference models, spatiotemporal changes in soil salinity at different depths within a complex 10 ha pattern of irrigated plots in an Algerian oasis. Soils were sandy Aridic Salic Solonchaks with a fluctuating saline water table at less than 2 m. Apparent electrical conductivity (EC<sub>a</sub>) was measured by a EM38 device at fixed 10 m or 20 m intervals (2889 points) at four sampling dates between March 2009 and November 2010. For calibration and validation purposes, soil salinity was measured from a 1:5 diluted extract (EC<sub>1:5</sub>) in three layers (0-10, 10-25, 25-50 cm) at 30 of these points randomly chosen at each date. EC<sub>a</sub> measurements were used to predict EC<sub>1:5</sub> using calibration regression trees created with the software Cubist, including either parameters specific to the study site (specific model) or more general parameters (general model), allowing extrapolation to other sites. Performance of regression tree predictions was compared to predictions derived from a multiple linear regression (MLR) model adjusted for each date using the software ESAP. Results show that salinity was better predicted by Cubist regression tree models than MLR models. For the deep (25-50 cm) layer, Cubist models were more accurate with the specific model ( $r^2 = 0.8$ , RMSE = 1.6 dS/m) than the general model ( $r^2 = 0.4$ , RMSE = 2.5 dS/m). Prediction accuracy of both models decreased from the bottom to the top of the soil profile. Salinity maps showed high inter-plot variability which was captured better by the more flexible regression tree inference models than the classic MLR models, but they need to build site specific prediction models. Overall, the monitoring surveys, combined with the Cubist prediction tool, revealed both the seasonal dynamics and spatial variability of salinity at different depths.

**Additional keywords:** EM38, oasis ecosystem, arid climate, sandy soil, water table, irrigation, salinity

## 5.1. INTRODUCTION

Oases are highly vegetated zones surrounded by vast arid or desert areas. The local existence of permanent water or irrigation systems is an essential condition that ensures their permanence. Within arid zones, which represent 5.1 billion ha globally, oases occupy a small percentage of the area (ca. 5%) but include most human populations and economic activities (UNESCO, 2002; Pan and Chao, 2003).

Nearly 80% of Algeria lies in the hyper-arid zone, with another 15% in the arid zone (Halitim, 1985). The oasis ecosystem, with more than 17 million date palms, is an essential element of arid regions of Algeria and represents the linchpin of all sustainable development of the Saharan environment. Traditional oases (of so-called Ksourian type) combine dense palm plantations with underlying forage or garden crops and attempt rational use of water as a rare resource in an arid environment. However, the discovery in the 1950s of abundant deep water resources allowed development of intensive production-oriented oases based on highly irrigated palm monocultures. Paradoxically, the problem in many of this new type of oasis became an excess or poor management of water (Côte, 1998). Poor water quality and insufficient irrigation management at field and oasis scales appear therefore to be the most important factors in the progressive degradation of this ecosystem (Toutain, 1979; Toutain *et al.*, 1990; Daoud and Halitim, 1994; Côte, 1998; Hachicha *et al.*, 2000; Djili *et al.*, 2003; Idder, 2007; Abdel-Razek *et al.*, 2010).

Indeed, in the northern Sahara, the oasis environment is currently facing primary salinization of soil caused by capillary rise of saline water from shallow groundwater, but also secondary soil salinization by irrigation with saline water. According to Daoud and Halitim (1994), irrigation can leave 12 t of salt per ha in the soil at the end of a wheat crop and 40-60 t salt per ha in date-palm soils according to the salt content of applied water. It is therefore important to be able to detect changes in salinity in space and time as a function of cropping and irrigation practices and site-specific characteristics. This can be done only with efficient monitoring strategies which may be implemented at relatively low cost.

Geophysical field exploration that measures the apparent electrical conductivity (ECa) of the soil has proven to be well-adapted to estimate soil salinity in a large volume without disturbance and at high spatial resolution. It is a reliable measure often used to describe edaphic properties spatially (Corwin and Lesch, 2005a, 2005b). One method of ECa electromagnetic (EM) induction measured with a meter such as the EM38 (Geonics Ltd., Mississauga, Ontario, Canada) (Rhoades, 1992; Rhoades *et al.*, 1999) can be used without contacting the soil, making it particularly suited to the sandy soils of palm plantations. Many authors have used EM surveys to describe the fine spatial variability of soil salinity while increasing measurement resolution and to decrease the difficulty inherent in classical sampling and measurement approaches (Wollenhaupt *et al.*, 1986; Slavich, 1990; McNeill,



1992; Bennett and George, 1995; Lesch *et al.*, 1995a ; Rhoades *et al.*, 1999; Triantafilis *et al.*, 2000; Corwin and Lesch, 2005a; Amezket, 2007a, 2007b; Dang *et al.*, 2011).

In arid and semi-arid regions, where salt can rise due to groundwater fluctuations and soil may be irrigated with saline water, ECa is correlated with salinity. Nevertheless, intrinsic soil properties and short-term fluctuations in soil temperature and moisture may noticeably influence ECa values, which can complicate interpretation of ECa variations (Friedman, 2005; Samouelian *et al.*, 2005; Besson *et al.*, 2008). While many studies have used EM mapping to describe spatial variability in space at a given time, temporal monitoring has been the subject of few studies, namely Diaz and Herrero (1992) in two fields of an irrigated area in Flumen (Aragon, Spain), Lesch *et al.* (1998) in calcareous soils with coarse-silty, coarse-loamy and loamy textures under rice and maize crops, also in Flumen). Lesch *et al.* (1998) developed a reference methodology for monitoring salinity within a given field, based on an initial EM grid survey and construction of a salinity prediction model using a punctual dataset of effective electrical conductivity (ECe) measurements and multiple linear regression (MLR) linking ECe to EM readings and spatial coordinates. In their approach, temporal changes in salinity are based on repeated ECe soil measurements over time of a portion of the initial EM grid and the overall mean change in salinity is tested using mixed linear ANOVA. The approach is implemented in the software program ESAP (Lesch *et al.*, 2000) which is freely distributed by the United States Department of Agriculture.

Nevertheless, methodology developed in existing studies can be improved in at least two ways: (i) using repetitive ECe sampling and EM38 surveys to infer changes in soil salinity over time and (ii) using a flexible regression approach that can adapt to complex space and time segmentation. These improvements should increase the accuracy of salinity predictions in oasis irrigation plans that contain small plots with different cropping practices, water input and soil conditions.

We considered regression tree inference models as good candidates of such flexible regression approach. Initially developed by Breiman *et al.* (1984), tree-based models proceed to a binary recursive partition of the predictor's space into a number of disjoint regions. In the case of regression trees, linear models are fitted to each region. Predictors and split points are chosen to minimize prediction errors. According to Friedman and Meulman (2003), regression trees have interesting features for predictive learning: (i) they can handle input variables of all types (numeric, ordinal, binary and categorical) equally well; (ii) they are non-parametric and therefore no hypothesis is required regarding variable distribution and they are not sensitive to outliers; (iii) they can handle numerous predictors and take into account interactions between them. Therefore they are more and more considered as a relevant approach for predicting spatio-temporal variations of soil properties (McBratney *et al.*, 2003; Lacoste *et al.*, 2011; Lemerrier *et al.*, 2012).

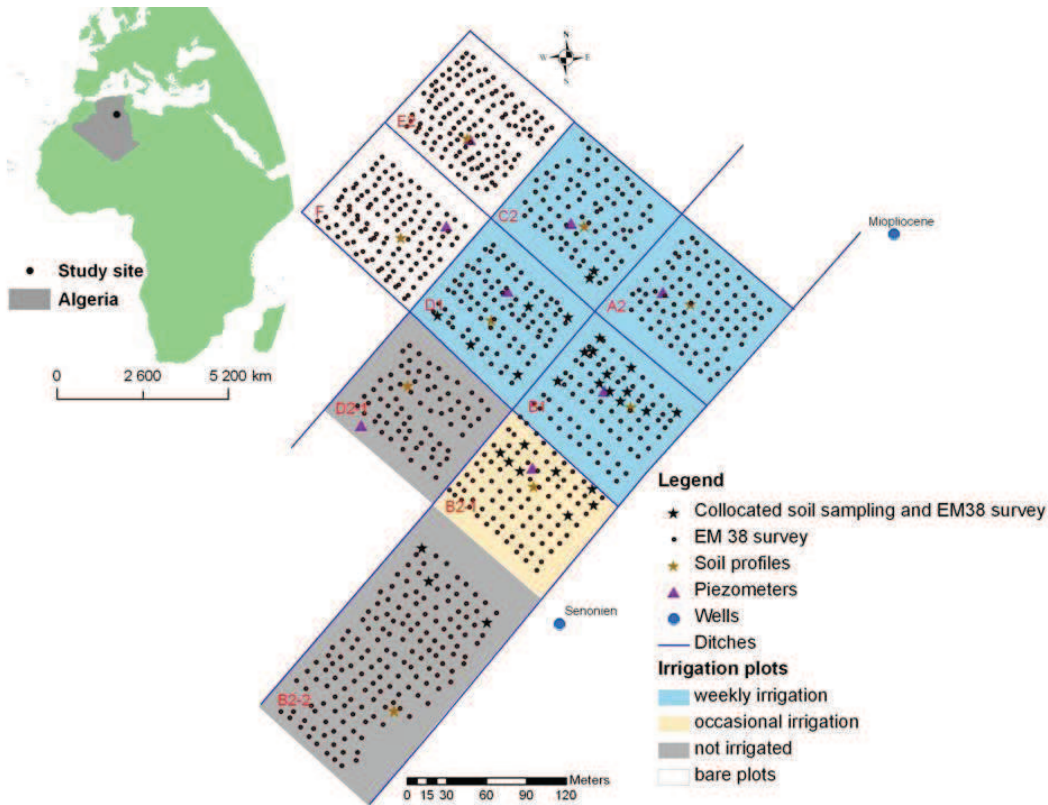
The aim of our study was therefore to test the ability of EM conductivity surveys to describe, by means of regression tree inference models, spatiotemporal changes in soil salinity at different depths within a 10 ha irrigated palm grove in the Ouargla oasis, Algeria. The prediction accuracy of this approach was compared to that of a reference methodology developed by [Lesch \*et al.\* \(1998\)](#).

## 5.2. MATERIALS AND METHODS

### 5.2.1. Study site

The study site is located in an experimental plantation at the University of Ouargla, Algeria (31°56'25" N, 5°17'34" E) (Fig. 5-1). Located in a fossil valley, this plantation covers 10 ha and was planted in 1959 almost exclusively with date palms (*Phoenix dactylifera*) in 9 m × 9 m squares; it also has an adjacent area of bare soil. It is located along a low slope (< 0.5 %) with a 2-m difference in height between the highest point (in southern plot B2-2) and the lowest point (in eastern plot A2) (Fig. 5-1). The climate is Saharan with mild winters and a high annual water deficit (ETP - P = 3781 mm). Rain is rare and irregular, with an annual mean of 38.7 mm. Mean annual temperature is 23.4°C, with a maximum monthly mean of 43.7°C in July and a minimum of 4.9°C in January ([ONM, 2010](#)).

The study site is subject to fluctuations of saline groundwater (13 dS/m on average) whose level varies with the season and location within the site, in a range from 0.2-2.4 m deep. This groundwater is part of a large shallow aquifer covering the Ouargla depression which fluctuates seasonally due to waste water removals from households and irrigation drainage water ([Idder, 2007](#)). A flood-irrigation network ([Durand, 1983](#); [Zaid and Arias-Jiménez, 2002](#)) is fed by two wells, one reaching the calcareous groundwater of an upper Cretaceous (Senonien) layer (EC = 3.7 dS/m, SAR = 12.4) and the other the groundwater of Mio-Pliocene sands (EC = 5.3 dS/m, SAR = 6.9) (Fig. 5-1). According to the plot considered, irrigation varies from 0-8.1 mm/week in July and August and 0-5.8 mm/week the rest of the year. Drainage is provided by ditches of 1 m depth, which are insufficient to prevent groundwater rise in the plots.



**Fig. 5-41.** Map of the study site with locations of the geophysical survey and soil sampling points for the second monitoring date (October 2009).

### 5.2.2. Soil characteristics

Each of the 9 plots studied was described with a soil profile 100 cm deep (Fig. 5-1). All soils are Aridic Salic Solonchaks according to the World Reference Base (FAO, 2006a) and differ mainly in their gypsum and salt accumulations. Soil samples for laboratory analyses were taken from four soil layers (0-10, 10-25, 25-50, 50-100 cm). The soils have a sandy texture (90% sand) and a constant bulk density ( $1.3 \text{ g/cm}^3$ ) throughout the profile (Table 1). Mean gypsum content ranges from 18-26 %, but its horizontal and vertical spatial variability is high and increases with depth ( $\text{CV} = 83 \%$ ). Organic matter content is low ( $< 0.5 \%$ ) throughout the profile. Electrical conductivity of 1:5 aqueous extracts ( $\text{EC}_{1:5}$ ) decreases from 13.6 dS/m at the surface to 6.7 dS/m in the 50-100 cm layer, indicating higher salinity in the topsoil. Observations of the palm root system indicate a generalized concentration of roots between 25 and 50-60 cm depth in relation to regular plowing of the surface layer and the presence of water table or gypsum concretions at depth.

**Table 5-19. Mean values ± standard deviation of soil properties at four depths measured in nine profiles within the study area.**

Depth (cm)	Clay	Silt (%)	Sand	Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )	Gypsum (%)	EC <sub>1:5</sub> (dS/m)	OM (%)
0-10	1.5 ± 0.7	7.9 ± 1.8	90.6 ± 2.2	1.3 ± 0.1	17.8 ± 14.1	13.6 ± 9.2	0.4 ± 0.2
10-25	1.5 ± 0.6	7.8 ± 1.9	90.7 ± 2.2	1.3 ± 0.1	20.9 ± 16.7	11.7 ± 8.9	0.4 ± 0.2
25-50	1.9 ± 1.9	7.8 ± 1.9	90.3 ± 2.2	1.3 ± 0.1	23.5 ± 18.6	9.2 ± 8.0	0.5 ± 0.4
50-100	2.6 ± 2.5	7.9 ± 2.0	89.5 ± 2.6	1.3 ± 0.1	25.7 ± 21.5	6.7 ± 6.8	0.4 ± 0.2

EC<sub>1:5</sub>, electrical conductivity of 1:5 diluted extract; OM, organic matter

### 5.2.3. Geophysical survey and soil sampling

Four surveys were conducted in March 2009, October 2009, March 2010 and November 2010 using an EM38. Systematic sampling was performed on transects spaced 9 m apart and equidistantly located between palm rows. EM38 data were complemented by EC<sub>1:5</sub> soil salinity assessments used for calibration and cross-validation datasets (Fig. 5-1). At each date, mean soil temperature (T<sub>soil</sub>) was calculated in each plot from 3 temperature measurements (5, 10 and 30 cm deep) using a soil depth thermometer.

The first geophysical survey (“date 1”), performed in March 2009, aimed to determine the initial state of salinity in the palm plantation. The EM38 conductivity meter was placed on the soil to measure apparent conductivity (mS/m) in vertical dipole (ECaV) and horizontal dipole (ECaH) modes, representing theoretical investigation depths of 150 and 75 cm, respectively (McNeill, 1992; Allred *et al.*, 2008). Measurements were taken every 20 m along the transects (n = 438). All sites were georeferenced using a Garmin 72 GPS receiver.

To monitor seasonal salinity dynamics and its drivers, three other surveys were performed (October 2009, March and November 2010), which allowed coverage of a complete hydrological cycle. Since variography analysis of the initial EM survey indicated a relatively high nugget to sill ratio (28%), sampling density was increased (measurements every 10 m) to improve the spatial resolution. EM survey points were relocated at each date with sub-meter accuracy.

To compare ECa maps obtained at different dates and soil-surface temperatures (Michot *et al.*, 2003), ECaV and ECaH values were standardized to a temperature of 25 °C using the equation of Campbell *et al.* (1948):  $\sigma T = \sigma 25^{\circ}\text{C} [1 + \alpha (T - 25^{\circ}\text{C})]$ , where  $\sigma T$  is ECa at temperature T,  $\sigma 25^{\circ}\text{C}$  is ECa at 25 °C, and  $\alpha$  (= 0.02) is a temperature coefficient.

During each survey, 30 soil samples were taken at randomly selected EM38 measurements sites (Fig. 5-1). Additional samples were taken at date 1 and 2 to study the within-plot variability and estimate the variogram over short distances, but were not included in the model construction. Thus, samples from each date came from different locations. At

each location, samples were taken at 3 depths (0-10 cm = “surface”, 10-25 cm = “sub-surface”, 25-50 cm = “deep”) to determine EC<sub>1:5</sub> and gravimetric water content (w) according to NF ISO 11265 and 11465, respectively (AFNOR, 1999). Four sites from date 1 were excluded due to labeling errors. The 348 samples analyzed constituted the calibration dataset for this study.

#### 5.2.4. Groundwater monitoring

Groundwater monitoring was performed from October 2009 to December 2010 with 8 piezometers installed to a depth of 3 m in each plot (Fig. 5-1).

#### 5.2.5. Salinity prediction

Models predicting salinity at different depths were developed with the Spatial MLR module of ESAP version 2.35 R (Lesch *et al.*, 2005) and the statistical prediction software Cubist (Quinlan, 1993; Rulequest Research, 2007). Models were acquired independently at each depth considering successively EC<sub>1:5</sub> measured at 0-10 cm, 10-25 cm and 25-50 cm as dependent variable.

Prediction models were first built as references using the stochastic calibration module of ESAP, as described by Lesch *et al.* (1998). For each date and depth, a MLR model predicting EC<sub>1:5</sub> was constructed assuming that a linear relationship exists between EC<sub>1:5</sub> and transformed EM readings. Additional trend surface parameters were also included in the MLR to account for lateral trends in the EM signal not related to the variability of soil salinity. A MLR salinity prediction model with first-order trend surface parameters is defined as:

$$EC_{1:5} = b_0 + b_1 z_1 + b_2 z_2 + b_3 u + b_4 v + \varepsilon \quad (1)$$

where  $z_1$  and  $z_2$  are defined as  $z_1 = \ln(ECaV) + \ln(ECaH)$ ,  $z_2 = \ln(ECaH) - \ln(ECaV)$ , variables (u,v) represent spatial coordinates of each survey site, and  $\varepsilon$  represents the residual component. Parameters were estimated by ordinary least squares optimization and model accuracy was analyzed by a cross-validation procedure to estimate root mean square errors (RMSE) between prediction and measurement.

Cubist models are explicit regression trees that describe relations between independent and dependent variables using rules associated with multivariate linear models. Several variable combinations are tested until the best model is obtained (i.e., low error, high correlation coefficients). This model can be more powerful than a single multivariate linear model because it allows variables to be weighted differently when conditions change (Rulequest Research, 2007).

The models constructed by Cubist are evaluated with a 10-fold cross-validation of the training data. Cubist calculated four error indices for three evaluation datasets to assess model accuracy. For each dataset, mean absolute error (MAE), relative error, RMSE, and Pearson's correlation coefficients ( $r$ ) were calculated. The mean of each of these indices was calculated to provide a more reliable estimate of model accuracy.

From the ECaV and ECaH data and the set of EC<sub>1:5</sub> measured at the three depths during each of the four monitoring dates, we constructed two models to predict EC<sub>1:5</sub> at each depth. The first was a model specific to the study site, in which a maximum number of descriptive variables of the local context were assumed to be available. The second is a general model that relies on a small number of easily available variables, which should allow for easier extrapolation outside the study site. The explanatory variables for potential selection as input in the specific model included (i) lnECaV and lnECaH, (ii) soil moisture in the layer considered; (iii) mean gypsum content in the three depths sampled in each plot, (iv) elevation of the plot and (v) date and plot indicator variables. The variables for potential inclusion in the general model were (i) lnECaV and lnECaH, (ii) soil moisture in the layer considered, (iii) mean gypsum content in the three depths sampled and (iv) elevation of the plot.

#### **5.2.6. Statistical testing and mapping**

We used descriptive statistics to identify significant differences in ECa, EC<sub>1:5</sub> and predicted salinity over time. We also performed two-way paired t-tests on EM measurements and two-way unpaired t-tests on EC<sub>1:5</sub> sample data to compare means between dates ( $\alpha = 0.05$ ).

Maps of the EM survey were developed with ArcGIS 9.3 (ESRI, 2009) by lognormal ordinary kriging of ECaH and ECaV values. Salinity ranges were chosen based on standards proposed by Durand (1983) for EC<sub>1:5</sub>, who adapted those of the United States Salinity Laboratory (US. Salinity Laboratory Staff, 1954) for saturated soil-paste extracts (EC<sub>e</sub>) with the formula  $EC_e = EC_{1:5} \times f$ , where  $f = 18.8$  for sandy soils. We subdivided the last category (extreme) into three categories to map spatial and temporal variations at more fine scale.



### 5.3. RESULTS

#### 5.3.1. Groundwater monitoring

Piezometric monitoring from October 2009 to December 2010 showed fluctuations in mean groundwater levels ranging from 1.9-0.8 m deep (Fig. 5-2): groundwater was deepest during October and November of each year; the mean level then progressively increased and remained relatively stable at 1.0 m deep between March and September 2010. Differences in piezometric levels on the same date ranged from 20 cm to 1 m (Fig. 5-2) and were greatest while the mean level progressively increased (November-January) and just before it began to decrease (August 2010). Groundwater level was always closest to the surface in piezometers located in downhill plots.

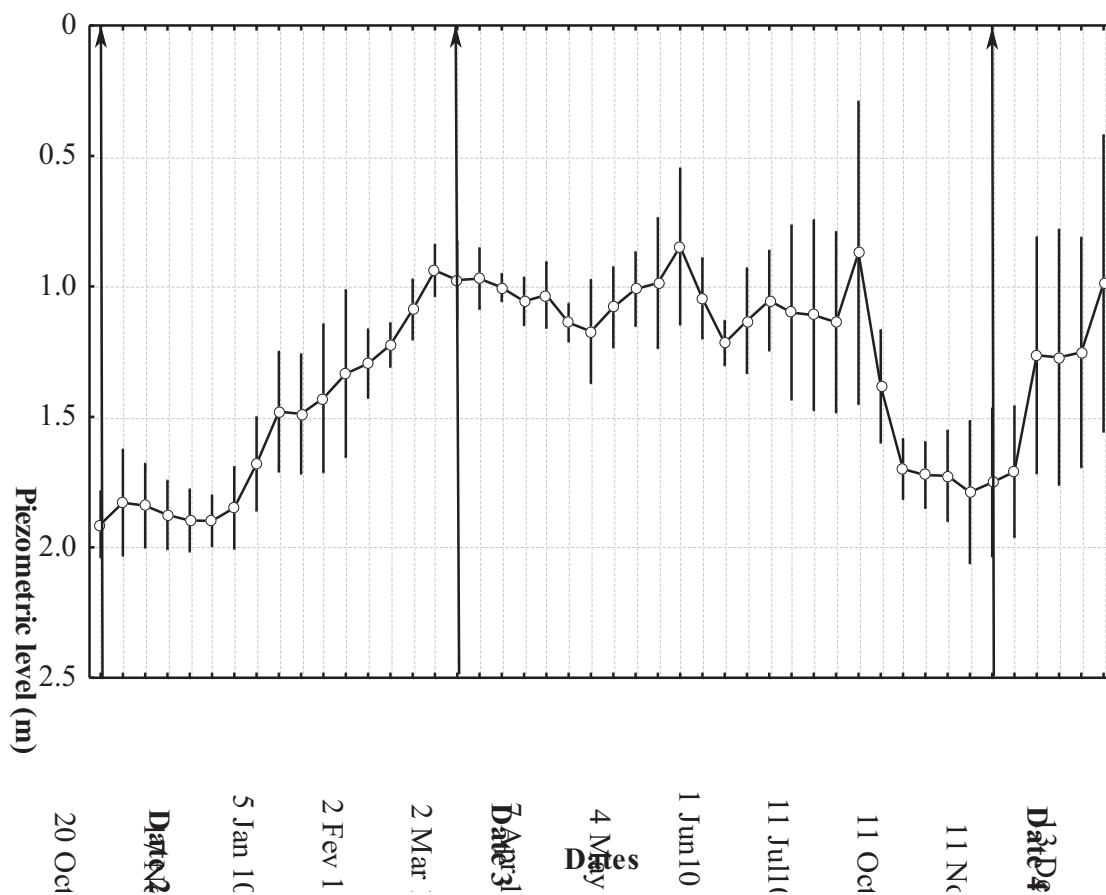


Fig. 5-42. Weekly mean and range of groundwater level measured in 8 piezometers between October 2009 and December 2010.



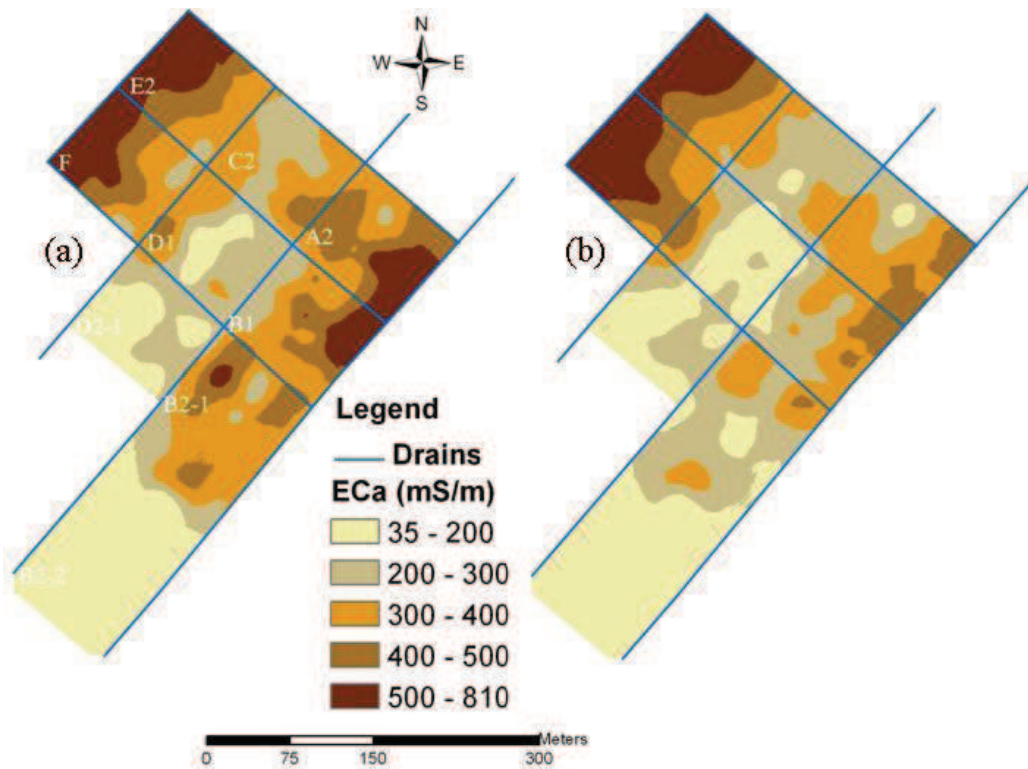
### 5.3.2. Initial spatial variability of ECa measurements

During the first EM38 survey in March 2009, ECa values were highest for both ECaV and ECaH components (Table 5-2). A  $\chi^2$  test of standardized measurements indicated that the distributions of ECaV and ECaH were lognormal ( $\alpha = 0.05$ ). Lognormal kriging maps (Fig. 5-3) derived from the initial survey data reveal high spatial variability of ECa both at the surface and at depth (35-810 mS/m). They also show similar spatial distribution of ECa between surface and deep layers, the locations most conductive at the surface being so at depth. In addition, they show that irrigated plots are markedly more conductive than non-irrigated plots, both at the surface and at depth. Bare, and thus non-irrigated, plots have the same trends at the surface and at depth. The maps show a strong gradient of ECa classes in non-irrigated plots from the southeast (300-400 mS/m) to the northwest (500-810 mS/m). This gradient is also perceptible in irrigated fields, but in the opposite direction. Overall, the study site can be separated in half with a NE-SW axis that passes through plots C2, D1 and D2-1 (Fig. 5-3). ECa progressively increases throughout the profile as one moves away from this axis. Non-irrigated cultivated plots (D2-1 and D2-2) are homogenous and less conductive.

**Table 5-20. Descriptive statistics at four dates of raw apparent conductivity (ECa) (mS/m) measured with an EM38 in vertical (ECaV) and horizontal (ECaH) modes and standardized to 25 °C.**

	March 2009 n = 438		October 2009 n = 900		March 2010 n = 896		November 2010 n = 655	
Tsoil (°C)	17.6		23.6		22.9		20.1	
	ECaV	ECaH	ECaV	ECaH	ECaV	ECaH	ECaV	ECaH
Mean	282 <sup>a</sup>	317 <sup>a</sup>	215 <sup>b</sup>	202 <sup>b</sup>	211 <sup>b</sup>	219 <sup>c</sup>	216 <sup>c</sup>	219 <sup>*d</sup>
Standard deviation	145	161	128	125	119	127	102	105
Minimum	31	17	10	9	16	14	32	14
Maximum	733	846	699	682	756	631	638	632

Tsoil: mean soil temperature between depth of 0 and 50 cm. Different letters indicate significant ( $\alpha = 0.05$ ) differences in mean ECa between dates (paired t-test); \*, no significant ( $\alpha = 0.05$ ) difference between ECaV and ECaH on the same date.



**Fig. 5-43. Apparent electrical conductivity maps by lognormal kriging of (a) ECaH and (b) ECaV at the first date (March 2009). The legend indicates back-transformed estimates of ECa.**

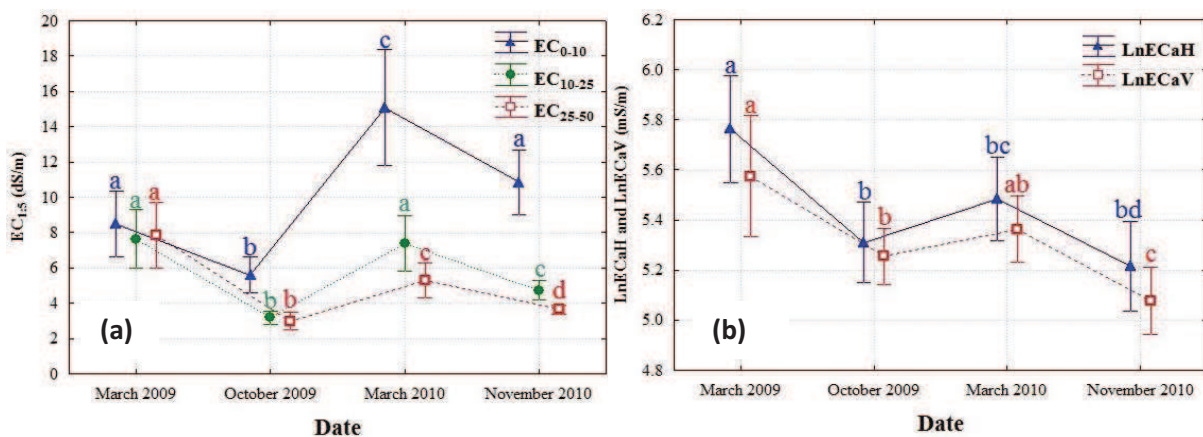
### 5.3.3. Seasonal variations in ECa measurements over the entire survey grid

Table 5-2 provides descriptive statistics of the EM38 surveys at each date. Except in October 2009, ECa was always higher at the surface than at depth ( $ECaV / ECaH < 1$ ). Mean ECaV values were highest during the first survey in March 2009 (282 mS/m), decreased in October 2009 (215 mS/m), remained stable in March 2010 (211 mS/m), and finally increased in November 2010 (216 mS/m) (Table 5-2). Comparison of means (two-way paired t-tests) revealed significant differences in mean ECaV between dates 1 and 2 and between dates 3 and 4 but not between dates 2 and 3. ECaH values of surface layers were also highest in March 2009 (318 mS/m), then decreased in October 2009 (202 mS/m) and increased to 219 dS/m in March and November 2010. All mean ECaH values were significantly different between dates.

### 5.3.4. Seasonal changes in EC<sub>1:5</sub> and ECa at collocated sampling points

Comparison of EC<sub>1:5</sub> at different depths and at the four dates (Fig. 5-4a) reveals decreasing mean EC<sub>1:5</sub> values from the surface (0-10 cm) to the intermediate (10-25 cm) and deep (25-50 cm) layers, except at date 1 where similar values were observed. The maximum range between surface and deep layers was observed in March 2010 while the water table was highest and irrigation already active in the concerned plots. This behavior was observed in all plots.

Relative seasonal changes in ECa and EC<sub>1:5</sub> of the calibration samples were similar, regardless of soil layer (Figs. 5-4a and 5-4b). From date 1 to 4, mean ECa and EC<sub>1:5</sub> decreased, then increased, then decreased again. However, the highest EC<sub>1:5</sub> value (15 dS/m) was observed in the surface layer in March 2010 (date 3), whereas that of ECa (5.8 mS/m) was observed in March 2009 (date 2). Change in EC<sub>1:5</sub> over time suggested a seasonal cycle of salinization (in March) and desalinization (in October/November). This phenomenon was clearly more marked in surface layers than sub-surface or deep layers.



**Fig. 5-44. Mean and standard deviation of (a) electrical conductivity measured from 1:5 diluted extract (EC<sub>1:5</sub>) and (b) the natural logarithm (ln) of ECa measured in horizontal (ECaH) and vertical (ECaV) modes at sampling points of each date. Different letters indicate significant ( $\alpha = 0.05$ ) mean differences in time.**

### 5.3.5. Prediction models of soil salinity

MLR models were built for each depth using the ESAP software and were based either on the whole dataset or on the 30 point subsets available at each date. All MLR models had low accuracy, with  $R^2$  values ranging from 0.05-0.50 and were significant ( $P < 0.01$ ) only for models fitted from dates 2 and 4 of the survey datasets (Table 5-3).

**Table 5-21. Goodness-of-fit  $R^2$  indicator and RMSE (in dS/m) of cross-validation tests for the multiple linear regression models derived from ESAP software.**

Depth (cm)	All data (n=116)		March 2009 (n=26)		October 2009 (n=30)		March 2010 (n=30)		November 2010 (n=30)	
	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE
<b>10</b>	0.0	6.6	0.1	4.8	0.5	2.2	0.2	8.6	0.4	4.2
<b>25</b>	0.1	3.5	0.2	4.1	0.5	0.9	0.1	4.4	0.5	1.1
<b>50</b>	0.1	3.0	0.2	4.6	0.1	1.4	0.4	2.2	0.4	0.6

Table 5-4 details the regression trees derived from Cubist software for specific and general models to predict  $EC_{1.5}$  in the three soil layers. Cubist compared several variable combinations and selected the model with the best prediction performance. The specific models selected all of the potential variables except soil moisture and comprised 2, 3 and 6 rules for the 0-10 cm, 10-25 cm and 25-50 cm layers respectively. The rules were based (in order of decreasing relative contribution) on date-ID (100 %) for the surface layer and on date-ID (95%), Ln ECaH (31 %), plot-ID (28%) and LnECaV (27 %) for the deep layer. At each rule node, prediction of  $EC_{1.5}$  was derived from a linear equation based on LnECa, elevation or mean gypsum content. In contrast, general models were only based on 1 or 2 rules per layer and predictions were derived from ECa measurements and elevation without including other potential variables such as soil moisture or gypsum content. Notably, prediction of  $EC_{1.5}$  in the sub-surface layer involved only elevation, as adding more variables did not improve the model.

**Table 5-22. Cubist regression trees of the specific and general models to predict EC<sub>1:5</sub> in three soil layers.**

EC <sub>1:5</sub> (dS/m)	Specific model	General model
<b>Surface</b> <b>0-10 cm</b> <b>ECH1</b>	<b>Rule 1:</b> if date-ID in {1, 2} then ECH1 = 77.688 + 1.2 lnECaH - 0.57 elevation <b>Rule 2:</b> if date-ID in {3, 4} then ECH1 = 94.246 - 0.6 elevation	<b>Rule 1:</b> ECH1 = 125.025 - 0.91 elevation + 1.5 lnECaH
<b>Sub-surface</b> <b>10-25 cm</b> <b>ECH2</b>	<b>Rule 1:</b> if date-ID in {2, 4} then ECH2 = -2.036 + 1.14 lnECaH <b>Rule 2:</b> if date-ID in {1, 3}, plot-ID in {B1, B2-1} then ECH2 = 148.687 - 1.06 elevation <b>Rule 3:</b> if date-ID in {1, 3}, plot-ID in {C2, D1, A2, B2-2, E2, F} then ECH2 = 26.096 - 0.13 elevation	<b>Rule 1:</b> ECH2 = 151.48 - 1.08 elevation
<b>Deep</b> <b>25-50 cm</b> <b>ECH3</b>	<b>Rule 1:</b> if date-ID in {2, 4} then ECH3 = 0.21 + 0.59 lnECaH <b>Rule 2:</b> if lnECaV ≤ 5.99, date-ID in {1, 3}, plot-ID in {C2, D1, B2-1} then ECH3 = 6.159 - 0.037 meanGyp <b>Rule 3:</b> if lnECaH ≤ 5.86, date-ID = 3 then ECH3 = 2.447 + 0.49 lnECaH - 0.007 meanGyp <b>Rule 4:</b> if lnECaV > 5.99 then ECH3 = -287.334 + 57.86 lnECaV - 9.27 lnECaH <b>Rule 5:</b> if lnECaH ≤ 5.86, date-ID = 1, plot-ID in {A2, B1, B2-2, E2, F} then ECH3 = 9.78 <b>Rule 6:</b> if lnECaV ≤ 5.99, lnECaH > 5.86, date-ID in {1, 3}, plot-ID in {A2, B1, B2-2, E2, F} then ECH3 = -289.216 + 49.38 lnECaH - 0.003 meanGyp	<b>Rule 1:</b> if lnECaV ≤ 5.9 then ECH3 = 0.197 + 0.65 lnECaH <b>Rule 2:</b> if lnECaV > 5.9 Then ECH3 = 444.699 + 12.71 lnECaV - 4.1 elevation + 6.72 lnECaH

date-ID: date identifier; plot-ID: plot identifier; meanGyp: mean gypsum content of the plot; lnECaH, natural logarithm of the apparent conductivity in horizontal mode; lnECaV, natural logarithm of the apparent conductivity in vertical mode; ECH<sub>x</sub>, predicted electrical conductivity of layer *x*; the "if" portion shows conditions of the rule, and the "then" portion shows the linear model.

### 5.3.6. Prediction accuracy

Table 5-3 shows prediction accuracy for the MLR ESAP models via RMSE values derived from cross-validation tests. Errors were large for all datasets except in October of each year, corresponding to lower salinity levels and better model inference.

Table 5-5 shows prediction accuracy of the specific and general Cubist models for the entire dataset. Overall, specific models were more accurate than general models, but both were able to predict the ascending salinity profiles with maximum salinity in the surface layer. The high spatial variability in this layer ( $SD = 6.7$  dS/m) was smoothed by the specific and general Cubist models (4.9 and 3.1 dS/m, respectively) but was reproduced better by the former.

For all soil layers, salinity was predicted more accurately with the specific model than the general model, with accuracy decreasing from the bottom to the top of the profile (Table 5-5). Salinity in the deep layer was predicted well by the specific model (RMSE = 1.6 dS/m) but with lower accuracy for surface (RMSE = 4.4 dS/m) and sub-surface (RMSE = 2.8 dS/m) layers (Table 5-5). In the general model, salinity in the deep layer was also predicted well (RMSE = 2.5 dS/m), but not as well as in surface (RMSE = 5.2 dS/m) and sub-surface (RMSE = 2.7 dS/m) layers (Table 5-5).

Accuracy of both models' predictions of  $EC_{1.5}$  in the sub-surface layer was similar to their respective standard deviations, which indicates poor inference for this layer.

### 5.3.7. Spatial and seasonal soil salinity trends

The Cubist specific models were applied to each location of the EM38 surveys to map 3D spatial variations and detect seasonal changes in soil salinity (Fig. 5-5). According to the standards of Durand (1983), most of the soils were extremely saline ( $EC_{1.5} > 8$  dS/m) in the surface layer, particularly during dates 1, 3 and 4. In the sub-surface layer, salinity alternated between dates 1 and 3 (March), when salinity was higher, and 2 and 4 (October/November), when salinity was lower. In addition, a distinct difference in the scale of variation was observed between plots between dates 1 and 3. By contrast, intra-plot variability was observed more rarely (October/November). Soils in the deep layer were saline (dates 2 and 4) to extremely saline (dates 1 and 3) in the southern end of the site, and intra-plot variability was lower than inter-plot variability (Fig. 5-5).



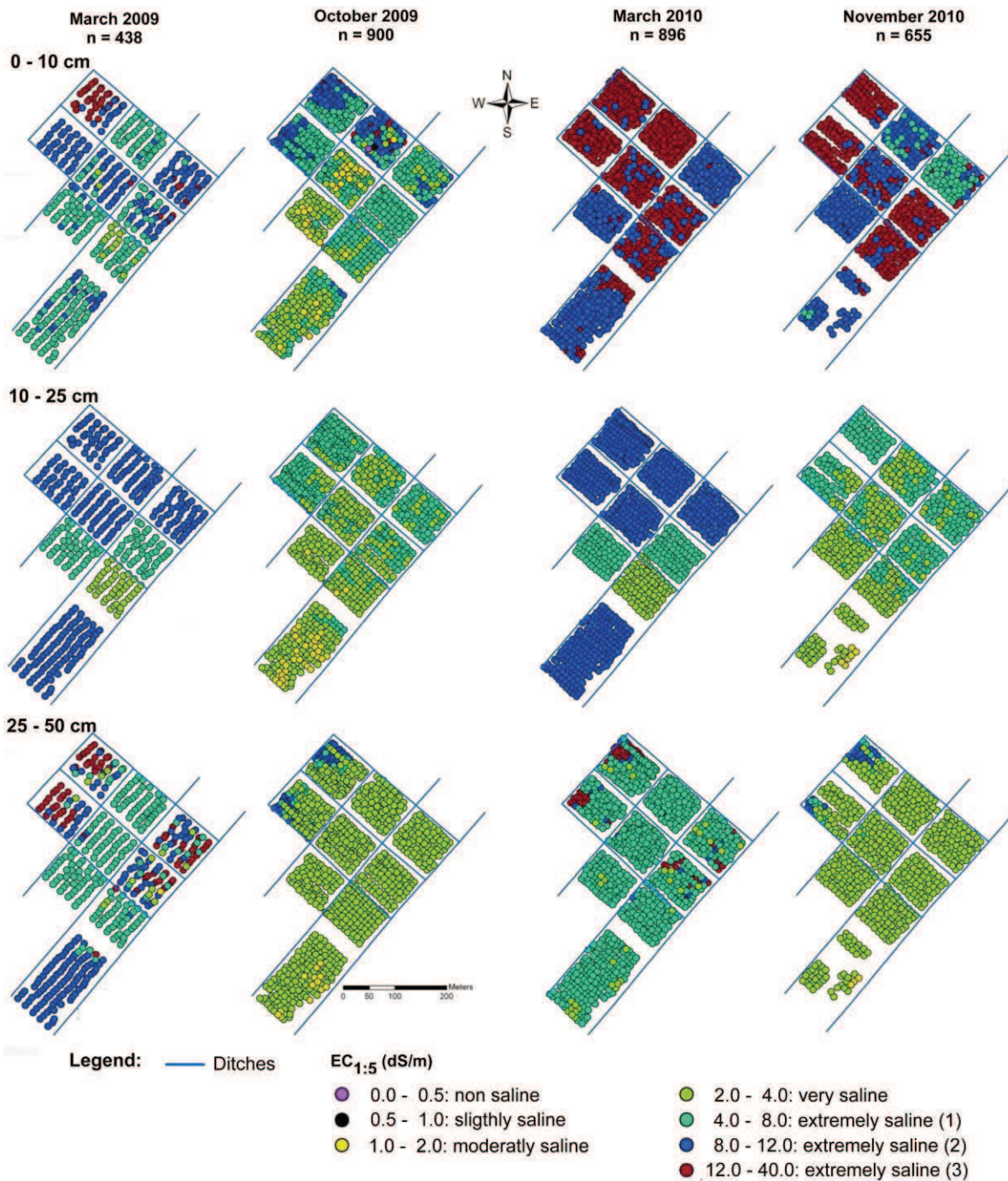
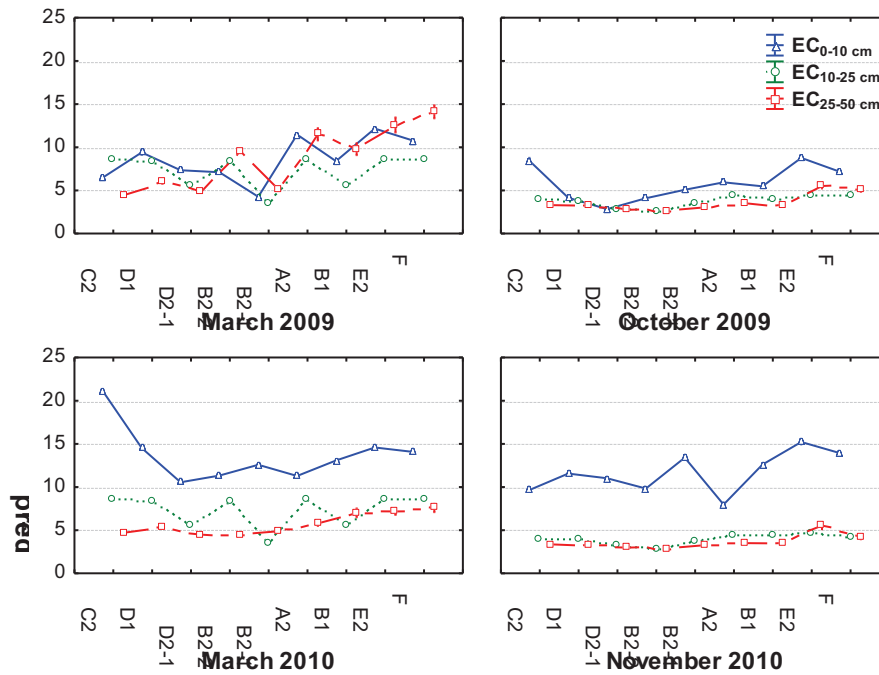


Fig. 5-45. EC<sub>1.5</sub> predictions of the Cubist specific model at three depths and four dates at EM 38 measurement sites.





**Fig. 5- 46. Mean and standard error of predicted salinity by the Cubist specific model in each plot at each date.**

Only at date 1 was salinity of the deep layer the highest in most of the plots (6 of 9), indicating descending salinity (Fig. 5-6). This pattern was reversed during the other 3 surveys. Inter-plot salinity in the surface layer varied greatly over time. In the sub-surface layer, temporal variability was small between dates in the same season (i.e., 1 and 3, 2 and 4). In the deep layer, inter-plot variability was high at date 1 (March 2009), lower at date 3 (March 2010), and even lower at dates 2 and 4.

## 5.4. DISCUSSION

### 5.4.1. Temporal fluctuations of soil salinity

Seasonal variations of salinity appeared particularly large in the study site, with temporal differences between means of the same order of spatial differences between plots on the same date (Figs. 5-5 and 5-6). High temporal variability was particularly marked in surface layers of irrigated plots (e.g. C2, D1, D2-1) but was also observed in non-irrigated plots E2 and F (Fig. 5-6). These temporal dynamics may have been driven by plot-scale irrigation practices or groundwater fluctuations along the slope. The high groundwater level observed in March via piezometric monitoring was synchronous with maximum soil salinity. Salinity decreased when groundwater fell in October and November. Despite spatial and temporal variability, salinity was generally higher in the surface layer by comparison to deeper layers, even in irrigated plots. This is particularly noticeable in March 2010 with shallow water table:

measured and predicted  $EC_{1:5}$  (Fig. 5-4a and Fig. 5-6) were higher than the conductivity of irrigation water and decreasing with depth. This indicates that capillary rise was the main hydrological process even in irrigated plots; small amounts of irrigation moisten the profile and dissolve precipitated salts at depth, allowing soluble salts to rise toward the surface (Montoroi, 1992; Djili *et al.*, 2003). Indeed, the irrigation amounts (less than 30 mm per month) represent a small fraction of the total evapotranspiration (over 300 mm per month) in the climatic context of south Algeria. Except the short periods of irrigation where salt leaching may occur, the dominant process when cumulated over larger periods is in favor of salt rising due to capillary rise and their precipitation in surface horizons, causing salinization (Hachicha *et al.*, 2000; Doolittle and Brevik, 2014). Ultimately, piezometric monitoring showed that this salinization process depends upon groundwater dynamics and is more severe when the water table is near the surface.

Despite this clear influence, we must notice that the rules of the Cubist regression trees (Table 5-4) did not include depth to water table as an explanatory variable to predict salinity. The main reason of this missing inclusion may be linked to non-available information at date 1 and imprecise extrapolation of local piezometric measurements. The prediction models therefore preferably included elevation (Table 5-4) which may be considered in first approximation as a proxy of spatial variations of water table depth, but this needs to be confirmed with additional monitoring dates.

Finally,  $EC_{1:5}$  measurements may also have been affected by gypsum content of the soil thereby overestimating the salinity linked to sodium concentration (Rhoades *et al.*, 1999). Nevertheless, Djili *et al.* (2003) showed that variations in gypsum content were moderate in these sandy soils with low cation exchange capacity related to low clay (< 4 %) and organic matter (<0.8%) contents. We assume therefore that temporal changes in  $EC_{1:5}$  were not influenced by gypsum content but almost exclusively by sodium concentration in the soil solution.

#### 5.4.2. Model performance of MLR and regression tree models

The methodology developed by Lesch *et al.* (1998) to predict  $E_{ce}$  from EM38 measurements under the assumptions of MLR regression was applied to a single field (Lesch *et al.*, 1998; Amezketa, 2007b). In the Ouargla study site composed of several plots with sharp boundaries and different management practices, a single linear relationship between explanatory and predicted variables of the MLR approach appeared unable to represent the spatial variability of salinity even when a different MLR model was constructed at each date. The accuracy of the MLR approach was therefore always poor (Table 5-3). As stated by Lesch *et al.* (1998), EM- $E_{ce}$  regression models are field and time dependent due to their reliance on spatial and temporal factors that cannot be easily captured in MLR models.

Specific Cubist models using parameters describing the local context were usually more accurate than MLR models (Tables 5-3 and 5-5). Indeed, the greater flexibility of the regression tree models was particularly adapted to the complex spatial pattern of the Ouargla oasis. Different rules, based on time-ID and plot-ID and, enabled definition of distinct regression models for subsets of plots and integration of temporal differences in a single model. This overcomes the limited ability of classic linear regression to represent between-field variability efficiently and the need to build an independent regression model for each date.

The need to adapt regression models to the local context was also demonstrated by the lower accuracy of general model which differed from specific models only in their exclusion of plot-ID and date-ID. The small number of rules of general models and the low weight of EM variables in their equations confirmed the context specificity of the EM-EC relation. This result agrees with the conclusions of [Omonode and Vyn \(2006\)](#), who emphasized that ECa measurements cannot detect temporal changes in salt concentrations when referring only to variability in electric conductivity except in uniform conditions as studied by [Corwin \*et al.\* \(2006\)](#). We should therefore not build a model from data collected at one or two dates and then apply this model at other dates: the importance of date-ID as main explanatory variable in the specific model and the poor performance of the general model where date-ID is not considered, highlight this fact. This means that the overall strategy should be to collect at each date new calibration samples, then reconstruct a new model by adding this new data and finally deploy spatial estimates using this recalibrated model.

#### **5.4.3. Salinity monitoring strategy related to prediction accuracy**

The accuracy of salinity prediction tended to increase with depth (Table 5-5). High MAEs in the surface layer are related to high variability in  $EC_{1.5}$  measurements not revealed by the EM survey or smoothed by the predictive models. Two main hypotheses may explain this behavior:

- (i) Difference of support between  $EC_{1.5}$  and ECa measurements. Since the EM38 measures a volume of soil much larger than that described by  $EC_{1.5}$  measurements, salinity differences may occur in the short distance between the two coils of the EM38 and not be detected;
- (ii) Certain factors that influence soil salinization may not have been considered in predictive models, such as soil composition, texture, and structure. Although soil moisture was not considered in regression trees, the quantity or quality of irrigation water could also be one such factor. Moisture could have an effect on salinity when combined with descriptors other than those used in this study's models.

Salinity monitoring regarding palm production should concentrate on the temporal evolution of electrical conductivity in the root zone, which was observed mostly limited between 25 and 50 cm in the profiles of the cultivated plots. Palm salt tolerance thresholds are still discussed, but several publications consider a salinity level corresponding to a yield reduction of less than 25 % (Abrol *et al.*, 1988; Forkutsa *et al.*, 2009). Based on these references, local experts consider that soil  $EC_{1:5}$  should therefore be less than 1 dS/m in the root zone area (Djili, pers. Com.). Predictions by Cubist models of soil  $EC_{1:5}$  between 25 and 50 cm varied in the range 2 to 20 dS/m depending on the date and plot considered (Fig. 5-5), with a mean value near 5 dS/m (Table 5-5). Overall prediction accuracy of the specific model (RMSE = 1.6 dS/m) appear sufficient to detect that salinity threshold was almost permanently exceeded at all locations.

The next step of the monitoring strategy would be to test if controlled irrigation, started when salinity threshold exceeding is detected by EM38 survey, is able to reduce efficiently the impact of salinity on palm production.

## 5.5. CONCLUSION

The aim of this study was to test the ability of electromagnetic conductivity surveys to describe the spatiotemporal dynamics of salinity within the plots of an irrigated palm grove in the presence of a saline water table which fluctuates seasonally in an arid climate at the oasis of Ouargla, Algeria. Models to predict salinity at different depths were constructed using Cubist regression trees and different sets of site-specific or general descriptors, and their accuracy and robustness were compared.

Results demonstrate the ability of the monitoring procedure to detect seasonal salinity changes within the soil profile, but only when considering site-specific characteristics. Electromagnetic conductivity surveys coupled with regression-tree prediction models therefore appear an efficient salinity monitoring approach for medium depth salinity variations when based on local calibration models and bring useful information for inferring underlying processes.

**Dynamique spatiotemporelle de la salinité de sols sableux irrigués en milieu aride**

**Application à une palmeraie de la cuvette de Ouargla en Algérie**

**CHAPITRE 6 - UTILISATION DE LA  
MODELISATION HYDROLOGIQUE POUR  
DEFINIR DES SCENARIOS DE REMEDIATION  
DE LA SALINITE DES SOLS**

" Pour s'améliorer, il faut changer. Donc, pour être parfait, il faut avoir changé souvent"

Winston Churchill

*Le chapitre 6 correspond à un article qui est en voie de soumission avec les co-auteurs suivants : Ismaïel Berkal<sup>A-B-D</sup>, Christian Walter<sup>A</sup>, Hongtao Hao<sup>A</sup>, Didier Michot<sup>A</sup>, Kaddour Djili<sup>C</sup>.*

### **UTILISATION DU MODELE HYDROLOGIQUE HYDRUS 1-D POUR EVALUER L'EFFET DE DIFFERENTES STRATEGIES D'IRRIGATION SUR LA SALINITE DES SOLS**

**A** Agrocampus Ouest, INRA, UMR 1069 SAS. 65 rue de Saint Brieuc - CS 84215. F-35042 Rennes Cedex - France

**B** Univ Ouargla, Fac. des sciences de la nature et de la vie, Lab. de Recherche sur la Phœniciculture, Ouargla 30000, Algeria

**C** Ecole Nationale Supérieure Agronomique – Algiers (ENSA ex. I.N.A, Algiers), Hassen Badi El Harrach 16051 (Algeria)

**D** Corresponding author Email: [berkal.is@univ-ouargla.dz](mailto:berkal.is@univ-ouargla.dz)

**RESUME :** L'oasis de Ouargla (sud-est algérien), qui appartient à un contexte environnemental aride, est soumise de plus aux effets négatifs de la salinisation de ses sols et à la remontée des eaux salées de la nappe phréatique, due principalement à une irrigation et à un assainissement mal gérés à l'échelle de la palmeraie.

Comprendre l'évolution de la salinité à l'échelle de la palmeraie en tenant compte de l'état initial observé et de l'évolution, au cours de la période d'étude, des conditions climatiques, des niveaux de la nappe, des apports d'eau par irrigation, de la qualité de l'eau et de l'évapotranspiration est une question cruciale dans les oasis sahariennes pour anticiper la salinisation et protéger ce patrimoine ancestral.

L'objectif de cette étude est de développer une démarche de modélisation représentant l'évolution verticale de la salinité qui menace la zone racinaire du dattier.

Cette étude compare deux scénarios de positions de la nappe phréatique. Une situation où la nappe est toujours maintenue fixe à une profondeur de 2 m de la surface du sol et une seconde situation où la nappe est fluctuante. Pour chacun de ces scénarios, nous testons trois doses d'eau d'irrigation : la dose actuelle (3,4 cm), une irrigation réduite (1 cm) et une irrigation accrue (5 cm) avec deux eaux de qualité différente (5 mS.cm<sup>-1</sup> et 3 mS.cm<sup>-1</sup>).

La modélisation HYDRUS 1-D indique que la fluctuation de la nappe phréatique a plus d'effet sur la salinisation de la zone racinaire du palmier dattier que la dose d'irrigation réduite 1 cm. A l'opposé, la dose accrue de 5 cm est optimale au maintien de la salinité au niveau le plus bas (< 3 dS.m<sup>-1</sup>) pourvu qu'elle soit ajustée à la fois au contexte hydrologique local et à l'état actuel de la salinité. Aucune dose d'irrigation ne permet d'utiliser sans risque de salinisation l'eau à 5 mS.cm<sup>-1</sup>.

Les exigences de lixiviation, le rendement des palmiers et les variations latérales de l'humidité du sol seront modélisés par l'approche SALTMED plus générique.

**Mots clés :** modélisation hydrologique, HYDRUS 1-D, cuvette de Ouargla, oasis, climat aride, sols sableux, nappe phréatique, salinité.



## 6.1. INTRODUCTION

La salinité est le facteur limitant le plus sévère qui affecte l'agriculture irriguée. Il a été estimé que la salinité limite la production agricole pour un tiers des terres irriguées dans le monde (FAO, 1998). En outre, des millions d'hectares de terre potentiellement irrigables pourraient se saliniser s'ils étaient mis en production (Ghassemi *et al.*, 1997; Munns, 2002; Smedema et Shiati, 2002).

La salinisation associée à l'agriculture se produit lorsque le sel s'accumule dans la zone racinaire à une concentration qui provoque une perte de rendement (Ayers et Westcot, 1985; Van Genuchten et Gupta, 1993; Steppuhn *et al.*, 2005; Schleiff, 2008). Elle a tendance à être une menace commune aux zones arides et régions semi-arides dans lesquelles la lixiviation des sels est faible (Cheverry et Robert, 1998; Pitman et Läuchli, 2002; Smedema et Shiati, 2002).

Les régions sahariennes d'Algérie s'étendent sur près de 2 millions de km<sup>2</sup>. Toutefois, 10 % seulement sont adaptées à l'agriculture. Les 9/10ème de leur superficie sont occupés par des plateaux rocheux (reg - hamada), des dunes sableuses (grand erg oriental et occidental) et par des dépressions salées (chotts) qui sont impropres à l'agriculture (Daoud et Halitim, 1994; Hamdi-Aïssa et Girard, 2000). Les aires les plus favorables se situent dans les vallées fossiles des oueds, dans les dépressions (dayas) et dans les plaines sableuses. Dans ces milieux, l'aridité du climat rend impossible toute pratique agricole sans irrigation.

A la fin du XIX siècle, l'apparition des forages profonds et leurs exploitations à l'occasion des découvertes pétrolières ont donné un nouvel essor au développement du Sahara. Le Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS) occupe une superficie de l'ordre d'un million de km<sup>2</sup>, partagé entre l'Algérie 700 000 km<sup>2</sup>, la Tunisie 80 000 km<sup>2</sup> et la Libye 250 000 km<sup>2</sup> (UNESCO, 1972; O.S.S, 2008) et constitue une ressource en eau permettant le développement de l'irrigation. En conséquence, l'agriculture saharienne constitue à nouveau un levier dans la lutte contre la pauvreté et renforce la sécurité alimentaire, compte tenu des immenses et incontestables possibilités qu'elle offre au développement de l'activité agricole, notamment à travers la culture du dattier et de primeurs (Daoud et Halitim, 1994).

Cependant, la pression démographique croissante, conjuguée à un climat aride, a entraîné un intérêt grandissant pour les ressources du SASS (UNESCO, 1972). Actuellement, les prélèvements totaux sur le SASS sont estimés à environ 2,85 m<sup>3</sup>/s (Idder *et al.*, 2011) ce qui a induit en de nombreuses oasis, des excès d'eau ou plutôt une mauvaise maîtrise d'une eau devenue plus abondante (Côte, 1998). Dans la cuvette de Ouargla par exemple, le problème majeur de cette utilisation abusive de la ressource eau est celui du déséquilibre entre le volume d'eau apporté et celui évacué (Idder, 2007). Selon Bonnard et Gardel (BG), le bilan

d'eau pour la cuvette de Ouargla est excédentaire d'environ 27000 m<sup>3</sup>/j d'eau qu'il faudrait évacuer par pompage vers la sebkha Oum Raneb (O.N.A, 2004).

De plus, la qualité physico-chimique de cette eau est le plus souvent médiocre. La salinité, dont une partie est d'origine géologique, s'accroît continuellement du fait d'une mauvaise gestion de la ressource en eau et en sols et aboutit le plus souvent à une salinisation secondaire (Montoroi, 1992; Daoud et Halitim, 1994; Cheverry et Robert, 1998; Hachicha *et al.*, 2000; Djili *et al.*, 2003). En effet, la qualité des eaux dans les différentes régions sahariennes, notamment celles situées dans la partie septentrionale (Ouargla, El Oued, Biskra), est mauvaise (EC >10 mS cm<sup>-1</sup>) (ABHS, 2006).

Pour pallier au manque d'une eau devenue rare, l'utilisation de l'eau fortement minéralisée (eau saumâtre) en agriculture est devenue une alternative pour de nombreux pays en développement (Beltrán, 1999). Néanmoins, son utilisation suggère (i) un système de drainage fonctionnel en amont, (ii) la maîtrise des techniques d'irrigation et (iii) un choix adapté des cultures pratiquées (Goodin *et al.*, 1990; Van Genuchten et Gupta, 1993; Snoussi et Halitim, 1998; Delavan, 2004; Schleiff, 2008).

En somme, la planification optimale des irrigations devient une condition *sine qua non* dans la gestion de ces périmètres en zone aride. La modélisation des processus hydriques et de transferts de solutés dans les sols soumis à irrigation constitue une composante essentielle à une gestion adéquate de l'irrigation, en particulier dans des conditions d'évaporation importante et en présence d'une nappe proche de la surface (Yaron *et al.*, 1980; Ghassemi *et al.*, 1997). Les modèles numériques sont devenus beaucoup plus efficaces, ce qui rend leur application aux problèmes de plus en plus répandue (Ragab, 2002; Christiansen *et al.*, 2004; Steppuhn *et al.*, 2005; Radcliffe et Simunek, 2010; Rubio et Poyatos, 2012).

Les modèles numériques unidimensionnels (HYDRUS-1D) ou à deux ou trois dimensions (HYDRUS-2D/3D) (Šimunek *et al.*, 2009) résolvent les équations qui régissent les mouvements de l'eau et des solutés dans un sol insaturé, partiellement saturé ou saturé pour plusieurs couches de sol (Šimunek et Van Genuchten, 1999). Les modèles HYDRUS tiennent compte des propriétés hydrodynamiques des sols, généralement estimées à l'aide de fonctions de pédotransfert, notamment celles de Carsell et Parish (1988) et celles du programme Rosetta développées par Schaap *et al.* (2001) pour la prédiction de la conductivité hydraulique (Ks) et des paramètres de la rétention en eau de Van Genuchten (1980).

Le modèle HYDRUS 1-D (Šimůnek *et al.*, 2009) a été appliqué pour analyser et comprendre l'effet des doses et de la qualité des eaux d'irrigation et/ou des eaux de la nappe phréatique de surface sur la distribution verticale des sels dans le profil. Ce modèle est utilisé dans le traitement des problèmes liés à l'évaporation et la percolation de l'eau dans des sols stratifiés et de textures différentes (Šimůnek et Suarez, 1993; Gonçalves *et al.*, 2006). Il a également été utilisé pour modéliser le flux de chaleur et le transport de solutés (Šimůnek *et al.*, 2009). Ce modèle apparaît donc adapté pour développer une première simulation des variations temporelles de la salinité des sols de notre zone d'étude, en lien avec les pratiques d'irrigation.

L'objectif de ce travail est de modéliser par HYDRUS 1-D l'évolution temporelle de la salinité des sols étudiés entre mars 2009 et novembre 2010 induite par l'irrigation avec des eaux de qualité différente du SASS. L'utilisation de ce modèle pourra servir à des simulations sur des approches optimales d'irrigation limitant les risques de salinisation des sols en relation avec les conditions du milieu.

## 6.2. MATERIELS ET METHODES

### 6.2.1. Zone d'étude

La zone d'étude est située dans la cuvette de Ouargla en forme de synclinal dissymétrique au sein du Sahara septentrional d'Algérie. Elle est localisée au sein d'une plantation expérimentale de l'université, au sud-ouest de la ville de Ouargla (31°56'25" latitude nord, 5°17'34" longitude Est) (Figure 6-1).

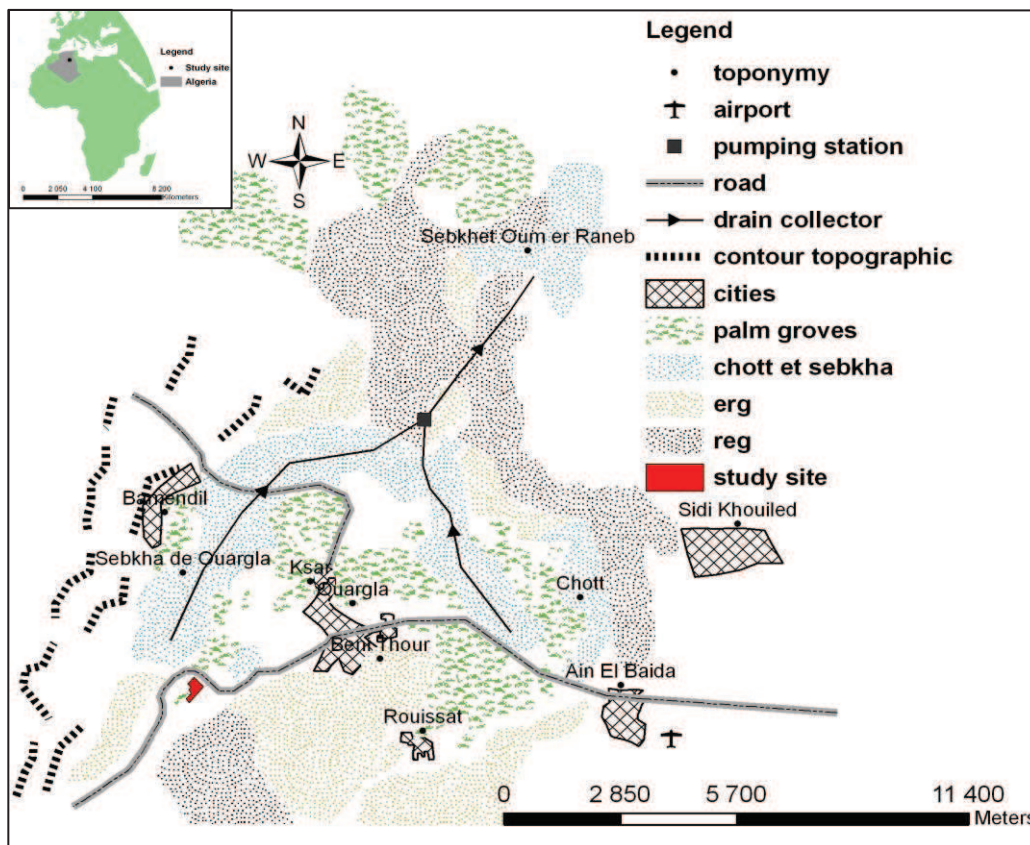
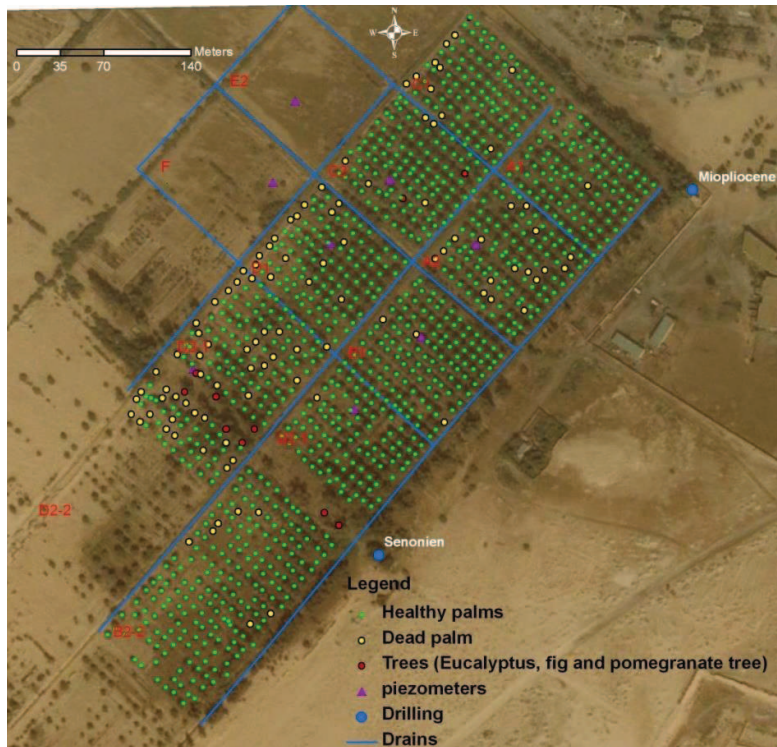


Figure 6-47. Localisation de la région et du site d'étude

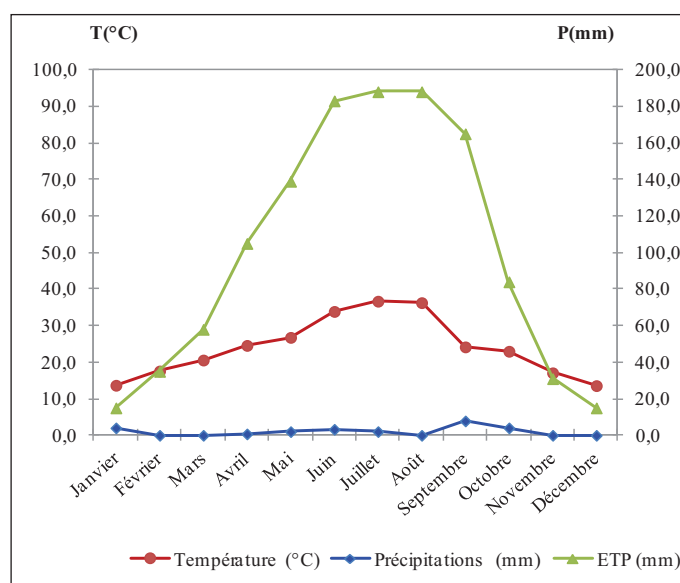
Installée en 1959 dans le lit de la vallée fossile de l'oued M'ya, cette plantation s'étend sur une superficie de 12 hectares cultivées essentiellement avec du palmier dattier (*Phoenix dactylifera*) planté en carré de 9 m × 9 m. La palmeraie est composée de 1095 pieds dont 102 sont morts ou arrachés. Le patrimoine phoénicicole est composé des variétés déglet noir, dégla baida, ghars, djebars (pieds jeunes ou rejets), dokkar (mâle).

Malgré le manque d'entretien, le réseau de drainage constitué de drains à ciel ouvert a néanmoins l'avantage de maintenir la nappe phréatique en dessous de la zone racinaire dans la majorité des parcelles (Figure 6-2).



**Figure 6-2. Localisation des palmiers, des arbres, des piézomètres et du réseau de drainage**

Le climat est de type saharien à hiver doux caractérisé par une saison sèche qui s'étale sur toute l'année (Figure 6-3). Les pluies sont rares et irrégulières et la moyenne annuelle calculée sur la période d'étude de deux années n'est que de 38,7 mm. La température moyenne annuelle est de 23,4 °C avec un maximum de 40,1 °C enregistré en juillet et un minimum de 6,4 °C en décembre. L'amplitude thermique varie entre 23,8 °C en février et 7,5 °C en octobre (ONM, 2010).



**Figure 6-3. Diagramme ombrothermique de la station de Ouargla (2009-2010)**



### 6.2.2. Qualité des sols et des eaux d'irrigation

Les sols développés dans un matériau éolien sont de texture très sableuse et sont classés selon la WRB (FAO, 2006a) dans le groupe des Solonchaks (Salic, Aridic). Les caractéristiques physico-chimiques moyennes de ces horizons sont présentées dans le tableau 1. Ces sols sont soumis aux fluctuations de la nappe phréatique salée dont la profondeur varie en fonction des saisons et de la position au sein du site entre des valeurs extrêmes comprises entre 0,2 et 2,4 m (Berkal *et al.*, 2014). Le réseau d'irrigation par planche est alimenté par les eaux des forages du Mio-Pliocène (5,3 mS.cm<sup>-1</sup>, SAR=6,9) et du Sénonien (3,7 mS.cm<sup>-1</sup>, SAR=12,4) appartenant à l'aquifère du Complexe Terminal du grand Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS). Le faciès chimique de l'eau de ces deux forages est sulfaté sodique. Selon le diagramme de classification des eaux d'irrigation de Riverside (US. Salinity Laboratory Staff, 1954), modifié par Durand (1983), les eaux du forage du Mio-Pliocène appartiennent à la classe C5S3. Cette eau devrait être utilisée sur des sols à texture grossière avec beaucoup de précaution. Son utilisation est sans risque pour le palmier dattier qui pourrait supporter des salures allant jusqu'à 15 mS.cm<sup>-1</sup> (12,2 g/l) (Durand, 1983). Les eaux du forage du Sénonien, par contre, appartiennent à la classe d'irrigation C4S4. C'est une eau utilisable sur des sols très perméables. En outre, elle présente un fort danger d'alcalinisation. En conséquence, elle doit être apportée en excès.

**Tableau 6-23. Caractéristiques moyennes du sol de la zone d'étude issues des analyses de neuf profils**

Profondeur (cm)	Argile	Limon	Sable	Densité apparente (g. cm <sup>-3</sup> )	Gypse (%)	EC <sub>1:5</sub> (dS.m <sup>-1</sup> )	Matière organique (%)
0-10	1,5	7,9	90,6	1,3	17,8	13,6	0,4
10-25	1,5	7,8	90,7	1,3	20,9	11,7	0,4
25-50	1,9	7,8	90,3	1,3	23,5	9,2	0,5
50-100	2,6	7,9	89,5	1,3	25,7	6,7	0,4

Les sols ont une texture sableuse (90 % de sable) avec un faible taux de matière organique (< 0,5 %) et une densité apparente constante (1,3 g/cm<sup>3</sup>) tout au long du profil (Tableau 6-1). La teneur moyenne en gypse varie de 18 à 26 %, mais est très variable avec la profondeur (CV = 83 %).



### 6.2.2.1. Le suivi piézométrique de la nappe phréatique

Le réseau de piézomètres installés dans la zone d'étude (Figure 6-2) a permis un suivi hebdomadaire du niveau de la nappe pendant quatorze mois (Figure 6-4). Ce suivi montre que les sols sont soumis aux fluctuations d'une nappe phréatique salée (13 mS.cm<sup>-1</sup> en moyenne soit une minéralisation de 11,3 g/l). Les données journalières de hauteur de la nappe utilisées dans la modélisation ont été obtenues par interpolation linéaire entre deux dates de mesures successives.

### 6.2.3. Les paramètres du model HYDRUS

Le modèle HYDRUS-1D (Šimůnek *et al.*, 2009) est utilisé pour simuler dans la dimension verticale les paramètres hydrodynamiques et de transport de solutés dans la zone non saturée du sol, en fonction des règles de pédotransfert de Mualem (1976) et de Van Genuchten (1980). Le paramétrage d'HYDRUS 1-D exige une délimitation a priori de la base du profil que nous avons fixée à 2 m et comportant une structure verticale uniforme et isotrope. En outre, nous avons limité également la période d'estimation (Time-variable boundary conditions) à 730 jours. Les jours 1, 219, 384 et 601 correspondent respectivement aux dates des quatre campagnes (mars 2009, octobre 2009, mars 2010 et novembre 2010) de suivis géophysiques menées sur le site d'étude (Berkal *et al.*, 2012, 2014).

Pour définir les conditions de flux aux limites, on considère que le profil est soumis à la pression atmosphérique en surface et à une pression hydrostatique à la base du profil exercée par la présence d'une nappe.

#### 6.2.3.1. Les scénarios climatiques et des apports par irrigation

Les précipitations (cm/j) sont rares, elles sont de ce fait toujours inférieures aux apports d'eaux par irrigation. Nous avons alors émis trois scénarios pour définir les conditions des modélisations mises en œuvre : (i) utilisation des données journalières de l'office de météorologie de Ouargla (ONM, 2010) pour l'année 2010 auxquelles nous rajoutons les quantités d'eau apportées par une irrigation de 5 heures par semaine avec un débit de 1,7 l/s, soit une lame d'eau de 34 mm : ce scénario correspond aux pratiques d'irrigation actuelles. Les apports d'eau se font sur des planches d'irrigation de 50 cm de large et de 100 m de longueur, à raison de deux planches pour chaque rangée de palmier à l'exception des rangées situées aux limites de la parcelle où nous avons une seule planche d'irrigation. On peut alors facilement calculer la surface réelle d'irrigation (S) pour les 18 rangées de palmiers ( $S = 18 \times 0,5 \times 100 = 900m^2$ ), (ii) une irrigation réduite avec un apport de 1 cm d'eau uniquement par tranche d'irrigation et (iii) une irrigation accrue avec un apport par tranche d'irrigation de 5 cm d'eau. Notons que l'irrigation de cette palmeraie se fait toujours avec une fréquence de 5 heures d'irrigation par semaine.

A défaut de disposer de toutes les mesures climatiques, nous avons calculé l'évapotranspiration potentielle (ETP) par la formule de Thornthwaite (1948) (Allen *et al.*, 1998; Pereira et Pruitt, 2004). Les résultats obtenus se rapprochent de ceux de Baali (1986) obtenus avec la formule de Penman dans la même région. Cependant les simulations HYDRUS 1-D nécessitent une décomposition de l'ETP. Nous admettons dans ce travail, que l'évapotranspiration potentielle peut être calculée selon la formule suivante :

$ETP = (0,25 \times \text{Evaporation}) + (0,75 \times \text{Transpiration})$  (Ashktorab *et al.*, 1994; Liu *et al.*, 2002; Kang *et al.*, 2003a; Kang *et al.*, 2003b).

### 6.2.3.2. Les flux d'eau et la qualité de l'eau d'irrigation

Les mesures de conductivité électrique des eaux de la nappe phréatique ( $13 \text{ mS.cm}^{-1}$ ) et des eaux d'irrigation du Sénonien ( $3,7 \text{ mS.cm}^{-1}$ ) et du Mio-Pliocène ( $5,3 \text{ mS.cm}^{-1}$ ) ont été converties en concentrations de sel dissous ( $\text{mmol/cm}^3$ ) notée TDS (Total Dissolved Solids) selon la méthodologie adoptée par Forkutsa *et al.* (2009).

Les simulations HYDRUS ont été réalisées pour deux parcelles A2 et B2-1 affectées différemment par le niveau de la nappe phréatique *i.e.* une nappe haute qui fluctue entre 0,2 et 1,8 m et une nappe basse qui fluctue entre 0,8 et 2,4 m respectivement (Figure 6-4). Pour chacune des parcelles, on a réalisé deux simulations : une première simulation avec une nappe fixe à 2 m et une deuxième simulation avec une nappe haute fluctuante dans la parcelle A2 et avec une nappe basse fluctuante dans la parcelle B2-1.

Chaque simulation est testée avec trois doses d'irrigation : (i) l'irrigation actuelle (3,4 cm d'eau) (ii) une irrigation réduite (1 cm d'eau) et (iii) une irrigation accrue (5 cm d'eau) (Tableau 6-2).

**Tableau 6-24. Les simulations testées croisant les scénarios d'irrigation, les niveaux de nappe et la qualité des eaux [a: eau du Mio-Pliocène ( $5,3 \text{ mS.cm}^{-1}$ , SAR=6,9) ; b : eau du Sénonien ( $3,7 \text{ mS.cm}^{-1}$ , SAR=12,4)] dans deux parcelles A2 et B2-1**

Parcelles	Position de la nappe phréatique (m)			Irrigation (cm d'eau) : 5 h/semaine		
	Nappe fixe à 2 m	nappe fluctuante basse (0,8 -2,4)	nappe fluctuante haute (0,2- 1,8)	irrigation actuelle (3,4 cm)	irrigation réduite (1cm)	irrigation accrue (5cm)
A2	*		*	*a	*a	*a
B2-1	*	*		*b	*b	*b

### **6.2.3.3. Informations sur le profil racinaire**

Il s'agit de décrire la densité verticale de la zone racinaire au sein du profil. Les racines du palmier dattier de la zone d'étude ont été observées sur 9 profils et se localisent entre 38 et 60 cm de profondeur. Le palmier dattier ne présente pas dans ce contexte d'expansion de ses racines en dessous de cette profondeur, vraisemblablement en raison de la présence d'une nappe à faible profondeur. Dans l'oasis de Draa (Tunisie) par contre, le développement des racines dans le profil est à 50 % concentré entre 0 et 1 m (Toumi, 1995).

### **6.2.3.4. Résultats de la modélisation**

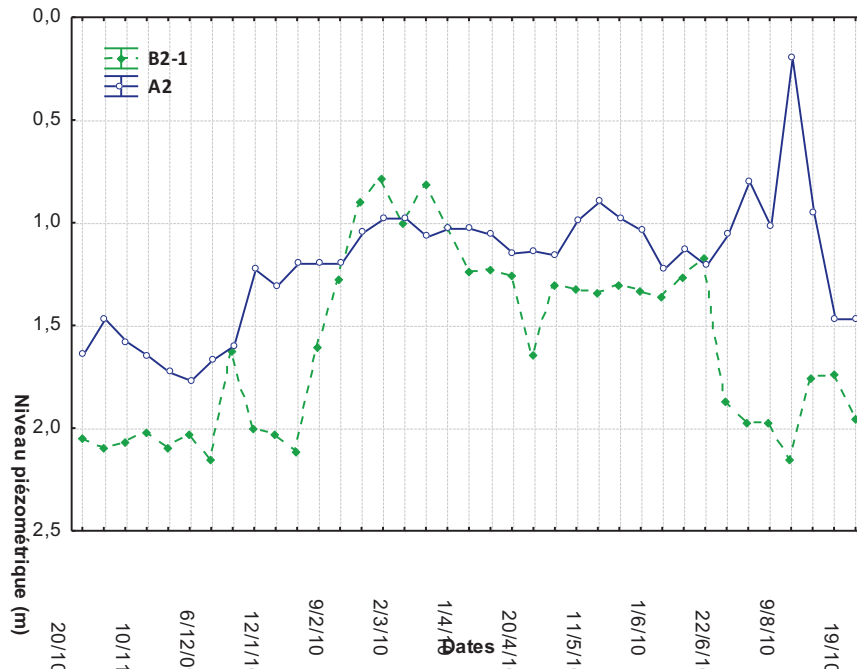
Les données de sortie seront relatives à différents nœuds préalablement choisis sur le profil. On s'intéressera particulièrement à l'évolution temporelle (jours) de la salinité ( $EC_{1,5}$ ) au niveau de six nœuds localisés à 6, 18, 38, 50, 60 et 100 cm de profondeur correspondant au milieu des horizons du profil moyen (Tableau 6-1). Les nœuds 38, 50 et 60 cm représentent la zone racinaire du palmier dattier dans la zone d'étude.

## **6.3. RÉSULTATS**

### **6.3.1. Les fluctuations du niveau de la nappe**

Le suivi piézométrique d'octobre 2009 à octobre 2010 dans les parcelles A2 et B2-1 a montré que la nappe phréatique suit globalement la même allure dans les deux parcelles. Cependant, le niveau piézométrique de la nappe dans la parcelle B2-1 est plus éloigné de la surface que celui observé dans la parcelle A2 (Figure 6-4). En effet, le niveau des eaux souterraines est plus profond ( $> 1,5$  m) pendant octobre et novembre de chaque année et remonte progressivement pour rester relativement stable de mars à juin 2010 respectivement entre 0,9 et 1 m dans la parcelle A2 et entre 0,8 et 1,9 m dans la parcelle B2-1.

Ces niveaux de la nappe phréatique permettent de classer la fluctuation de la nappe en nappe fluctuante haute dans la parcelle A2 et une nappe fluctuante basse dans la parcelle B2-1.



**Figure 6-4. Fluctuation de la nappe phréatique entre octobre 2009 et octobre 2010 dans les deux piézomètres implantés dans les parcelles A2 et B2-1**

### 6.3.2. Les simulations HYDRUS 1-D dans la parcelle A2

Dans la parcelle A2, les simulations de la salinité ( $EC_{1:5}$ ) ont été réalisées en considérant les caractéristiques de l'eau du Mio-Pliocène ( $5,3 \text{ mS.cm}^{-1}$ ) utilisée pour l'irrigation des palmiers de cette parcelle.

#### 6.3.2.1. Nappe fixe à 2 m

Les simulations de  $EC_{1:5}$  par HYDRUS 1-D (Figure 6-5-Ia), avec la dose d'irrigation actuelle, indiquent une diminution de la salinité de la zone racinaire (N38, N50 et N60) de  $10 \text{ dS.m}^{-1}$  à l'état initial (jour 1) à moins de  $4,2 \text{ dS.m}^{-1}$  au jour 219 et une désalinisation complète au jour 384. Les mêmes simulations montrent que la zone racinaire se salinise de nouveau au jour 601 pour retrouver son niveau du jour 219 ( $< 4,2 \text{ dS.m}^{-1}$ ).

A l'exception du jour 1 où la salinité est à environ  $4 \text{ dS.m}^{-1}$  en surface et subsurface (N6, N18), la partie supérieure du profil est complètement désalinisée au jour 384 et sa salinité n'est que de  $1 \text{ dS.m}^{-1}$  aux jours 219 et 601.

Les simulations de  $EC_{1:5}$  avec la dose d'irrigation  $1 \text{ cm}$  (Figure 6-5-Ic) indiquent par contre une augmentation de la salinité de toutes les couches et pour toute la période simulée. En effet, la salinité de la zone racinaire qui n'était que de  $10 \text{ dS.m}^{-1}$  au jour 1 a atteint respectivement  $60, 15$  et  $10 \text{ dS.m}^{-1}$  au jour 219 aux nœuds N60, N50 et N38 représentant la zone racinaire. Néanmoins, au jour 384 la salinité de cette zone est à moins de  $5 \text{ dS.m}^{-1}$ .

La troisième simulation réalisée avec une dose d'irrigation de 5 cm (Figure 6-5-Ie) indique que la salinité de la zone racinaire au jour 1 est comparable à celle observée pour la dose d'irrigation actuelle (10 dS.m<sup>-1</sup> en moyenne) (Figure 6-5-Ia). Cependant, la salinité de cette zone diminue fortement pour se situer entre 1 et 3 dS.m<sup>-1</sup> au jour 219 avant une désalinisation complète au jour 384. Au jour 601, elle se salinise de nouveau au même niveau que le jour 219 (entre 3 et 1 dS.m<sup>-1</sup>).

### 6.3.2.2. Nappe fluctuante haute

En situation de nappe fluctuante haute (Figure 6-5-II), et dans la majorité des situations d'irrigation (irrigation actuelle et irrigation réduite de 1 cm) (Figures 6-5-IIb et 6-5-IId), la salinité de la zone racinaire augmente substantiellement. En revanche, pour la même position de la nappe (fluctuante haute), mais avec une dose d'irrigation accrue de 5 cm (Figure 6-5-IIf), la salinité de la zone racinaire se situe au même niveau que celle observée avec une nappe fixe à 2 m de la surface du sol et simulée avec la même dose d'irrigation accrue (Figure 6-5-Ie).

La figure 6-5-IIb montre que la salinité de la zone racinaire simulée pour l'irrigation actuelle et une nappe fluctuante est de l'ordre de 10 dS.m<sup>-1</sup> au jour 1, se salinise fortement au jour 219 (jusqu'à 30 dS.m<sup>-1</sup> dans N50), puis une désalinisation complète est observée au jour 384 avant une nouvelle salinisation au jour 601 (< 7 dS.m<sup>-1</sup>). La surface du profil est par contre épargnée par cette salinisation en particulier aux jours 384 et 601.

La figure 6-5-IId indique qu'avec une dose d'irrigation de 1 cm, la salinisation est plus importante dans la zone racinaire (N38, N50 et N60) passant de 10 dS.m<sup>-1</sup> pendant les jours 1 et 384 à plus de 50 dS.m<sup>-1</sup> pendant les jours 219 et 601. Les couches de surface se salinisent également pendant les jours 219 et 601.

Les simulations HYDRUS 1-D pour prédire EC<sub>1:5</sub> avec l'utilisation d'une dose d'irrigation accrue de 5 cm (Figure 6-5-IIf) montrent que la salinité est très élevée au jour 1 (10 dS.m<sup>-1</sup>), et baisse aux jours 219 et 601 (< 3 dS.m<sup>-1</sup>), alors que la zone racinaire est complètement désalinisée au jour 384.

En somme, la comparaison des simulations HYDRUS 1-D pour une même dose d'irrigation, mais avec des niveaux de nappe différents (nappe fixe à 2 m et nappe fluctuante haute) (Figures 6-5-I et 6-5-II), montre que la fluctuation de la nappe phréatique a plus d'effet sur la salinisation du profil que la dose d'irrigation. En effet, cette comparaison met en évidence qu'à dose d'irrigation égale (actuelle ou réduite), la salinité augmente de façon plus importante lorsque la nappe est dans une position fluctuante haute (Figure 6-5-II), que lorsque la nappe est fixe à 2 m de la surface (Figure 6-5-I).

Cependant, une dose d'irrigation accrue de 5 cm réduit la salinité à moins de 4 dS.m<sup>-1</sup> quant la nappe est fixe à 2 m (Figure 6-5-Ie) et à moins de 3 dS.m<sup>-1</sup> en situation de nappe fluctuante au jour 601 (Figure 6-5-IIf).

La figure 6-5 indique que les EC<sub>1:5</sub> mesurées sur les échantillons de calibration lors des campagnes 3 et 4 du suivi géophysique et correspondants aux jours 384 et 601, sont dans la majorité des cas supérieures aux EC<sub>1:5</sub> simulées par HYDRUS 1-D pour la même période. Cependant, la figure 6-5-IId indique par contre une surestimation de la salinité prédite au jour 601 et également une surestimation de la salinité de la couche de profondeur (25-50 cm) au jour 384.

En outre, la figure 6-5 montre un profil salin ascendant pour les EC<sub>1:5</sub> mesurées. En revanche les profils salins issus des EC<sub>1:5</sub> simulées par HYDRUS 1-D montrent une salinité élevée aux nœuds 50, 60 et 38 (zone racinaire) et une salinité faible dans la couche de surface (nœud 6), ce qui correspond à un profil salin descendant.



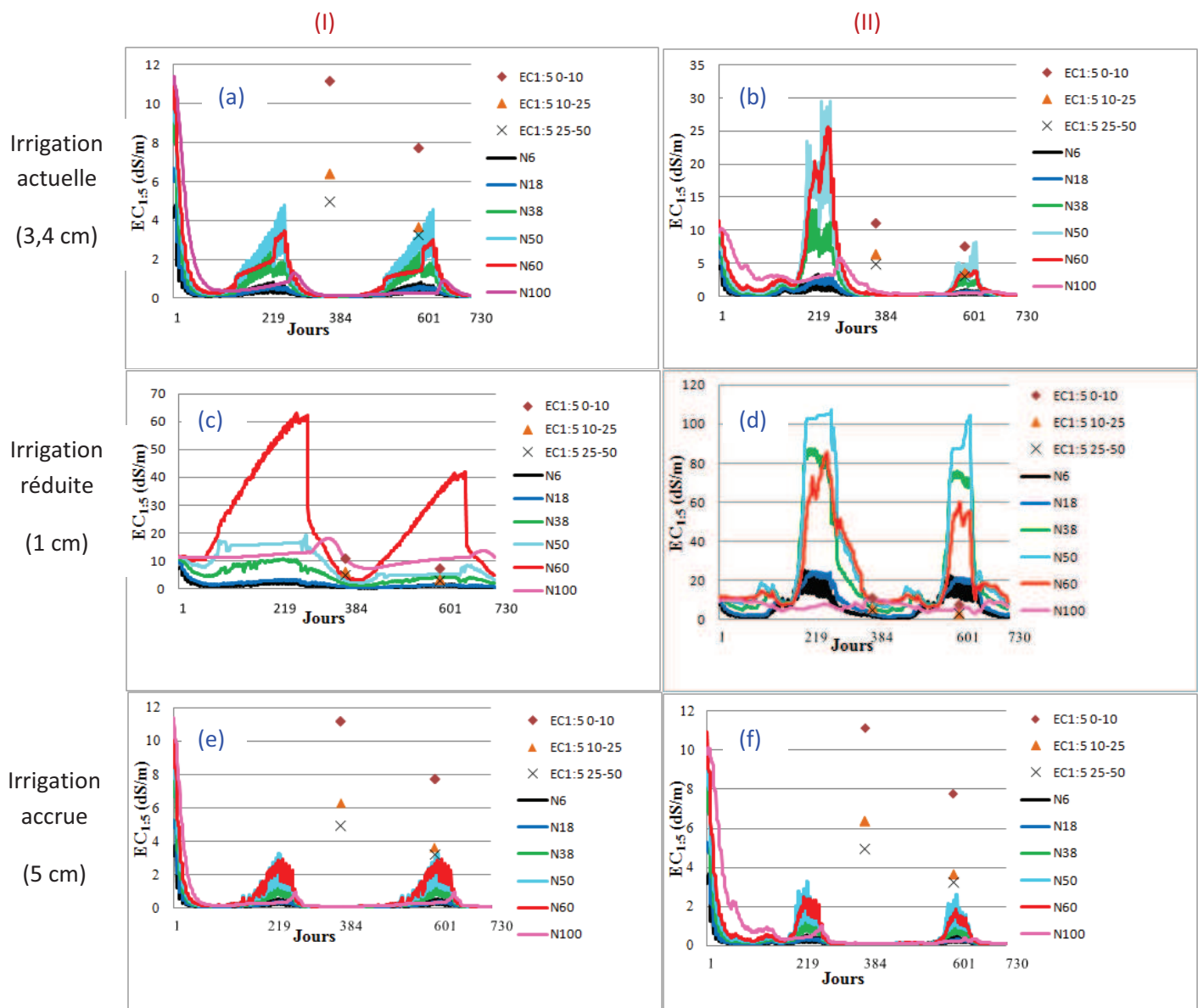


Figure 6-5. Simulations par HYDRUS 1-D des variations verticales de la salinité de la parcelle A2 selon deux hypothèses de niveaux de nappe : (I) une nappe fixe à 2 m et (II) une nappe fluctuante haute et selon trois doses d'irrigation avec les eaux du Mio-pliocène ( $5,3 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ ): (i) dose actuelle, (ii) 1 cm et (iii) 5 cm. Les valeurs mesurées de  $EC_{1.5}$  sont indiquées pour les jours 384 et 601 aux trois niveaux de profondeur mesurés : 0-10 cm, 10-25 cm et 25-50 cm. Les nœuds (Nn) correspondent à des profondeurs 6, 18, 38, 50, 60 et 100 cm dans le profil théorique

### **6.3.3. Les simulations HYDRUS 1-D dans la parcelle B2-1**

Dans la parcelle B2-1, l'irrigation des palmiers se fait avec les eaux du Sénonien ( $3,7 \text{ mS.cm}^{-1}$ ). Nous avons de ce fait utilisé cette eau dans les simulations de la salinité ( $EC_{1:5}$ ) de cette parcelle.

#### **6.3.3.1. Nappe fixe à 2 m**

Les simulations de  $EC_{1:5}$  par HYDRUS 1-D (Figure 6-6-Ia) avec la dose d'irrigation actuelle ( $3,4 \text{ cm} + \text{précipitations}$ ) indiquent une progression de la salinité dans la zone racinaire (N38, N50 et N60). En effet, la salinité passe de  $3 \text{ dS.m}^{-1}$  dans la zone racinaire au jour 1  $\text{dS.m}^{-1}$  à  $5 \text{ dS.m}^{-1}$  au jour 219. Cette zone se désalinise complètement au jour 384, mais se salinise de nouveau au jour 601 ( $5 \text{ dS.m}^{-1}$ ). La partie inférieure de la zone racinaire (N50 et N60) est la plus affectée par la salinité respectivement de 5 et  $3 \text{ dS.m}^{-1}$  alors que la salinité de sa partie haute (N38) n'est que de  $2 \text{ dS.m}^{-1}$ .

La salinité à la surface et en subsurface du profil (N6, N18) est toujours inférieure à  $2 \text{ dS.m}^{-1}$  (jours 1, 219 et 601) puis nulle au jour 384.

Les simulations de la salinité avec une dose d'irrigation réduite  $1 \text{ cm}$  (Figure 6-6-Ic) montrent que la salinité augmente dans la zone racinaire de  $3 \text{ dS.m}^{-1}$  à plus de  $5 \text{ dS.m}^{-1}$  à la base de cette zone (N50 et N60) au jour 219. Au jour 384, la salinité de cette zone baisse à moins de  $3 \text{ dS.m}^{-1}$  mais revient à  $3 \text{ dS.m}^{-1}$  dans les nœuds N38 et N50 au jour 601, alors qu'elle dépasse les  $15 \text{ dS.m}^{-1}$  dans le nœud N60. La salinité des couches de surface varie entre  $0 \text{ dS.m}^{-1}$  au jour 384 et moins de  $3 \text{ dS.m}^{-1}$  aux jours 1, 219 et 601.

La troisième simulation réalisée avec les eaux du Sénonien ( $3,7 \text{ mS.cm}^{-1}$ ) à une dose d'irrigation accrue de  $5 \text{ cm}$  (Figure 6-6-Ie) montre que la salinité de la zone racinaire (N38, N50 et N60) est à moins de  $3 \text{ dS.m}^{-1}$  aux jours 1, 219 et 601, alors qu'elle est proche de  $0 \text{ dS.m}^{-1}$  au jour 384. A la surface du profil, la salinité est inférieure  $1 \text{ dS.m}^{-1}$ .

#### **6.3.3.2. Nappe fluctuante basse**

En situation de nappe fluctuante basse (Figure 6-6-II), il n'y a pas de changement notable dans la salinisation du profil en général et de la zone racinaire en particulier.

En effet, l'utilisation de la dose actuelle d'irrigation en situation de nappe fluctuante basse dans la parcelle B2-1 (Figure 6-6-IIb) fait augmenter légèrement et uniquement la salinité de la base de la zone racinaire (N50 et N60) au jour 219. La salinité de cette zone se situe entre 4 et  $5 \text{ dS.m}^{-1}$  respectivement pour les nœuds N60 et N50.

La figure 6-6-IIId issue de la simulation HYDRUS 1-D avec une dose d'irrigation de 1 cm indique que la fluctuation de la nappe dans la parcelle B2-1 a une légère incidence sur la salinisation de la zone racinaire. En effet, la comparaison des deux figures 6-6-Ic et 6-6-IIId montre que la salinité de cette zone augmente de 5 à 7 dS.m<sup>-1</sup> dans le nœud N38 et de 6 à 13 dS.m<sup>-1</sup> dans le nœud 50, tandis que la salinité du nœud 60 ne varie pas au jour 219. Cette salinisation est également observée au jour 601 avec néanmoins une baisse de la salinité au niveau du nœud N60.

Avec l'utilisation d'une dose d'irrigation accrue de 5 cm et une situation de nappe fluctuante basse (Figure 6-6-IIIf), la salinité de tout le profil ne varie pas pour toute la période simulée (jours 1, 219, 384 et 601) comparativement aux simulations avec une nappe fixe à 2 m de la surface du sol et avec la même dose d'irrigation (5 cm) (Figure 6-6-Ie).

En somme, la comparaison des simulations HYDRUS 1-D pour une même dose d'irrigation, mais avec deux positions de nappe différentes (nappe fixe à 2 m et nappe fluctuante basse) (Figures 6-6-Ia et 6-6-IIb), indique que la fluctuation de la nappe phréatique qui est à un niveau bas dans cette parcelle comparativement à la parcelle A2 (Figure 6-4), n'a pas d'effet négatif sur la salinisation de la zone racinaire.

Hormis une surestimation de la salinité simulée aux nœuds N38 et N50 au moment de l'utilisation de la dose d'irrigation 1 cm (Figures 6-6-Ic et 6-6-IIId), les EC<sub>1:5</sub> mesurées sur les échantillons de calibration lors des campagnes 2 et 4 du suivi géophysique et correspondant aux jours 219 et 601, sont supérieures aux EC<sub>1:5</sub> simulées par HYDRUS 1-D pour la même période (Figure 6-6). Le profil salin des EC<sub>1:5</sub> mesurées (Figure 6-6) est ascendant. A l'opposé, les profils salins simulés par HYDRUS 1-D montrent une salinité élevée dans les nœuds profonds et médians (zone racinaire) et une faible salinité (< 2dS/m) dans les nœuds de surface (nœud 6). Ce résultat est synonyme d'un profil salin descendant.

Pour bien montrer l'effet de la qualité des eaux d'irrigation du Mio-Pliocène (5,3 mS.cm<sup>-1</sup>) utilisée pour la parcelle A2 et du Sénonien (3,7 mS.cm<sup>-1</sup>) utilisée pour la parcelle B2-1 sur la salinisation de la zone racinaire, nous avons comparé les résultats des simulations pour les mêmes doses d'irrigation (Figures 6-5-I et 6-6-I).

Pour toutes les doses d'irrigation (actuelle, 1cm et 5 cm), la qualité des eaux d'irrigation a un effet sur la salinisation de la zone racinaire. En effet, l'utilisation des eaux du Sénonien (3,7 mS.cm<sup>-1</sup>) dans les irrigations limite le risque de salinisation de cette zone en particulier lors de l'utilisation de la dose 1 cm.

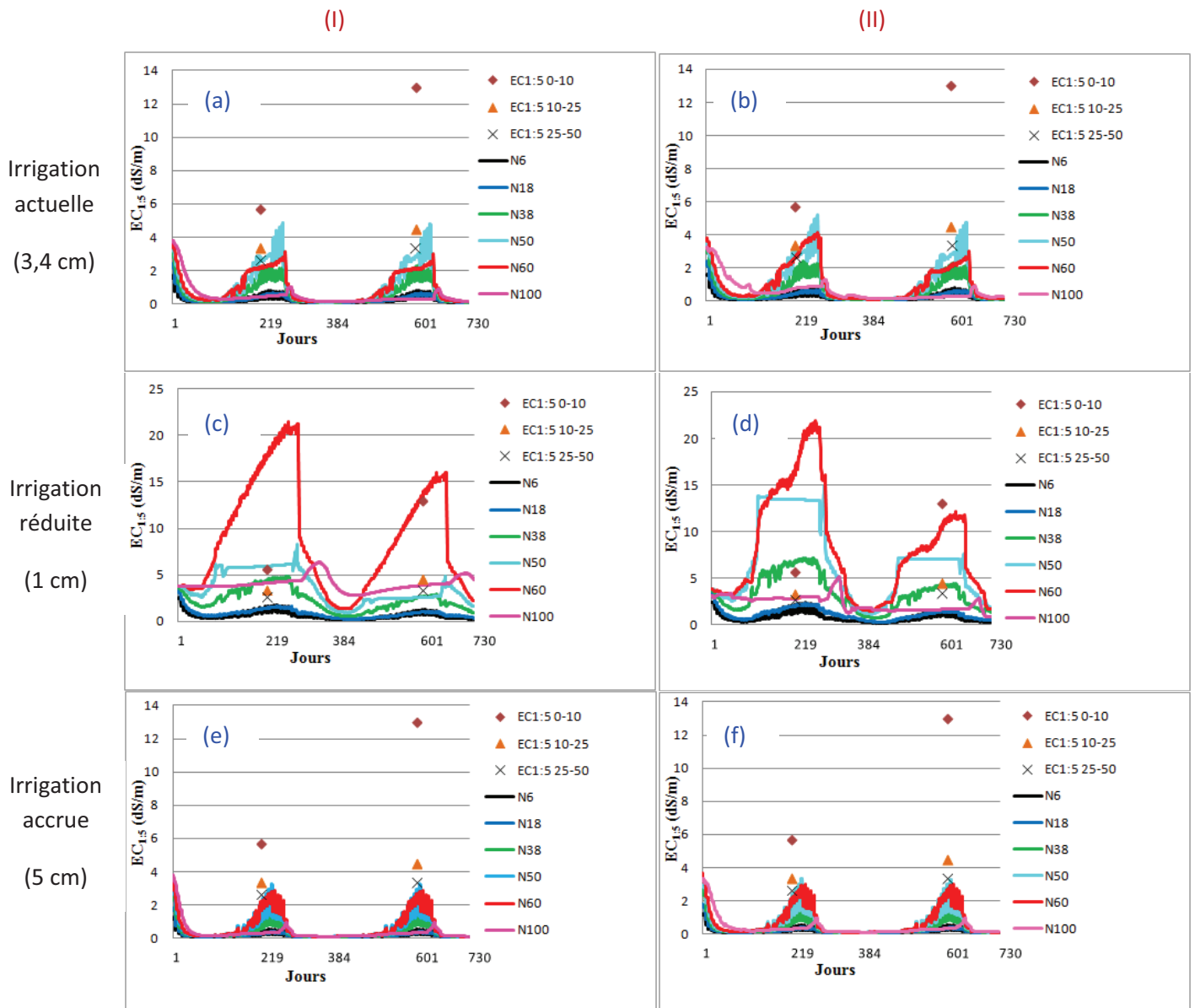


Figure 6-6. Simulations par HYDRUS 1-D des variations verticales de la salinité de la parcelle B2-1 selon deux hypothèses de niveaux de nappe : (I) une nappe fixe à 2 m et (II) une nappe fluctuante et basse, selon trois doses d'irrigation avec les eaux du Sénonien ( $3,7 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) : (i) dose actuelle, (ii) une dose réduite de 1 cm et (iii) une dose accrue de 5 cm. Les valeurs mesurées de  $EC_{1.5}$  sont indiquées pour les jours 219 et 601 aux trois niveaux de profondeur mesurés : 0-10 cm, 10-25 cm et 25-50 cm. Les nœuds ( $N_n$ ) correspondent à des profondeurs 6, 18, 38, 50, 60 et 100 cm dans le profil théorique

## 6.4. DISCUSSION

### 6.4.1. Comparaison entre simulations et les mesures des $EC_{1:5}$

Il est nécessaire de rappeler que les prélèvements des échantillons de calibration du modèle de prédiction de la salinité par méthode géophysique EM38 (Cf. Chapitre 5) ont été réalisés dans les espaces inter palmiers, qui ne sont pas directement irrigués : nous pensions en effet que la proximité du système racinaire des palmiers risquait de rendre l'échantillonnage difficile et éventuellement de briser la corrélation recherchée entre résistivité apparente et conductivité électrique des sols, d'où ce choix. Les simulations hydrologiques avec HYDRUS 1-D sont par contre réalisées avec des eaux de qualités différentes du Mio-Pliocène ( $5,3 \text{ mS.cm}^{-1}$ ) et du Sénonien ( $3,7 \text{ mS.cm}^{-1}$ ) au niveau des planches d'irrigation, à proximité des arbres. Avec le modèle unidimensionnel HYDRUS 1-D adopté dans cette première approche prospective, nous ne pouvions simuler des transferts latéraux de flux d'eau et de solutés et n'étions donc pas en mesure de simuler l'évolution du profil hydrique dans une zone non directement irriguée, mais influencée par des flux latéraux et des fluctuations de niveau de la nappe.

Les variations de teneur en eau et de salinité aux points mesurés et simulés ne peuvent donc pas être comparées puisque les processus hydrologiques sont différents : (i) pour les sites mesurés au niveau de trois couches de sol : de surface (0-10 cm), de subsurface (10-25 cm) et de profondeur (25-50 cm), l'humidité du sol varie en surface entre la capacité au champ et le point de flétrissement permanent ; les facteurs climatiques sont très favorables à l'ascension des sels, à la concentration de la solution du sol et à la précipitation des sels dans la zone racinaire et l'horizon superficiel entraînant la salinisation. (ii) pour les sites simulés, l'humidité du sol en surface est en permanence voisine de la capacité au champ, en raison des apports d'eaux réguliers dans les planches d'irrigation. Il y a de ce fait une lixiviation des sels de la surface vers la base du profil et l'ascension capillaire responsable du self mulching de surface est réduite (Djili *et al.*, 2003).

### 6.4.2. Comparaison des différents scénarios de simulations

Les simulations HYDRUS 1-D (Figures 6-5 et 6-6) mettent en évidence l'influence de la fluctuation de la nappe phréatique sur la salinisation de la zone racinaire. Elles sont également aptes à montrer l'effet des doses d'irrigation sur la salinisation du profil et de la zone racinaire en particulier. En outre, elles quantifient l'effet de la qualité des eaux d'irrigation dans la salinisation de la zone racinaire.

En effet, la figure 6-5-II met en évidence le rôle que joue la nappe phréatique fluctuant entre 0,2 m et 1,8 m dans la parcelle A2 dans la salinisation de la zone racinaire du palmier dattier du site d'étude. La fluctuation de cette même nappe dans la parcelle B2-1 (Figure 6-6-II) a moins d'impact sur la salinisation en raison de son niveau relativement bas (entre 0,8 m et 2,4 m) comparativement à celui observé dans la parcelle A2.

Ainsi, les simulations HYDRUS 1-D ont montré un effet saisonnier de la transpiration du palmier dattier dans l'oasis de Fatnassa (sud de la Tunisie) et sa relation avec la fluctuation de la nappe phréatique et la salinisation de la zone racinaire (Askri *et al.*, 2014).

**Tableau 6-25. Tableau synthétique croisant les scénarios d'irrigation, la position de la nappe et la salinité de la zone racinaire dans la parcelle A2**

Parcelle A2	Nappe fixe à 2 m			Nappe fluctuante haute		
	irrigation actuelle (3,4 cm)	irrigation réduite (1cm)	irrigation accrue (5cm)	irrigation actuelle (3,4 cm)	irrigation réduite (1cm)	irrigation accrue (5cm)
EC max (dS.m <sup>-1</sup> ) à 38 cm	9,9	11,3	8,6	13,1	87,5	8,7
EC max (dS.m <sup>-1</sup> ) à 60 cm	11,2	62,9	10,7	25,7	85,6	10,9
Durée (jours) EC > 4 dS.m <sup>-1</sup> à 38 cm	14	394	8	96	718	8
Durée (jours) EC > 4 dS.m <sup>-1</sup> à 60 cm	22	688	15	126	730	15



**Tableau 6-26. Tableau synthétique croisant les scénarios d'irrigation, la position de la nappe et la salinité de la zone racinaire dans la parcelle B2-1**

Parcelle <b>B2-1</b>	Nappe fixe à 2 m			Nappe fluctuante basse		
	irrigation actuelle (3,4 cm)	irrigation réduite (1cm)	irrigation accrue (5cm)	irrigation actuelle (3,4 cm)	irrigation réduite (1cm)	irrigation accrue (5cm)
	EC max (dS.m <sup>-1</sup> ) à <b>38 cm</b>	3,4	4,8	2,9	3,4	7,2
EC max (dS.m <sup>-1</sup> ) à <b>60 cm</b>	3,8	21,5	3,6	4,2	21,8	3,7
Durée (jours) EC > 4 dS.m <sup>-1</sup> à <b>38</b> cm	0	96	0	0	240	0
Durée (jours) EC > 4 dS.m <sup>-1</sup> à <b>60</b> cm	0	520	0	7	497	0

Les tableaux 3 et 4 croisent des indicateurs de salinité maximale et de durée de salinité pour les différents scénarios étudiés. Leur comparaison confirme qu'il y a une salinisation croissante de la zone racinaire située entre 38 et 60 cm par les eaux de la nappe phréatique fluctuante haute (parcelle A2). Cet effet de la nappe est moins important dans la parcelle B2-1 (nappe fluctuante basse). En effet, il y a une augmentation de la conductivité électrique (EC) maximale à 60 cm et à 38 cm de profondeur en situation de nappe fluctuante haute. Cette augmentation est moins importante à 60 cm et totalement absente à 38 cm pour les simulations réalisées avec les doses d'irrigation actuelle et accrue, en situation de nappe fluctuante basse.

En plus, pour les mêmes doses d'irrigation, la salinité de la zone racinaire dans la parcelle A2 est à plus de 4 dS.m<sup>-1</sup> pendant environ 100 jours de la période de suivi (730 jours) pour les simulations avec les doses actuelles et pendant 700 jours pour les doses réduites. Ce seuil de salinité n'est néanmoins atteint que pendant moins de 15 jours avec la dose accrue de 5 cm. Dans la parcelle B2-1, par contre, elle est à moins de 4 dS.m<sup>-1</sup> pendant toute la période de suivi à 38 cm de profondeur pour les doses actuelle et accrue et dépasse légèrement 4 dS.m<sup>-1</sup> en profondeur (60 cm) pendant une courte durée (7 jours) avec la dose actuelle. Cependant, la EC de la zone racinaire est pendant plus de 240 jours supérieure à 4 dS.m<sup>-1</sup> avec la dose réduite.

Le rôle de la fluctuation de la nappe phréatique est donc déterminant dans la salinisation de la zone racinaire dans la parcelle A2, avec l'utilisation des doses actuelles (3,4 cm) et réduites (1 cm), mais ce rôle est réduit avec l'utilisation de la dose accrue (5 cm). Dans la parcelle B2-1 où la nappe est fluctuante basse, elle a une influence moindre, voire nulle, en regard de l'effet des doses d'irrigations actuelles et réduites respectivement.

#### **6.4.3. Identification des pratiques d'irrigation optimales**

La comparaison des trois doses d'irrigation croissantes (Figures 6-5 et 6-6) : réduite (1 cm), 3,4 cm que nous avons appelé dose actuelle à laquelle s'ajoute les pluies journalières, et enfin l'utilisation d'une dose d'irrigation accrue de 5 cm, montre que l'utilisation de la dose 1 cm provoque une salinisation importante de la zone racinaire de l'ordre de 60 dS.m<sup>-1</sup> dans la parcelle A2 et de 20 dS.m<sup>-1</sup> dans la parcelle B2-1 même quant la nappe est fixe à 2 m de la surface du sol. Cette salinisation est aggravée dans le cas d'une nappe fluctuante où la salinité de la zone racinaire dépasse les 100 et 20 dS.m<sup>-1</sup> respectivement dans les parcelles A2 et B2-1. En revanche, une dose d'irrigation de 5 cm permet dans toutes les positions de la nappe (2 m ou fluctuante haute/basse) de réduire la salinité de la zone racinaire du palmier dattier de cette palmeraie. Cette dose d'irrigation de 5 cm apporte une fraction de lessivage suffisante à la lixiviation des sels de la zone racinaire (Valles *et al.*, 1988; Beltrán, 1999; Djili *et al.*, 2003; Hachicha, 2007).

Les tableaux 3 et 4 montrent que la dose d'irrigation réduite 1 cm cause une forte salinité à 38 cm et 60 cm de profondeur (zone racinaire) par rapport aux doses actuelles (3,4 cm) et accrues (5 cm) en positions de nappe fixe à 2 m et s'aggrave d'avantage en position de nappe fluctuante haute et basse. En effet, la salinité est à plus de 4 dS.m<sup>-1</sup> pendant plus de la moitié de la période de suivi (730 jours) quant la nappe est fixe à 2 m et plus de 700 jours avec une nappe fluctuante haute. La zone racinaire est donc presque tout le temps salée à plus 4 dS.m<sup>-1</sup> avec une nappe fluctuante haute (parcelle A2). Le même effet est observé dans la parcelle B2-1 mais avec une durée moins importante. En revanche, l'irrigation avec une dose accrue 5 cm, ne salinise que pendant moins de 15 jours la zone racinaire à plus de 4 dS.m<sup>-1</sup> quel que soit le niveau de la nappe dans la parcelle A2. Dans la parcelle B2-1, cette dose de 5 cm maintient la salinité de zone racinaire inférieure à 4 dS.m<sup>-1</sup> pendant toute la période de suivi dans les deux positions de la nappe dans cette parcelle.

Cependant, l'utilisation raisonnée de la ressource en eau, impose une dépendance de la dose d'irrigation optimale au contexte hydrologique et notamment des fluctuations de la nappe.

On doit de ce fait pratiquer une irrigation de précision (fréquences échelonnées sur une semaine) qui s'adapte au contexte local et éviter d'avoir les mêmes pratiques partout sur le périmètre ; d'où aussi l'intérêt de faire un suivi géophysique qui permet d'intégrer dans le raisonnement l'état actuel et ponctuel de la salinité des sols.

En effet, [Askri et al., \(2014\)](#) recommande de réduire les intervalles des irrigations et le maintien de la nappe phréatique à plus de 0,75 m sous la surface du sol pour limiter la salinisation des palmeraies de Fatnassa (Tunisie).

La comparaison des figures 6-5-I et 6-6-I donnant une variation de la salinité avec une nappe fixe à 2 m de la surface du sol et avec des doses d'irrigation similaires, montre qu'il y a un effet de la qualité des eaux d'irrigation sur la salinisation de la zone racinaire du palmier dattier.

En effet, pour toutes les doses d'irrigation utilisées (réduite, actuelle et accrue), la salinité de la zone racinaire est moins importante lorsqu'on utilise les eaux du Sénonien (EC de 3,7 mS.cm<sup>-1</sup>, SAR=12,4) dans la parcelle B2-1 alors que l'irrigation avec les eaux du Mio-Pliocène (5,3 mS.cm<sup>-1</sup>, SAR=6,9) surpasse le seuil standard de salinisation en zones arides ([Daoud et Halitim, 1994](#)) et salinise dangereusement la zone racinaire.

Pour optimiser l'irrigation, il faut donc tenir compte à la fois de l'état actuel de salinité, du contexte hydrologique et de la qualité de l'eau apportée.

#### **6.4.4. Fréquence des irrigations**

Nous rappelons que toutes les simulations HYDRUS 1-D ont été réalisées avec des doses d'irrigation croissantes à une fréquence de 5 heures d'irrigation par semaine. La dose 5 cm permet une réduction de la salinité de la zone racinaire à moins de 3 dS.m<sup>-1</sup> dans toutes les situations testées. Une partie de cette salinité dans la zone racinaire serait due à la lixiviation des sels accumulés dans des couches de surface. Le maintien de l'humidité du sol à la capacité au champ réduirait la concentration de la solution du sol en sel en surface et dans la zone racinaire.

D'autre part, l'utilisation d'une approche HYDRUS 2-D permettra d'inclure dans la modélisation l'impact des palmiers sur la salinité et le contrôle de la recharge de la nappe avec les eaux de la lixiviation. Elle facilitera aussi les ajustements par rapport à un modèle de référence (profil salin) voulu.

## 6.5. CONCLUSION

Soumise à des changements anthropiques induits par des irrigations mal contrôlées avec des eaux salées dans un contexte de sols très sableux et aggravés par une nappe phréatique qui fluctue à faible profondeur (0,2 - 2,4 m) et un climat fort évaporant, les palmeraies de la région de Ouargla en Algérie sont menacées par une chute vertigineuse de leurs productions dattières pouvant conduire jusqu'au dépérissement de ce patrimoine oasien ancestral.

Dans ce contexte, l'objectif de ce travail était de développer une démarche de modélisation représentant l'évolution verticale de la salinité qui menace une zone racinaire du dattier située entre 38 et 50 cm de profondeur dans cette oasis.

Les principaux résultats de cette modélisation HYDRUS 1-D indiquent que les simulations mettent en évidence l'effet salinisant d'une fluctuation haute (parcelle A2) de la nappe phréatique salée. La dose d'irrigation réduite 1 cm engendre également la plus forte salinisation de cette zone ( $> 20 \text{ dS.m}^{-1}$ ). A l'opposé, cette approche de modélisation 1D permet d'identifier une dose d'irrigation optimale de 5 cm capable de maintenir le niveau de la salinité au niveau le plus bas de cette étude ( $< 3 \text{ dS.m}^{-1}$ ). Néanmoins ce niveau de la salinité devrait être réduit si l'on ne veut pas perdre la moitié (50 %) du rendement en datte (FAO, 1990). En plus dans un système endoréique comme la cuvette de Ouargla en Algérie, la fréquence de cette dose (5cm) doit être échelonnée sur une semaine et par là maintenir l'humidité du sol à la capacité au champ, dans le but de l'ajuster aux fluctuations de la nappe dans chaque parcelle. De surcroît, la modélisation HYDRUS 1-D montre également l'effet de la qualité des eaux d'irrigation sur la salinisation de la zone racinaire du palmier dattier. En effet, une eau de forte salinité ( $> 5 \text{ mS.cm}^{-1}$ ) franchit la limite standard de salinisation de la zone racinaire dans ces milieux fortement évaporants (Daoud et Halitim, 1994).

Dans la perspective de prendre en compte les variations latérales de l'humidité du sol dans les espaces inter palmier, une modélisation HYDRUS 2D est alors envisageable.

Une approche plus générique qui associe les exigences de lixiviation, le rendement des cultures et les stratifications du sol qui modifient la salinisation des terres sera expérimentée. La modélisation SALTMED (Ragab, 2002) capable d'inclure ces paramètres dans les simulations est envisagée.

**Dynamique spatio-temporelle de la salinité de sols sableux irrigués en milieu aride.**

**Application à une palmeraie de la cuvette de Ouargla en Algérie**

## **CONCLUSION GÉNÉRALE**

*"On vit de ce que l'on obtient. On construit sa vie sur ce que l'on donne"*

*Winston Churchill*

### **Conclusion générale**

La palmeraie de la cuvette de Ouargla (sud est algérien) est un écosystème endoréique fragile. Elle est aujourd'hui confrontée à de nombreuses contraintes à la fois environnementales liées essentiellement à l'aridité du climat, et d'autres de natures anthropiques telles que le pompage abusif des eaux du Continental Intercalaire. En conséquence, elle est soumise aux effets négatifs de la salinisation de ses sols et à la remontée des eaux salées de la nappe phréatique due principalement à une irrigation et à un assainissement mal gérés à l'échelle de l'oasis.

Face à cette situation, il est donc à la fois judicieux et urgent d'appréhender la variabilité spatiotemporelle de la salinité de ces vastes espaces oasiens, en vue de développer des stratégies efficaces de pratiques de gestion agricole et de répartition de l'eau d'irrigation.

### **Rappel du contexte et des objectifs de la thèse**

En conséquence, l'objectif de cette étude était de décrire les changements spatiotemporels de salinité aggravés par une nappe salée qui fluctue à faible profondeur (0,2 - 2,4 m) selon les saisons dans un contexte de sols sableux (Salic Solonchaks Aridic) d'une palmeraie irriguée dans une oasis d'Algérie. En effet, nous avons testé la capacité de prospection de la conductivité électromagnétique (EM) et son exploitation par les Systèmes d'Informations Géographiques (SIG). Des modèles de prédictions empiriques de salinité sont en suite construits avec des arbres de régressions Cubist et par la méthode déterministe de ESAP.

Un second volet associé été de modéliser l'évolution de la salinité à l'échelle de la palmeraie en tenant compte de l'état initial observé et de son évolution au cours de la période d'étude, des conditions climatiques, des niveaux de la nappe, des apports d'eau par irrigation et de l'EvapoTranspiration Potentielle (ETP).



*Synthèse des résultats acquis*

- Sur le système étudié
  - Les caractéristiques des sols de la région d'étude

*Le choix de cette région obéit au cadre dans lequel nous avons inscrit notre problématique et répond aux impératifs d'analyse de deux systèmes agricoles : une zone de palmeraie (Parcelles A2, B1, B2-1, B2-2, C2, D1 et D2-1) et une zone de sol nu adjacente (Parcelles E2 et F).*

Les sols des parcelles nues (E2 et F) sont caractérisés par une texture sableuse. Ils sont peu calcaire (Baize, 1988), gypseux dans la parcelle E2 à moyennement gypseux dans la parcelle F. Ces sols ont une très faible teneur en matière organique et un pH alcalin. Les sols des parcelles nues E2 et F sont très salés à extrêmement salés ( $3 \text{ dS.m}^{-1} < \text{EC} < 35 \text{ dS.m}^{-1}$ ).

Les sols des parcelles cultivées sont sableux dans tout le profil. Ils sont hypocalcaire ( $\text{CaCO}_3 \leq 15 \%$ ) (AFES, 2008) et fortement gypseux (FAO, 2006b). Le taux de gypse varie entre 8 % et 50 % dans les parcelles irriguées (A2, C2, B1 et D1) et il est inférieur à 40 % dans la parcelle occasionnellement irriguée (B2-1). Dans les parcelles non irriguées, le sol est non gypseux ( $\leq 7 \%$ ) dans la parcelle D2-1 à modérément gypseux ( $3 \% \leq \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \leq 18 \%$ ) dans la parcelle B2-2 ce qui serait probablement dû aux accumulations antécédentes. Le sol est très pauvre en matière organique ( $\text{MO} < 1 \%$ ). Le pH du solum est alcalin ( $7 \leq \text{pH} \leq 8$ ). Les sols de ces parcelles sont très salés à extrêmement salés en particulier dans les horizons de surface ( $0,5 \text{ dS.m}^{-1} < \text{EC} < 22 \text{ dS.m}^{-1}$ ).

Les sols de cette palmeraie sont de texture sableuse (90% de sable) et présentent une densité apparente relativement uniforme de l'ordre de  $1,3 \text{ g/cm}^3$ . Ils sont classés selon la World Reference Base (WRB) (FAO, 2006a) dans le groupe des Solonchaks (Salic, Aridic). Ils sont sujets à des fluctuations saisonnières de la nappe phréatique saline ( $\text{EC} = 13 \text{ mS.cm}^{-1}$  en moyenne). De même, ils sont hypocalcaires ( $< 15 \%$ ) et ils sont affectés par des accumulations salines et gypseuses en particulier dans la zone racinaire située entre 38 et 60 cm de profondeur. Leur taux de matière organique est très faible (0,5%). In fine, la conductivité électrique de leur extrait aqueux 1:5 ( $\text{EC}_{1:5}$ ) ( $14 \text{ dS.m}^{-1}$ ) indique une forte salinité dans les horizons de surface par rapport à ceux de profondeur d'où un profil salin de type ascendant.

Le fonctionnement hydrologique du périmètre est déterminé par une irrigation gravitaire dans des planches d'irrigation avec les eaux des forages du Mio-Pliocène ( $EC = 5,3 \text{ mS.cm}^{-1}$ ,  $SAR = 6,9$ ) et du Sénonien ( $EC = 3,7 \text{ mS.cm}^{-1}$ ,  $SAR = 12,4$ ). Le drainage de ces parcelles se fait grâce à des drains à ciel ouvert et qui sont dans l'ensemble mal entretenus. La salinité est donc en partie d'origine géologique (primaire) induite par une nappe phréatique proche de la surface du sol, mais elle s'accroît continuellement en raison d'une mauvaise gestion de la ressource en eau (salinisation secondaire).

Les données piézométriques de sept piézomètres répartis dans la zone d'étude révèlent l'existence, sur l'ensemble de la zone d'étude, d'une nappe située à faible profondeur qui fluctue entre un niveau bas d'octobre à novembre de chaque année ( $> 1,5 \text{ m}$ ) et un niveau haut de février à septembre ( $\leq 1 \text{ m}$ ). La transition entre ces deux niveaux se fait en environ 2 mois lors de la phase de remontée et en un mois en phase de descente. Les variations de niveaux sont similaires entre les piézomètres avec, néanmoins, des différences selon leur position topographique.

- Les voies de remédiation de la salinité du périmètre
  - La structure spatio-temporelle de la salinité
    - *La pertinence des approches géophysiques pour détecter les évolutions de la salinité*

*La conductivité électrique apparente ( $EC_a$ ) a été mesurée par un dispositif EM38 au pas de 10 m ou 20 m d'intervalle (2889 points) à quatre dates d'échantillonnage entre mars 2009 et novembre 2010 ; de plus, des campagnes de mesure de la  $EC_{1.5}$  pour 30 points choisis au hasard à chaque date ont été réalisées à des fins de calibration et de validation des modèles de prédiction.*

*Des modèles de prédiction par arbres de régression Cubist et par le module de régression linéaire multiple (MLR) du logiciel ESAP ont été ajustés et développés pour chaque date pour prédire les  $EC_{1.5}$  à partir d'informations précises sur la zone d'étude (modèle spécifique) ou à partir d'informations plus globales pouvant être extrapolées hors du site d'étude (modèle général).*

La comparaison des performances des deux modèles de prédiction (Cubist et ESAP) montre que la salinité est mieux prédite par les modèles d'arbres de régression Cubist que par les modèles MLR. Pour la couche profonde (25-50 cm), les modèles Cubist étaient plus précis avec le modèle spécifique ( $R^2 = 0,8$ ;  $RMSE = 1,6 \text{ dS.m}^{-1}$ ) que le modèle général ( $R^2 = 0,4$ ;  $RMSE = 2,5 \text{ dS.m}^{-1}$ ). La précision de la prédiction des deux modèles a diminué depuis le bas vers le haut du profil du sol.

In fine, la combinaison de prospections géophysiques (EM) et de données de calibration  $EC_{1:5}$  associées à l'outil de prédiction Cubist, a permis de décrire les variations inter-parcellaires de la salinité et de sa dynamique saisonnière à différentes profondeurs. Les résultats ont mis en évidence une grande variabilité spatiale et temporelle de la salinité respectivement entre les parcelles et au niveau de la couche de surface. Dans la deuxième couche par contre, la variation temporelle est négligeable entre les campagnes de la même saison (*i.e.* 1 et 3, 2 et 4). Dans la couche de profondeur, les prédictions Cubist indiquent une variation inter-parcellaire pendant la première campagne (mars 2009), et qui sera estompée lors de la même saison en 2010. Cette variation est moins importante pendant les campagnes d'octobre 2009 et 2010. Ce résultat reflète la capacité des modèles d'arbre de régression d'inférence à prédire la tendance générale de la distribution de la salinité que les modèles classiques MLR.

- Approche de modélisation hydrologique 1D

*Il s'agissait de trouver le meilleur scénario d'irrigation qui tiendrait compte de la position de la nappe phréatique, des doses et de la qualité des eaux d'irrigation tout en incluant les paramètres climatiques et les données du profil pour d'une gestion durable de la palmeraie. Ceci suppose une limitation des risques de salinisation de la zone racinaire des palmiers tout en modérant la consommation d'eau. La question de la mise en valeur de nouveaux périmètres irrigués est également posée.*

Les résultats de cette modélisation HYDRUS 1D mettent en exergue deux facteurs majeurs générant une salinisation excessive de la zone racinaire (38 à 50 cm de profondeur). Il s'agit de la nappe fluctuante haute (parcelle A2) et de la dose d'irrigation 1 cm (faible). La modélisation a permis aussi d'identifier une dose d'irrigation optimale (5cm) qui maintiendrait le niveau de la salinité à moins de 3 dS.m<sup>-1</sup>. Néanmoins cette dose ne préserverait que de la moitié des rendements en datte selon la [FAO \(1990\)](#). De même, HYDRUS 1D fait apparaître aussi la part de la qualité des eaux d'irrigation dans la salinisation de la zone non saturée. En effet, les eaux du Mio-Pliocène (5,3 mS.cm<sup>-1</sup>, SAR=6,9) salinisent d'avantage la zone racinaire que celles du Sénonien (3,7 mS.cm<sup>-1</sup>, SAR= 12,4).

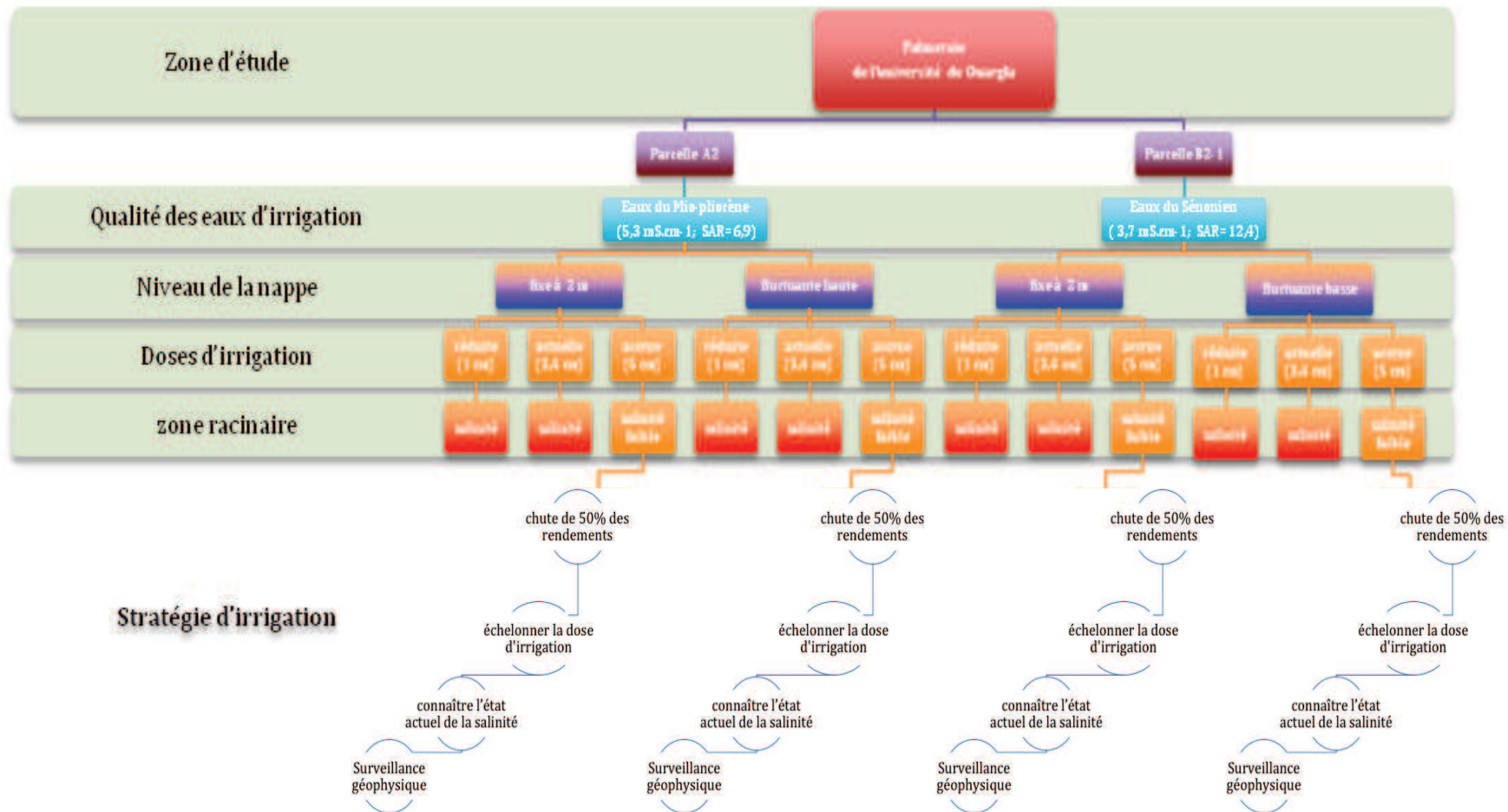


Figure 6-7. Arbre décisionnel de la stratégie d'irrigation selon les différents scénarios de la modélisation hydrologique HYDRUS 1-D

## Perspectives de recherche

Ces conclusions nous suggèrent que pour améliorer le modèle de prédiction de la salinité, il est nécessaire :

- de réaliser des campagnes complémentaires afin d'améliorer la calibration du modèle. Il est donc à la fois nécessaire de densifier les mesures EM par des mesures continues, ce qui suppose d'ajouter un enregistreur de données (data logger) à l'EM38. Il est aussi recommandé d'effectuer des prélèvements d'échantillons serrés pour limiter la variabilité de la salinité à courte distance *i.e.* entre les bobines de l'appareil de mesure EM (nugget variation), comme cela a été décrit par [Corwin et Lesch \(2005b\)](#). Ce dernier point fait l'objet d'une recherche par notre équipe depuis mars 2013. Une telle variabilité peut être obtenue par un échantillonnage très dense sur plusieurs sites sur un rayon de 1 m.
- l'intégration dans les modèles existants de nouvelles données qui influenceraient la salinité du sol, en incluant dans les fonctions de prédiction géophysique des facteurs comme la composition du sol, la texture et la structure. Il est aussi souhaitable de chercher des combinaisons de descripteurs capables de représenter le rôle de l'humidité dans les modèles de prédiction de la salinité.

Dans le volet modélisation hydrologique et de recherche d'approche de gestion de l'évolution de la salinité, il est conseillé :

- d'étudier des zones directement irriguées et non pas simplement des zones inter-palmiers où les transferts d'eau ne sont que latéraux ;
- de renforcer le dispositif de mesure des fluctuations de la nappe et du suivi de la salinité
  - pour tenir compte du contexte régional sur les hauteurs de nappe et en tenir compte dans la modélisation hydrologique
  - pour piloter l'irrigation en tenant compte de la hauteur de la nappe : estimation des remontées capillaires

- l'amélioration de la modélisation du fonctionnement hydrologique du système par
  - l'utilisation de la modélisation hydrologique HYDRUS 2D/3D permettra une prise en charge des variations latérales de l'humidité du sol de l'espace inter palmier dans la prédiction de la salinité.
  - l'utilisation d'une approche plus générique (SALTMED) (Ragab, 2002) de modélisation hydrologique et de croissance de la plante après calibrage avec un modèle de culture pour le palmier dattier.

Nous aurons aussi recours à une autre méthode géophysique de prospection par la résistivité électrique. Cette technique de mesures sera réalisée simultanément ou indépendamment des mesures EM 38. Ce travail nous révélera la méthode la plus adaptée au contexte locale et régionale.

**Dynamique spatio-temporelle de la salinité de sols sableux irrigués en milieu aride**

**Application à une palmeraie de la cuvette de Ouargla en Algérie**

## **BIBLIOGRAPHIE**



**Références bibliographiques** (Agriculture Ecosystem Environment style)

- Abdel-Razek, M., Gaiser, T., Diekkrüger, B., Goldbach, H., 2010. Salinity development during three decades in the Oasis of Ktoua, south east Morocco. In: Tielkes, E. (Ed.), *Tropentag 2010: International Research on Food Security, Natural Resource Management and Rural Development*, Zurich, Switzerland.
- ABHS, 2006. *Eaux et Sols en Algérie (Gestion et impact sur l'environnement)*. In: synthèse, R.d. (Ed.). Agence de Bassin Hydrographique Sahara, Ouargla, p. 392.
- Abrol, P., Yadav, J.S.P., Massoud, F.I., 1988. Salt affected soils and their management. FAO, Rome.
- Abrol, P., Yadav, J.S.P., Massoud, F.I., 1988. Salt affected soils and their management. FAO, Rome.
- Adam, I., Michot, D., Guero, Y., Soubega, B., Moussa, I., Dutin, G., Walter, C., 2012. Detecting soil salinity changes in irrigated vertisols by electrical resistivity prospecting during a desalinisation experiment. *Agricultural Water Management* 109, 1-10. doi:10.1016/j.agwat.2012.01.017
- Adcock, D., Armstrong, R., Best, F., Taylor, I., Chittleborough, D., Imhof, M., McDonald, G., Nuttall, J., Waite, A., Wilhelm, N., Unkovich, M., 2006. *Salinity & Sodicity. Subsoil manual*. Australia GRDC Subsoils Project SPI08, Australia.
- AFES, 2008. *Référentiel pédologique*. Quae, France.
- AFNOR, 1999. *Qualité des sols - Recueil de normes française AFNOR*.
- AFNOR, 1999a. *Qualité des sols - Recueil de normes française AFNOR*.
- Allen, R.G., Pereira, L., Raes, D., M., S., 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop waters requirements - FAO irrigation and drainage paper 56. FAO.
- Allred, B.J., Daniels, J.J., Ehsani, M.R., 2008. *Handbook of Agricultural Geophysics*. CRC Press (Taylor & Francis Group an informa business), New YORK.
- Amezketta, E., 2007a. Use of an electromagnetic technique to determine sodicity in saline-sodic soils. *Soil Use and Management* 23, 278–285. doi:10.1111/j.1475-2743.2007.00094.x
- Amezketta, E., 2007b. Soil salinity assessment using directed soil sampling from a geophysical survey with electromagnetic technology: a case study. *Spanish Journal of Agricultural Research* 5, 91-101. doi:10.5424/sjar/2007051-225
- ANRH, 2004. Note relatives à la remontée des eaux dans la cuvette de Ouargla. ANRH, Ouargla, p. 11.
- Ashktorab, H., Pruitt, W.O., U, K.T.P., 1994. Partitioning of Evapotranspiration Using Lysimeter and Micro-Bowen-Ratio System. *J. Irrig. Drainage Eng-ASCE* 120, 450-464. doi: 10.1061/(asce)0733-9437(1994)120:2(450)
- Askri, B., Ahmed, A.T., Abichou, T., Bouhlila, R., 2014. Effects of shallow water table, salinity and frequency of irrigation water on the date palm water use. *Journal of Hydrology* 513, 81-90.
- Aubert, G., 1960. Les sols de la zone aride. Etude de leur formation, de leurs caractères, de leur utilisation et de leur conservation. In: UNESCO (Ed.), *Colloque général sur les problèmes de la zone aride*. UNESCO, Paris, pp. 127-150.
- Aubert, G., 1976. Les sols sodiques en Afrique du nord. *Annales de l'INA* 6, 12.
- Ayers, R.S., Westcot, D.W., 1985. *Water quality for agriculture*. FAO irrigation and drainage paper N° 29, Rome.

- Baali, C., 1986. Contribution à l'étude de l'évapotranspiration potentielle dans un oasis du Sahara algérien. (Influence de l'advection) Institut des sciences de la nature. USTHB, Alger, p. 125.
- Babahani, S., 2011. Analyses biologique et agronomique de palmiers mâles et conduite de l'éclaircissage des fruits chez les cultivars Ghars et Deglet Nour. Agronomie saharienne. Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie El Harrach-Alger, p. 223.
- Baize, D., 1988. Guide des analyse courantes en pédologie : choix, expression, présentation, interprétation. INRA, Paris.
- Barker, R.D., 1989. Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays. *Geophysics* 54, 1031-1037. doi:10.1190/1.1442728
- Bel, F., 1969. Etude des nappes aquifères de la région de Ouargla. (rapport dactylographié). Direction départementale des travaux publics, de l'hydrographie et de la construction des oasis, Ouargla.
- Beltrán, J.M.n., 1999. Irrigation with saline water: benefits and environmental impact. *Agricultural Water Management* 40, 183-194. doi: 10.1190/1.1442728
- Benbrahim, F., 2001. Etude de l'effet saisonnier de la nappe phréatique sur la dynamique des sels solubles dans un sol cultivée et non cultivée dans la cuvette de Ouargla (cas de l'exploitation de l'I.T.A.S). ITAS. Université Kasdi Merbah, Ouargla, p. 115.
- Bennett, D.L., George, R.J., 1995. Using the EM38 to measure the effect of soil salinity on *Eucalyptus globulus* in south-western Australia. *Agricultural Water Management* 27, 69-85. doi:10.1016/0378-3774(95)91232-V
- Berkal, I., Walter, C., Michot, D., Djili, K., 2012. Seasonal soil salinity monitoring in oasis ecosystems by EM conductivity. 5th Global Workshop on Digital Soil Mapping, Sydney, NSW, pp. 347-351.
- Berkal, I., Walter, C., Michot, D., Djili, K., 2014. Seasonal monitoring of soil salinity by electromagnetic conductivity in irrigated sandy soils from a Saharan oasis. *Soil Research* 52, 769-780. doi:10.1071/sr13305
- Berrabah, F., 2009. Recensement des sels sur les différents horizons, mode de leurs formations : cas d'un sol nu et d'un sol cultivé dans la région de Ouargla. Sciences agronomiques. Université Kasdi Merbah, Ouargla, p. 89.
- Besbes, M., Horriche, J.F., 2007. Définition d'un réseau de surveillance piézométrique du système aquifère du Sahara septentrional. *Sécheresse* 18, 13-22.
- Besson, A., 2007. Analyse de la variabilité spatio-temporelle de la teneur en eau des sols à l'échelle parcellaire par la méthode de résistivité électrique. Science de la terre. Université d'Orléans, Orléans, p. 212.
- Besson, A., Cousin, I., Dorigny, A., Dabas, M., King, D., 2008. The temperature correction for the electrical resistivity measurements in undisturbed soil samples: Analysis of the existing conversion models and proposal of a new model. *Soil Sci.* 173, 707-720. doi:10.1097/SS.0b013e318189397f
- Bishop, T.F.A. et McBratney, A.B., 2001. A comparison of prediction methods for the creation of field-extent soil property maps. *Geoderma* 103, 149-160.
- Boivin, P., Hachicha, M., Job, J.-O., Loyer, J.-Y., 1989. Une méthode de cartographie de la salinité des sols. Conductivité électromagnétique et interpolation par krigeage. *Science du sol* 27, 69-72.

- Bottraud, J.C., Bornand, M., Servat, E., 1985. Mesures de résistivité appliquées à la cartographie en pédologie. Bulletin de l'Association française pour l'étude du sol 4, 279-294. .
- Bouammar, B., 2010. Le développement agricole dans les régions sahariennes. Etudes de cas de la région de Ouargla et de la région de Biskra. Sciences économiques Université Kasdi Merbah, Ouargla, p. 293.
- Brabant, P., 1993. Pédologie et système d'information géographique. Comment introduire les cartes de sols et les autres données sur les sols dans les SIG ? Cah. Orstom, sér. Pédol., vol. XXVIII, 107-135.
- Breiman, L., Friedman, J., Olshen, R., Stone, C., 1984. 'Classification and regression trees, The Wadsworth statistics/probability series.'. (Wadsworth International Group: Belmont, CA, USA).
- Brus, D.J., Kempen, B., Heuvelink, G.B.M., 2011. Sampling for validation of digital soil maps. European Journal of Soil Science 62, 394-407. doi: 10.1111/j.1365-2389.2011.01364.x
- Campbell, R.B., Bower, C.A., Richards, L.A., 1948. Change of electrical conductivity with temperature and the relation of osmotic pressure to electrical conductivity and ion concentration for soil extracts. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 13, 66-69. doi:10.2136/sssaj1949.036159950013000C0010x
- Carre, F. et Girard, M.C., 2002. Quantitative mapping of soil types based on regression kriging of taxonomic distances with landform and land cover attributes. Geoderma 110, 241-263. doi: 10.1016/s0016-7061(02)00233-1
- Carsel, R.F. et Parrish, R.S., 1988. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. Water Resources Research 24, 755-769. doi: 10.1029/WR024i005p00755
- Chaouch, S., 2006. Développement agricole durable au Sahara. Nouvelles technologies et mutations socio économiques : cas de la région de Ouargla. U.F.R de géographie Université Aix-Marseille 1, France, p. 389.
- Chartin, C., 2011. Effet de l'évolution du parcellaire agricole sur la redistribution des sols et la morphologie des versants cultivés. Exemple du Sud-ouest du bassin parisien. Science de la terre / Géologie de la surface Université François - Rabelais, TOURS, p. 322.
- Cheverry, C. et Robert, M., 1998. La dégradation des sols irrigués et de la ressource en eau : une menace pour l'avenir de l'agriculture et pour l'environnement des pays au sud de la Méditerranée Étude et Gestion des Sols 5, 217-226.
- Christiansen, J.S., Thorsen, M., Clausen, T., Hansen, S., Refsgaard, J.C., 2004. Modelling of macropore flow and transport processes at catchment scale. Journal of Hydrology 299, 136-158. doi: 10.1016/j.jhydrol.2004.04.029
- Clément, M., 2009. Les principaux sols du monde.Voyage à travers l'épiderme vivant de la planète Terre. Lavoisier, France.
- Corwin, D.L. et Lesch, S.M., 2003. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: theory, principles, and guidelines Agronomy Journal 95, 455-471.
- Corwin, D.L. et Lesch, S.M., 2005a. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. Computers and Electronics in Agriculture 46, 11-43. doi:10.1016/j.compag.2004.10.005

- Corwin, D.L., Lesch, S.M., 2005b. Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity. *Computers and Electronics in Agriculture* 46, 103-133. doi:10.1016/j.compag.2004.11.002
- Corwin, D.L., Lesch, S.M., Oster, J.D., Kaffka, S.R., 2006. Monitoring management-induced spatio-temporal changes in soil quality through soil sampling directed by apparent electrical conductivity. *Geoderma* 131, 369-387. doi:10.1016/j.geoderma.2005.03.014
- Corwin, D.L. et Rhoades, J.D., 1982. An improved technique for determining soil electrical conductivity-depth from above ground electromagnetic measurement. *Soil Science Society of America Journal* 46, 517-520.
- Côte, M., 1998. Des oasis malades de trop d'eau? *Sécheresse* 9, 123-130.
- Cousin, I., Besson, A., Aboubacar, S., Accart, V.A., Samouëlian, S., Cornu, S., Richard, G., 2005. Influence of soil water content, soil bulk density, soil solution composition on electrical resistivity measurements. EGU, Vienna, Austria.
- Dahlin, T. et Loke, M.H., 1998. Resolution of 2D Wenner resistivity imaging as assessed by numerical modelling. *Journal of Applied Geophysics* 38, 237-249. doi: 10.1016/S0926-9851(97)00030-X
- Dang, Y.P., Dalal, R.C., Pringle, M.J., Biggs, A.J.W., Darr, S., Sauer, B., Moss, J., Payne, J., Orange, D., 2011. Electromagnetic induction sensing of soil identifies constraints to the crop yields of north-eastern Australia. *Soil Research* 49, 559-571. doi:10.1071/SR11199
- Daoud, Y. et Halitim, A., 1994. Irrigation et salinisation au Sahara algérien. *Sécheresse* 3, 151-160.
- Delavan, W., 2004. Economics of water resources: The contributions of Dan Yaron. *American Journal of Agricultural Economics* 86, 855-857. doi: 10.1111/j.0002-9092.2004.637\_2.x
- Diaz, L. et Herrero, J., 1992. Salinity estimates in irrigated soils using electromagnetic induction. *Soil Sci.* 154, 151-157. doi:10.1097/00010694-199208000-00009
- Djili, K., 2000. Contribution à la connaissance des sols du Nord de l'Algérie. Création d'une banque de données informatisées et utilisation d'un système d'information géographique pour la spatialisation et la valorisation des données pédologiques. *Science du sol*. INA, Algérie, p. 243
- 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. *Sécheresse* 14, 241-246.
- Doolittle, J.A. et Brevik, E.C., 2014. The use of electromagnetic induction techniques in soils studies. *Geoderma* 223–225, 33-45. doi:10.1016/j.geoderma.2014.01.027
- Douaoui, A.E.K., Nicolas, H., Walter, C., 2006. Detecting salinity hazards within a semiarid context by means of combining soil and remote-sensing data. *Geoderma* 134, 217-230. doi: 10.1016/j.geoderma.2005.10.009
- DPAT, 2006. Annuaire statistique 2006 de la wilaya de Ouargla. Direction de la planification et de l'aménagement du territoire, Ouargla, p. 38.
- DSA, 2008. Direction des Services Agricoles de la wilaya de Ouargla, service des statistiques agricoles Ouargla.
- Dubost, D., 1992. Aridité, agriculture et développement: le cas des oasis algériennes. *Sécheresse* 3, 85-96.
- Dubost, D. et Rognon, P., 1992. Le projet « Oasis 2000 ». *Sécheresse* 3, 117.

- Durand, J.H., 1983. Les sols irrigables. Etude pédologique. Imbert, Alger.
- El Meddahi, M., Mallants, D., Feyen, J., Vereecken, H., 1993. Modélisation de l'évolution de la salinité dans la zone racinaire Science du sol 31, 59-76.
- ENAGEO, 1990. Etude hydrogéologique de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla. ENAGEO, Ouargla, p. 35.
- ESRI, 2009. ArcGis. Environmental Systems Research Institute Inc, Redlands, California.
- FAO, 1990. Etudes et prospections pédologiques en vue de l'irrigation. FAO, Rome.
- FAO, 1998. News & Highlights International coalition focuses on research and technology to help farmers in developing countries grow "more crop per drop".
- FAO, 2006a. World reference base for soil resources. A framework for international classification, correlation and communication.
- FAO, 2006b. Guidelines for soil description Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Forkutsa, I., Sommer, R., Shirokova, Y., Lamers, J., Kienzler, K., Tischbein, B., Martius, C., Vlek, P., 2009. Modeling irrigated cotton with shallow groundwater in the Aral Sea Basin of Uzbekistan: II. Soil salinity dynamics. Irrigation Science 27, 319-330. doi:10.1007/s00271-009-0149-0
- Friedman, J.H. et Meulman, J.J., 2003. Multiple additive regression trees with application in epidemiology. Statistics in Medicine 22, 1365-1381. doi:10.1002/sim.1501
- Friedman, S.P., 2005. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review. Computers and Electronics in Agriculture 46, 45-70. doi:10.1016/j.compag.2004.11.001
- Ghassemi, F., Close, A., Kellett, J.R., 1997. Numerical models for the management of land and water resources salinisation. Mathematics and Computers in Simulation 43, 323-329. doi: 10.1016/s0378-4754(97)00016-5
- Ghazouani, W., 2009. De l'identification des contraintes environnementales à l'évaluation des performances agronomiques dans un système irrigué collectif. Cas de l'oasis de Fatnassa (Nefzaoua, sud tunisien). Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement AgroParisTech, Paris, p. 181.
- Gibbs, S., 2000. How to texture Soils & test for salinity. NSW Agriculture 8, 4.
- Gonçalvès, J., Petersen, J., Deschamps, P., Hamelin, B., Baba-Sy, O., 2013. Quantifying the modern recharge of the "fossil" Sahara aquifers. Geophys. Res. Lett. 40, 2673-2678. doi: 10.1002/grl.50478
- Gonçalves, M.C., Šimůnek, J., Ramos, T.B., Martins, J.C., Neves, M.J., P., P.F., 2006. Multicomponent solute transport in soil lysimeters irrigated with waters of different quality. Water Resour. Res. 42: W08401, pp17. doi: 10.1029/2006WR004802
- Goodin, J.R., Epstein, E., McKell, C.M., O'Leary, J.W., 1990. Saline Agriculture: Salt-tolerant Plants for Developing Countries. National Academic Press, Washington, DC.
- Hachicha, M., 2007. Les sols salés et leur mise en valeur en Tunisie. Sécheresse 18, 45-50.
- Hachicha, M., Cheverry, C., Mhiri, A., 2000. The impact of long-term irrigation on changes of ground water level and soil salinity in northern Tunisia. Arid Soil Res. Rehabil. 14, 175-182. doi:10.1080/089030600263094
- Halitim, A., 1985. Contribution à l'étude des sols des zones arides (Hautes plaines steppiques de l'Algérie). Morphologie, distribution et rôle des sels dans la genèse et le comportement des sols. U.E.R. des Sciences de la vie et de l'environnement. Rennes, France, p. 384.
- Hamdi-Aïssa, B. et Girard, M., 2000. Utilisation de la télédétection en régions sahariennes, pour l'analyse et l'extrapolation spatiale des pédopaysages. Sécheresse 11, 179-188.



- Hesse, A., 1990. Resistivity prospecting. In: Scollar, I., Tabbagh, A., Hesse, A., Herzog, I. (Eds.), *Topics in Remote Sensing 2. Archeological Prospecting and Remote sensing*. Cambring University press, pp. 307-374.
- Hosseini, E., Gallichand, J., Marcotte, D., 1994. Theoretical and experimental performance of spatial interpolation methods for soil salinity analysis. *Transactions of the Asabe* 37, 1799-1807.
- Idder, M.A., 2006. Mode de fixation et de cristallisation des sels dans un sol nu non irrigué dans la région de Ouargla. *Pédologie*. INA, El harrach Alger, p. 100.
- Idder, T., 1998. La dégradation de l'environnement urbain liée aux excédents hydriques au Sahara algérien. Impact des rejets d'origine agricole et urbaine et techniques de remédiation proposées. L'exemple de Ouargla. *Sciences de la terre et de l'atmosphère*. Université d'Angers, Angers, p. 284.
- Idder, T., 2007. Le problème des excédents hydriques à Ouargla : situation actuelle et perspectives d'amélioration. *Sécheresse* 18, 161-167.
- Idder, T., Idder, A., Mensous, M., 2011. Les conséquences écologiques d'une gestion non raisonnée des eaux agricoles dans les oasis du Sahara algérien (Cas de l'oasis de Ouargla). Colloque international : Usage écologiques, économiques et sociaux de l'eau agricole en méditerranée : quels enjeux pour quels services ?, Université de Provence, centre st-charles, MARSEILLE, p. 12.
- Iddir, M.E.A., 2006. Evaluation de la salinité par induction électromagnétique : exemple d'une parcelle cultivée de la plaine de la Macta (Wilaya de Mascara). *Pédologie*. INA, Alger, p. 102.
- Kang, S., Gu, B., Du, T., Zhang, J., 2003a. Crop coefficient and ratio of transpiration to evapotranspiration of winter wheat and maize in a semi-humid region. *Agricultural Water Management* 59, 239-254. doi:10.1016/S0378-3774(02)00150-6
- Kang, S.Z., Hu, X.T., Du, T.S., Zhang, J.H., Jerie, P., 2003b. Transpiration coefficient and ratio of transpiration to evapotranspiration of pear tree (*Pyrus communis* L.) under alternative partial root-zone drying conditions. *Hydrol. Process.* 17, 1165-1176. doi: 10.1002/hyp.1188
- Keller, G.V. et Frischknecht, F.C., 1966. *Electrical methods in Geophysical Prospecting*. International series in electromagnetic waves Edited by A.L. Cullen et al., Pergamon, New York, p. 523.
- Kouzmine, Y., 2003. L'espace saharien algérien, Dynamiques démographiques et migratoires. U.F.R Sciences du Langage, de l'Homme et de la Société. Institut de Géographie, Laboratoire THEMA. Université de Franche-Comté Bourgogne, p. 202.
- Lacoste, M., 2012. Evolution des sols à l'échelle du paysage sous des conditions de changement climatique et de structure du paysage. *Sciences de l'Environnement*. Agrocampus Ouest sous le label de l'Université Européenne de Bretagne, France, p. 295.
- Lacoste, M., Lemerrier, B., Walter, C., 2011. Regional mapping of soil parent material by machine learning based on point data. *Geomorphology* 133, 90-99. doi:10.1016/j.geomorph.2011.06.026
- Lagacherie, P., Arrouays, D., Walter, C., 2013. Cartographie numérique des sols : principe, mise en oeuvre et potentialités *Étude et Gestion des Sols* 20, 83 à 98.
- Le Houérou, H.N., 1989. Classification éoclimatique des zones arides (s.l.) de l'Afrique du Nord. *Ecologia mediterranea* Tome XV, 95-144.

- Legros, J.P., 1996. Cartographies des sols. De l'analyse spatiale à la gestion des territoires. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR), Lausanne.
- Lemercier, B., Lacoste, M., Loum, M., Walter, C., 2012. Extrapolation at regional scale of local soil knowledge using boosted classification trees: A two-step approach. *Geoderma* 171–172, 75-84. doi:10.1016/j.geoderma.2011.03.010
- Lesch, S.M., Corwin, D.L., Robinson, D.A., 2005. Apparent soil electrical conductivity mapping as an agricultural management tool in arid zone soils. *Computers and Electronics in Agriculture* 46, 351-378. doi: 10.1016/j.compag.2004.11.007
- Lesch, S.M., Herrero, J., Rhoades, J.D., 1998. Monitoring for temporal changes in soil salinity using electromagnetic induction techniques. *Soil Science Society of America Journal* 62, 232-242. doi:10.2136/sssaj1998.03615995006200010030x
- Lesch, S.M., Rhoades, J.D., Corwin, D.L., 2000. ESAP-95 Version 2.01R. User manual and tutorial guide. USDA (George E. Brown, Jr., Salinity Laboratory), Riverside, California, p. 169.
- Lesch, S.M., Strauss, D.J., Rhoades, J.D., 1995a. Spatial prediction of soil salinity using electromagnetic induction techniques.
1. Statistical prediction models: A comparison of multiple linear regression and cokriging. *Water Resources Research* 31, 373-386. doi:10.1029/94WR02179
- Lesch, S.M., Strauss, D.J., Rhoades, J.D., 1995b. Spatial prediction of soil salinity using electromagnetic induction techniques.
2. An efficient spatial sampling algorithm suitable for multiple linear regression model identification and estimation. *Water Resources Research* 31, 387-398. doi:10.1029/94wr02180
- Liu, C., Zhang, X., Zhang, Y., 2002. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter. *Agricultural and Forest Meteorology* 111, 109-120. doi: 10.1016/S0168-1923(02)00015-1
- Loke, M.H., 2001. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. Geotomo Software, Malaysia.
- Mahdi, H., 2008. Cartographie de la salinité d'un sol sableux par conductivité électromagnétique Pédologie. ENSA, Alger, p. 104.
- Martin, M.C., 1975. Un exemple de mise en valeur intégrée d'une zone aride: la plaine d'Abadla dans le sud algérien . In . L'aménagement des zones arides . . CIHEAM Options Méditerranéennes, 99-107.
- McBratney, A.B., Mendonça Santos, M.L., Minasny, B., 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 117, 3-52. doi:10.1016/S0016-7061(03)00223-4
- McNeill, J.D., 1980. Electromagnetic terrain conductivity measurements at low induction numbers. GEONICS.
- McNeill, J.D., 1992. Rapid, accurate mapping of soil salinity by electromagnetic ground conductivity meters. Soil Science of Amercia, Inc., Madison,.
- Michot, D., 2003. Intérêt de la géophysique de subsurface et de la télédétection multispectrale pour la cartographie des sols et le suivi de leur fonctionnement hydrique à l'échelle intraparcellaire. géophysique appliquée. Pierre et Marie CURIE (Paris VI), Paris, p. 393.



- Michot, D., Benderitter, Y., Dorigny, A., Nicoullaud, B., King, D., Tabbagh, A., 2003. Spatial and temporal monitoring of soil water content with an irrigated corn crop cover using surface electrical resistivity tomography. *Water Resources Research* 39. doi:10.1029/2002WR001581
- Miklos, M., Short, M.G., McBratney, A.B., Minasny, B., 2010. Mapping and comparing the distribution of soil carbon under cropping and grazing management practices in Narrabri, north-west New South Wales. *Australian Journal of Soil Research* 48, 248–257. doi: 10.1071/SR09111 0004-9573/10/030248
- Minasny, B. et McBratney, A.B., 2008. Regression rules as a tool for predicting soil properties from infrared reflectance spectroscopy. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 94, 72-79. doi: 10.1016/j.chemolab.2008.06.003
- Minasny, B., Tranter, G., McBratney, A.B., Brough, D.M., Murphy, B.W., 2009. Regional transferability of mid-infrared diffuse reflectance spectroscopic prediction for soil chemical properties. *Geoderma* 153, 155-162.
- Montoroi, J.-P., 1992. Le contrôle de la salinité à l'aide de capteurs électriques : application à un périmètre irrigué en Tunisie. *ORSTOM* 46, 223-231.
- Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 12 513-522.
- Munns, R., 2002. Comparative physiology of salt and water stress. *Plant Cell Environ.* 25, 239-250. doi: 10.1046/j.0016-8025.2001.00808.x
- Nezli, I.E., 2004. Mécanismes d'acquisition de la salinité et de la fluoruration des eaux de la nappe phréatique de la basse vallée de l'oued M'ya (Ouargla). *Hydrogéologie Université Badji Mokhtar Annaba*, p. 152.
- Nezli, I.E., 2009. Approche hydrogéochimique à l'étude des aquifères de la basse vallée de l'Oued M'ya (Ouargla). *Hydraulique. Université Mohamed Kheider – Biskra, Algérie*, p. 117.
- Nezli, I.E., Achour, S., Hamdi-Aissa, B., 2009. Approche hydrogéochimique à l'étude de la fluoruration des eaux de la nappe du complexe terminal de la basse vallée de l'Oued M'ya (Ouargla) *Courrier du Savoir* 9, 57-62.
- Nogues, J., Robinson, D.A., Herrero, J., 2006. Incorporating electromagnetic induction methods into regional soil salinity survey of irrigation districts. *Soil Science Society of America Journal* 70, 2075-2085. doi: 10.2136/sssaj2005.0405
- O.N.A., 2004. Etude d'assainissement des eaux résiduaires, pluviales et d'irrigation. Mesures complémentaires de lutte contre la remontée de la nappe phréatique. *ONA, Ouargla*, p. 110.
- O.S.S., 2008. Système aquifère du Sahara septentrional (Algérie, Tunisie, Libye) : gestion commune d'un bassin transfrontalier. In: *Synthèse (Ed.)*. OSS, Tunis, p. 48.
- O.S.S., 2010. Amélioration de la connaissance et de la gestion concertée du système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS) par l'utilisation des images satellitaires. In: *GEOAQUIFER (Ed.)*. Facilité africaine de l'eau et Banque africaine de développement Tunisie, p. 23.
- Odeh, I.O.A., Todd, A.J., Triantafilis, J., McBratney, A.B., 1998. Status and trends of soil salinity at different scales: the case for the irrigated cotton growing region of eastern Australia. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 50, 99-107. doi: 10.1023/a:1009763522702
- Omonode, R.A. et Vyn, T.J., 2006. Spatial dependence and relationships of electrical conductivity to soil organic matter, phosphorus, and potassium. *Soil Sci.* 171, 223-238. doi:10.1097/01.ss.0000199698.94203.a4

- ONM, 2010. Données climatiques de la région de Ouargla. Ouargla (Algérie).
- Oster, J.D. et Willardson, L.S., 1971. Reliability of Salinity Sensors for the Management of Soil Salinity. *Agronomy Journal* 63 695-698.
- Ould Babassy, L. et Besbes, M., 2006. Recharge des aquifères sahariens durant l'Holocène et recharge actuelle. Etude sur modèle numérique. *Aquifers Systems Management*, Dijon, France, p. 16.
- Pan, X.L. et Chao, J.P., 2003. Theory of stability, and regulation and control of ecological system in oasis. *Global and Planetary Change* 37, 287-295. doi:10.1016/S0921-8181(02)00201-1
- Pereira, A.R. et Pruitt, W.O., 2004. Adaptation of the Thornthwaite scheme for estimating daily reference evapotranspiration. *Agricultural Water Management* 66, 251-257. doi: 10.1016/j.agwat.2003.11.003
- Peyron, G., 2000. Cultiver le palmier-dattier. La librairie du Cirad, Montpellier.
- Pitman, M.G., Läuchli, A., 2002. Global impact of salinity and agricultural ecosystems Salinity: Environment - Plants - Molecules. A. Läuchli and U. Lüttge, Netherlands, pp. 3–20.
- Pouget, M., 1980. Les relations sol-végétation dans les steppes sud-algéroises. ORSTOM, Paris.
- Quinlan, J.R., 1993. Combining instance-based and mode-based learning. 10th International conference on machine learning. , Amherst MD, pp. 236-243.
- Radcliffe, D.E. et Simunek, J., 2010. Soil Physics with HYDRUS. Modeling and Applications. Taylor & Francis group.
- Ragab, R., 2002. A holistic generic integrated approach for irrigation, crop and field management: the SALTMED model. *Environmental Modelling and Software* 17, 345-361.
- RGPH, 1998. SIG du recensement générale de la population et de l'habitat. 1987-1998. Office national des statistiques, Algérie.
- Rhoades, J.D., 1992. Instrumental field methods of salinity appraisal *Soil Science Society of America Journal* 30, 231-248.
- Rhoades, J.D., Chanduvi, F., Lesch, S.M., 1999. Soil salinity assessment: Methods and interpretation of electrical conductivity measurements. FAO.
- Rhoades, J.D. et Corwin, D.L., 1984. Monitoring soil salinity. *Soil and Water Conservation* 39 172-171 175.
- Rhoades, J.D. et Ingvalson, R.D., 1971. Determining Salinity in Field Soils with Soil Resistance Measurements. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc* 35, 54-60.
- Rhoades, J.D., Manteghi, N.A., Shouse, P.J., Alves, W.J., 1989. Soil electrical conductivity and soil salinity. New formulations and calibrations *Soil Science Society of America Journal* 53, 433-439.
- Robinson, D.A., Lebron, I., Lesch, S.M., Shouse, P., 2004. Minimizing drift in electrical conductivity measurements in high temperature environments using the EM-38. *Soil Science Society of America Journal* 68, 339-345.
- Rouvillois-Brigol, M., 1975. Le pays de Ouargla (Sahara Algérien). Variation et organisation d'un espace rural en milieu désertique. Département de géographie Université de Paris-Sorbonne, Paris, p. 389.
- Roy, A. et Apparao, A., 1971. Depth of investigation in direct current methods *Geophysics* 36, 943-959.

- Rubio, C.M. et Poyatos, R., 2012. Applicability of Hydrus-1D in a mediterranean mountain area submitted to land use changes. International Scholarly Research Network Soil Science 2012, 7. doi: 10.5402/2012/375842
- Rulequest Research, 2007. Cubist version 2.04. Rulequest Research Pty Ltd, St. Ives, New South Wales, Australia.
- Samouelian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A., Richard, G., 2005. Electrical resistivity survey in soil science: a review. Soil & Tillage Research 83, 173-193. doi:10.1016/j.still.2004.10.004
- Sauer, D., Popp, S., Dittfurth, A., Altdorff, D., Dietrich, P., Paasche, H., 2013. Soil Moisture Assessment over an Alpine Hillslope with Significant Soil Heterogeneity. Vadose Zone Journal 12. doi: 10.2136/vzj2013.01.0009
- Schaap, M.G., Leij, F.J., van Genuchten, M.T., 2001. rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. Journal of Hydrology 251, 163-176. doi: 10.1016/S0022-1694(01)00466-8
- Schleiff, U., 2008. Analysis of water supply of plants under saline soil conditions and conclusions for research on crop salt tolerance. Journal of Agronomy and Crop Science 194, 1-8. doi: 10.1111/j.1439-037X.2007.00290.x
- Schneider, S., 2008. Estimation des paramètres hydrodynamiques des sols à partir d'une inversion jointe de données d'infiltration et de résistivité électrique Sciences de la Terre et de l'univers. Université Paris-Sud 11, Paris, p. 144.
- Seguin, J.J., 2005. Carte hydrogéologique de l'Afrique à l'échelle du 1/10 Million. In: SIG-Afrique, P.r. (Ed.). BRGM, France.
- Servant, J., 1975. Contribution à l'étude pédologique des terrains halomorphes. L'exemple des sols salés du sud et du sud-ouest de la France. Sciences naturelles. Université des sciences et techniques du Languedoc, Montpellier, p. 190.
- Sheriff, R.E., 2002. Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics. In: Scherrer, E.F. (Ed.). Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, U.S.A., p. 12.
- Shirokova, Y. et Forkutsa, I., Sharafutdinova, N., 2000. Use of electrical conductivity instead of soluble salts for soil salinity monitoring in Central Asia. Irrigation and Drainage Systems 14, 199-205.
- Si Bennisseur, A., 2005. Référentiel pour la Conduite Technique du palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*). Centre de Documentation pour le Développement Rural- SAILD/ Center of Documentation for Rural Development (CDDR) / Support Services to Grassroot Initiative of Development (SAILD), Yaoundé (Cameroun)
- Simonneau, P. et Aubert, G., 1963. L'utilisation des eaux salées au Sahara Annales agronomiques 14, 859-872.
- Šimůnek, J., Šejna, M., Saito, H., Sakai, M., van Genuchten, M.T., 2009. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. Department of environmental sciences university of California Riverside, California.
- Šimůnek, J. et Suarez, D.L., 1993. Modeling of carbon dioxide transport and production in soil : 1. Model development. Water Resour. Res. 29 (2), 487-497.
- Šimůnek, J. et Van Genuchten, M.T., 1999. Using the HYDRUS 1D and HYDRUS 2D codes for estimating unsaturated soil hydraulic and solute transport parameters. Characterization and Measurement of the hydraulic properties of unsaturated porous media. University of California, Riverside, CA, pp. 1523-1536.

- Slavich, P.G., 1990. Determining ECa-depth profiles from electromagnetic induction measurements. *Australian Journal of Soil Research* 28, 443-452. doi:10.1071/SR9900443
- Slavich, P.G. et Petterson, G.H., 1993. Estimating the Electrical Conductivity of Saturated Paste Extracts from 1 : 5 Soil: Water Suspensions and Texture. *Australian Journal of Soil Research* 31, 73-81. doi: 10.1071/sr9900453
- Smedema, L.K. et Shiati, K., 2002. Irrigation and salinity: a perspective review of the salinity hazards of irrigation development in the arid zone. *Irrigation and Drainage Systems* 16, 161-174. doi: 10.1023/a:1016008417327
- Snoussi, S.A. et Halitim, A., 1998. Valorisation des eaux salines pour la nutrition minérale des plantes cultivées *Étude et Gestion des Sols* 5, 289-298.
- Steppuhn, H., Van Genuchten, M.T., Grieve, C.M., 2005. Root-zone salinity: I. Selecting a product-yield index and response function for crop tolerance. *Crop Science* 45, 209-220.
- Stewart, P., 1969. Quotient pluviométrique et dégradation biosphérique. *Bulletin de la société d'histoire naturelle de l'Afrique du Nord* 59, 23-36.
- Sudduth, K.A., Drummond, S.T., Kitchen, N.R., 2001. Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* 31, 239-264. doi: 10.1016/s0168-1699(00)00185-x
- Sudduth, K.A., Kitchen, N.R., Bollero, G.A., Bullock, D.G., Wiebold, W.J., 2003. Comparison of Electromagnetic Induction and Direct Sensing of Soil Electrical Conductivity. *Agron. J.* 95, 472-482. doi: 10.2134/agronj2003.4720
- Sudduth, K.A., Kitchen, N.R., Wiebold, W.J., Batchelor, W.D., Bollero, G.A., Bullock, D.G., Clay, D.E., Palm, H.L., Pierce, F.J., Schuler, R.T., Thelen, K.D., 2005. Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. *Computers and Electronics in Agriculture* 46, 263-283. doi: 10.1016/j.compag.2004.11.010
- Tabouche, N. et Achour, S., 2004. Etude de la qualité des eaux souterraines de la région orientale du Sahara septentrional algérien. *Larhyss (Université de Biskra)* 3, 99-113.
- Toumi, A., 1995. Analyse et diagnostique de l'irrigation dans l'oasis moderne de Draa Sud (Tozer) In: *Tunisie, S.d. (Ed.). Buletin de la direction des sols* pp. 59-71.
- Toushmalani, R., 2010. Application of geophysical methods in agriculture *Australian journal of basic and applied sciences* 4, 6433-6439.
- Toutain, G., 1979. *Eléments d'agronomie saharienne. De la recherche au développement.* INRNGRET, Paris.
- Toutain, G., Dollé, V., Ferry, M., 1990. Situation des systèmes oasiens en région chaudes. In: *CIHEAM-IAMM (Ed.), Les systèmes agricoles oasiens.* Montpellier. (Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens ; n. 11). Tozeur, (Tunisie) 1988, pp. 7-18.
- Triantafyllis, J., Laslett, G.M., McBratney, A.B., 2000. Calibrating an electromagnetic induction instrument to measure salinity in soil under irrigated cotton. *Soil Science Society of America Journal* 64, 1009-1017. doi:10.2136/sssaj2000.6431009x
- UNESCO, 1972. *Etude des ressources en eau du Sahara Septentrional.* In: UNESCO (Ed.), *Conclusion et recommandation UNESCO, Algérie, Tunisie*, p. 116.
- UNESCO, 2002. *La lutte contre la désertification . Ressources en eau douce et réhabilitation des terres dégradées dans les zones arides.* In: MAB-UNESCO (Ed.), *Séminaire international sur la lutte contre la désertification.* MAB-UNESCO N'djamena (Tchad), p. 135.

- US. Salinity Laboratory Staff, 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils U.S. Dept. of Agriculture, Washington, D.C.
- Valles, V., Bourgeat, F., Guiresse, M., 1988. Calcul des doses d'irrigation pour les sols salés. Application d'une méthode géochimique de calcul à un sol tunisien. Cah. ORSTOM, ser. Pédol. XXIV, 119-127.
- Van Genuchten, M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal 44, 892-898.
- Van Genuchten, M.T. et Gupta, S.K., 1993. A reassessment of the crop tolerance response function. Journal of the Indian Society of Soil Science 41, 730-737.
- Walter, C., 2002. Analyse spatiale des sols en vue de leur gestion précise et de leur surveillance. Université Henri Poincaré Nancy, p. 96.
- Walter, C., Lagacherie, P., Follain, S., 2006. Chapter 22 Integrating Pedological Knowledge into Digital Soil Mapping. In: P. Lagacherie, A.B.M., Voltz, M. (Eds.), Developments in Soil Science. Elsevier, pp. 281-615. doi: [10.1016/S0166-2481\(06\)31022-7](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(06)31022-7)
- Walter, C., McBratney, A.B., Douaoui, A., Minasny, B., 2001. Spatial prediction of topsoil salinity in the Chelif Valley, Algeria, using local ordinary kriging with local variograms versus whole-area variogram. Australian Journal of Soil Research 39, 259-272.
- Walton, J.T., 2008. Subpixel urban land cover estimation: Comparing Cubist, Random Forests, and support vector regression. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 74, 1213-1222.
- Wollenhaupt, N.C., Richardson, J.L., Foss, J.E., Doll, E.C., 1986. A rapid method for estimating weighted soil salinity from apparent soil electrical conductivity measured with an aboveground electromagnetic induction meter Can. J. Soil Sci. 66, 315-321. doi:[10.4141/cjss86-032](https://doi.org/10.4141/cjss86-032)
- Wraith, J.M., Comfort, S.D., Woodbury, B.L., Inskeep, W.P., 1993. A simplified waveform analysis approach for monitoring solute transport using time-domain reflectometry. Soil Science Society of America Journal 57, 637-642.
- Yaron, D., Bresler, E., Bielorai, H., Harpinist, B., 1980. A model for optimal irrigation scheduling with saline water. Water Resources Research 16, 257-262. doi: [10.1029/WR016i002p00257](https://doi.org/10.1029/WR016i002p00257)
- Zaid, A. et Arias-Jiménez, E.J., 2002. Date palm cultivation. FAO, Rome (Italy).
- Zohdy, A.A.R., 1989. A new methods for the automatic interaction of Schlumberger and Wenner sounding curves. Geophysics 54, 245-253. doi: [10.1190/1.1442648](https://doi.org/10.1190/1.1442648)

## **LISTES**



## LISTE DES TABLES

### Chapitre 1 - Etat de l'art - application des méthodes géophysiques à l'étude des sols

Tableau 1-1. Gammes de résistivité électriques des matériaux de la terre (d'après Palacky, 1987) .....8

Tableau 1-2. Principales configurations des électrodes .....12

### Chapitre 2 - Présentation de la zone d'étude

Tableau 2-1. Données climatiques de la station de Ouargla, données mensuelles sur la période 1997- 2009 .....26

Tableau 2-2. Chronolithostratigraphie de la zone d'étude (ANRH, 2004).....29

Tableau 2-3. Bilan d'eau de la zone de Ouargla .....40

### Chapitre 3 - Protocole expérimental et méthodes d'étude des sols

Tableau 3-1. Quantités d'eau apportées aux parcelles.....44

Tableau 3-2. Chronogramme des étapes d'investigations de terrain .....54

### Chapitre 4 - Caractérisation des eaux et des sols de la zone d'étude

Tableau 4-1 - Résultats des analyses du profil E2 .....61

Tableau 4-2. Résultats des analyses du profil F.....64

Tableau 4-3. Résultats des analyses du profil A2 .....67

Tableau 4-4. Résultats des analyses du profil C2 .....70

Tableau 4-5. Résultats des analyses du profil B1 .....73

Tableau 4-6. Résultats des analyses du profil D1 .....76

Tableau 4-7. Résultats des analyses du profil D2-1 .....79

Tableau 4-8. Résultats des analyses du profil B2-1 .....82

Tableau 4-9. Résultats des analyses du profil B2-2 .....85

Tableau 4-10. Résultats de l'analyse des eaux des forages .....87

Tableau 4-11. Résultats d'analyses de l'eau de la nappe phréatique .....88



## **Chapitre 5 - Quantification des variations spatiales et temporelles de la salinité des sols par suivi électromagnétique**

Table 5-1. Mean values $\pm$ standard deviation of soil properties at four depths measured in nine profiles within the study area.....	95
Table 5-2. Descriptive statistics at four dates of raw apparent conductivity (ECa) (mS/m) measured with an EM38 in vertical (ECaV) and horizontal (ECaH) modes and standardized to 25 °C. ....	99
Table 5-3. Goodness-of-fit $R^2$ indicator and RMSE (in dS/m) of cross-validation tests for the multiple linear regression models derived from ESAP software.....	102
Table 5-4. Cubist regression trees of the specific and general models to predict $EC_{1.5}$ in three soil layers. ....	103

## **Chapitre 6 - Utilisation de la modélisation hydrologique pour définir des scénarios de remédiation de la salinité des sols**

Tableau 6-1. Caractéristiques moyennes du sol de la zone d'étude issues des analyses de neuf profils .....	116
Tableau 6-2. Les simulations testées croisant les scénarios d'irrigation, les niveaux de nappe et la qualité des eaux [a: eau du Mio-Pliocène ( $5,3 \text{ mS.cm}^{-1}$ , SAR=6,9) ; b : eau du Sénonien ( $3,7 \text{ mS.cm}^{-1}$ , SAR=12,4)] dans deux parcelles A2 et B2-1 .....	118
Tableau 6-3. Tableau synthétique croisant les scénarios d'irrigation, la position de la nappe et la salinité de la zone racinaire dans la parcelle A2 .....	128
Tableau 6-4. Tableau synthétique croisant les scénarios d'irrigation, la position de la nappe et la salinité de la zone racinaire dans la parcelle B2-1 .....	129

## LISTE DES FIGURES

### Chapitre 1 - Etat de l'art - application des méthodes géophysiques à l'étude des sols

Figure 1-1. Schéma classique d'une résistance.....	9
Figure 1-2. Schéma d'un dispositif électrique en mode Wenner.....	10
Figure 1-3. Mesure de la résistivité en mode Wenner .....	10
Figure 1-4. Le Geonics EM38 MK2 : (a) mode vertical, (b) mode horizontal.....	13
Figure 1-5. Réponse relative de l' EM38 en fonction de la profondeur (adapté de McNeill, 1992) .....	14
Figure 1-6. Quatre capteurs à induction électromagnétique utilisés pour les investigations des sols .....	15

### Chapitre 2 - Présentation de la zone d'étude

Figure 2-1. Situation géographique de la wilaya de Ouargla.....	20
Figure 2-2. Carte des formations superficielles dans la vallée de Ouargla.....	21
Figure 2-3. Extrait de la carte géologique du Sahara (Nezli, 2009) .....	22
Figure 2-4. Esquisse géomorphologique de la région de Ouargla (ONA, 2004).....	24
Figure 2-5. Diagramme ombrothermique de la station de Ouargla (1997-2009) .....	27
Figure 2-6. Climagramme d'Emberger pour la région de Ouargla .....	28
Figure 2-7. Coupe hydrogéologique à travers le Sahara (UNESCO, 1972) .....	30
Figure 2-8. Extension des formations du Système Aquifère du Sahara Septentrional .....	31
Figure 2-9. Exemples illustrant les différents types de palmeraies (I) anciennes : (a) Sidi Khouiled, (b) Bouameur, (C) Bamendil ; (II) modernes : (d) et (e) avec culture intercalaire (orge), (f) avec amendement sableux.....	35
Figure 2-10. Evolution des débits exploités à partir des nappes du Complexe Terminal et du Continental Intercalaire.....	38



### **Chapitre 3 - Protocole expérimental et méthodes d'étude des sols**

Figure 3-1. Situation géographique de l'exploitation de l'université .....	41
Figure 3-2. Délimitation du site expérimental (image Google Earth, 2001) .....	46
Figure 3-3. Agencement des palmiers .....	46
Figure 3-4. Stratégie de mesures électromagnétiques.....	48
Figure 3-5. Organigramme de la méthodologie adoptée pour l'investigation .....	53
Figure 3-6. Plan d'échantillonnage des sols et des eaux de la palmeraie de l'université de Ouargla.....	55

### **Chapitre 4 - Caractérisation des eaux et des sols de la zone d'étude**

Figure 4-1. Profils (a) salin, (b) ionique de la parcelle E2.....	62
Figure 4-2. Pourcentages des sels dans le profil E2.....	63
Figure 4-3. Profils (a) salin, (b) ionique de la parcelle F .....	65
Figure 4-4. Répartition des sels dans le profil F .....	65
Figure 4-5. Profils (a) salin, (b) ionique de la parcelle A2 .....	68
Figure 4-6. Répartition des sels dans le profil A2 .....	68
Figure 4-7. Profils (a) salin, (b) ionique de la parcelle C2 .....	71
Figure 4-8. Pourcentages des sels dans le profil C2 .....	71
Figure 4-9. Profils (a) salin, (b) ionique de la parcelle B1 .....	74
Figure 4-10. Répartition des sels dans le profil B1.....	74
Figure 4-11. Profils (a) salin, (b) ionique de la parcelle D1 .....	77
Figure 4-12. Répartition des sels dans le profil D1 .....	77
Figure 4-13. Profils (a) salin, (b) ionique de la parcelle D2-1 .....	80
Figure 4-14. Répartition des sels dans le profil D2-1 .....	80
Figure 4-15. Profils (a) salin, (b) ionique de la parcelle B2-1 .....	83
Figure 4-16. Répartition des sels dans le profil B2-1 .....	83



Figure 17. Profils (a) salin, (b) ionique de la parcelle B2-2 .....	86
Figure 4-18. Répartition des sels dans le profil B2-2 .....	86

**Chapitre 5 - Quantification des variations spatiales et temporelles de la salinité des sols par suivi électromagnétique**

Fig. 5-1. Map of the study site with locations of the geophysical survey and soil sampling points for the second monitoring date (October 2009). .....	94
Fig. 5-2. Weekly mean and range of groundwater level measured in 8 piezometers between October 2009 and December 2010. ....	98
Fig. 5-3. Apparent electrical conductivity maps by lognormal kriging of (a) ECaH and (b) ECaV at the first date (March 2009). The legend indicates back-transformed estimates of ECa.....	100
Fig. 5-4. Mean and standard deviation of (a) electrical conductivity measured from 1:5 diluted extract ( $EC_{1:5}$ ) and (b) the natural logarithm ( $\ln$ ) of ECa measured in horizontal (ECaH) and vertical (ECaV) modes at sampling points of each date. Different letters indicate significant ( $\alpha = 0.05$ ) mean differences in time. ....	101
Fig. 5-5. $EC_{1:5}$ predictions of the Cubist specific model at three depths and four dates at EM 38 measurement sites. ....	105
Fig. 5- 6. Mean and standard error of predicted salinity by the Cubist specific model in each plot at each date. ....	106

**Chapitre 6 - Utilisation de la modélisation hydrologique pour définir des scénarios de remédiation de la salinité des sols**

Figure 6-1. Localisation de la région et du site d'étude.....	114
Figure 6-2. Localisation des palmiers, des arbres, des piézomètres et du réseau de drainage .....	115
Figure 6-3. Diagramme ombrothermique de la station de Ouargla (2009-2010) .....	115
Figure 6-4. Fluctuation de la nappe phréatique entre octobre 2009 et octobre 2010 dans les deux piézomètres implantés dans les parcelles A2 et B2-1 .....	120

Figure 6-5. Simulations par HYDRUS 1-D des variations verticales de la salinité de la parcelle A2 selon deux hypothèses de niveaux de nappe : (I) une nappe fixe à 2 m et (II) une nappe fluctuante haute et selon trois doses d'irrigation avec les eaux du Mio-pliocène (5,3 mS.cm <sup>-1</sup> ): (i) dose actuelle, (ii) 1 cm et (iii) 5 cm. Les valeurs mesurées de $EC_{1:5}$ sont indiquées pour les jours 384 et 601 aux trois niveaux de profondeur mesurés : 0-10 cm, 10-25 cm et 25-50 cm. Les nœuds (Nn) correspondent à des profondeurs 6, 18, 38, 50, 60 et 100 cm dans le profil théorique .....	123
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

Figure 6-6. Simulations par HYDRUS 1-D des variations verticales de la salinité de la parcelle B2-1 selon deux hypothèses de niveaux de nappe : (I) une nappe fixe à 2 m et (II) une nappe fluctuante et basse, selon trois doses d'irrigation avec les eaux du Sénonien (3,7 mS.cm<sup>-1</sup>) : (i) dose actuelle, (ii) une dose réduite de 1 cm et (iii) une dose accrue de 5 cm. Les valeurs mesurées de EC<sub>1:5</sub> sont indiquées pour les jours 219 et 601 aux trois niveaux de profondeur mesurés : 0-10 cm, 10-25 cm et 25-50 cm. Les nœuds (Nn) correspondent à des profondeurs 6, 18, 38, 50, 60 et 100 cm dans le profil théorique .....126

### Conclusion générale

Figure 6-7. Arbre décisionnel de la stratégie d'irrigation selon les différents scénarios de la modélisation hydrologique HYDRUS 1-D.....137

## LISTE DES PHOTOS

### Chapitre 3 - Protocole expérimental et méthodes d'étude des sols

Photo 3-1. Parcelle réservée à la plasticulture et l'aquaculture .....42

Photo 3-2. Planches d'irrigations : (a), (b), (c) sans aucune culture ; (d) avec culture intercalaire.....43

Photo 3-3. Exemples illustrant l'état du réseau de drainage.....45

Photo 3-4. Le Geonics EM-38 MK2 : (a) mode vertical, (b) mode horizontal.....49

### Chapitre 4 - Caractérisation des eaux et des sols de la zone d'étude

Photo 4-1. Profil E2 .....60

Photo 4-2. Profil F .....63

Photo 4-3. Profil A2.....66

Photo 4-4. Profil C2 .....69

Photo 4-5. Profil B1 .....72

Photo 4-6. Profil D1 .....75

Photo 4-7. Profil D2-1 .....78

Photo 4-8. Profil B2-1.....81

Photo 4-9. Profil B2-2.....84



**Dynamique spatio-temporelle de la salinité de sols sableux irrigués en milieu aride**

**Application à une palmeraie de la cuvette de Ouargla en Algérie**

## **ANNEXES**

*"Je suis toujours prêt à apprendre, bien que je n'aime pas toujours qu'on me donne des leçons"*

Winston Churchill



# Annexe I — ZONE D'ETUDE

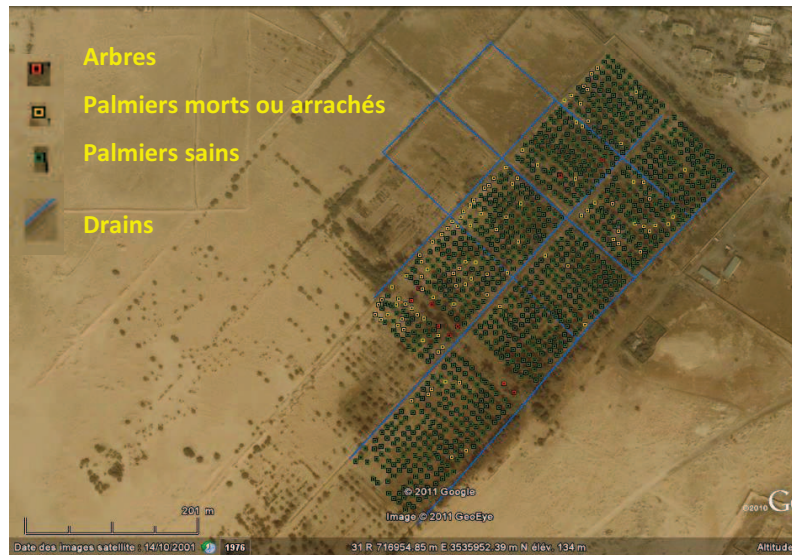


Figure 1. Localisation des palmiers

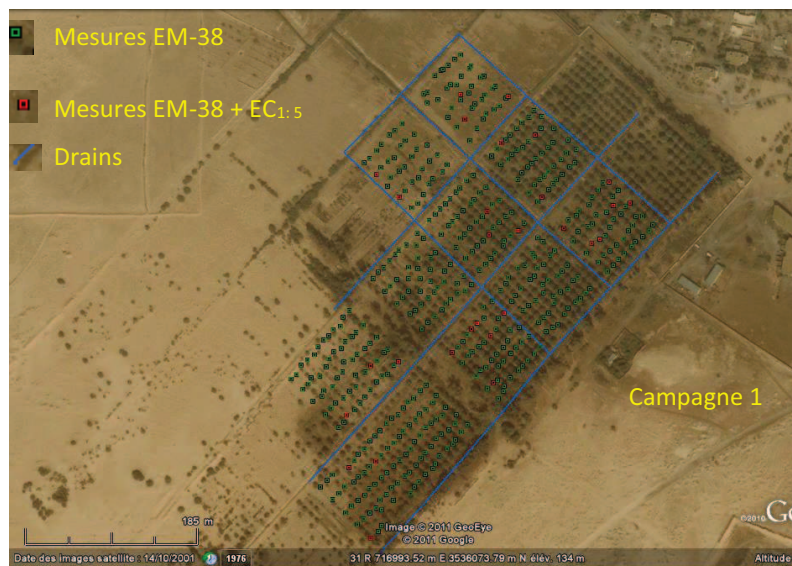
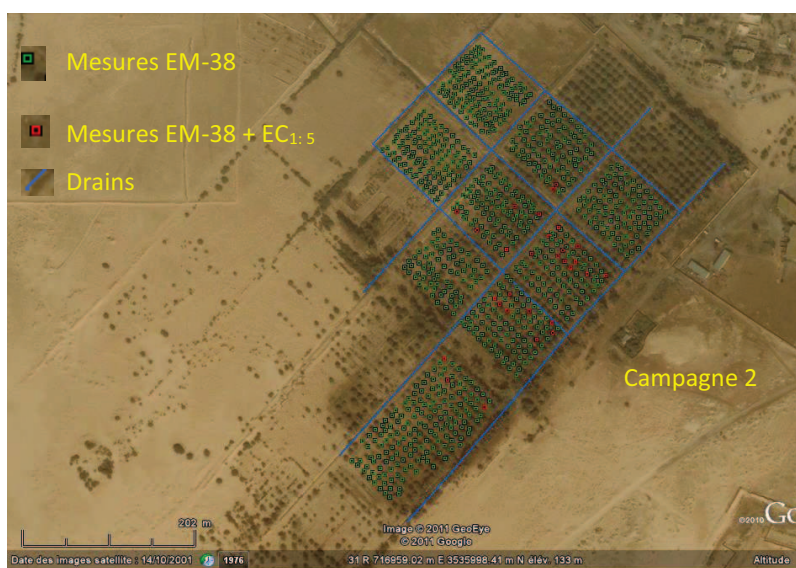
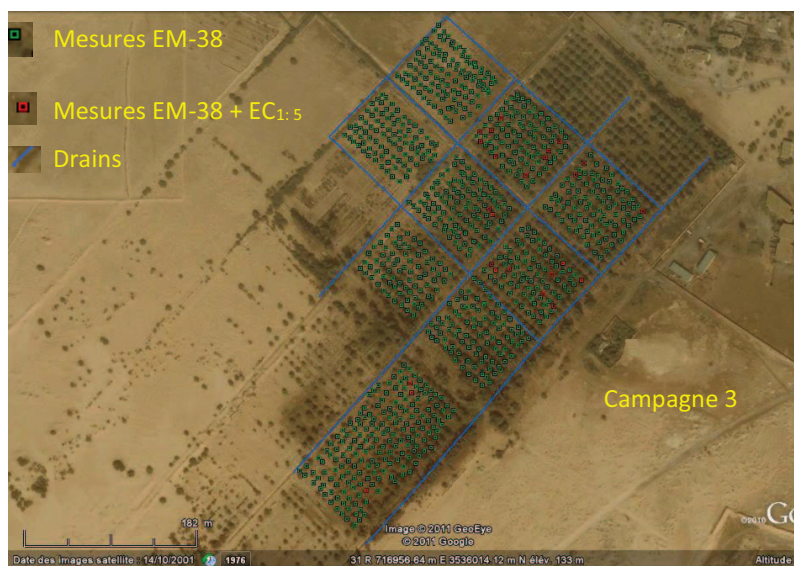


Figure 2. Plan d'échantillonnage de la campagne 1 (mars 2009)



**Figure 3. Plan d'échantillonnage de la campagne 2 (octobre 2009)**



**Figure 4. Plan d'échantillonnage de la campagne 3 (mars 2010)**

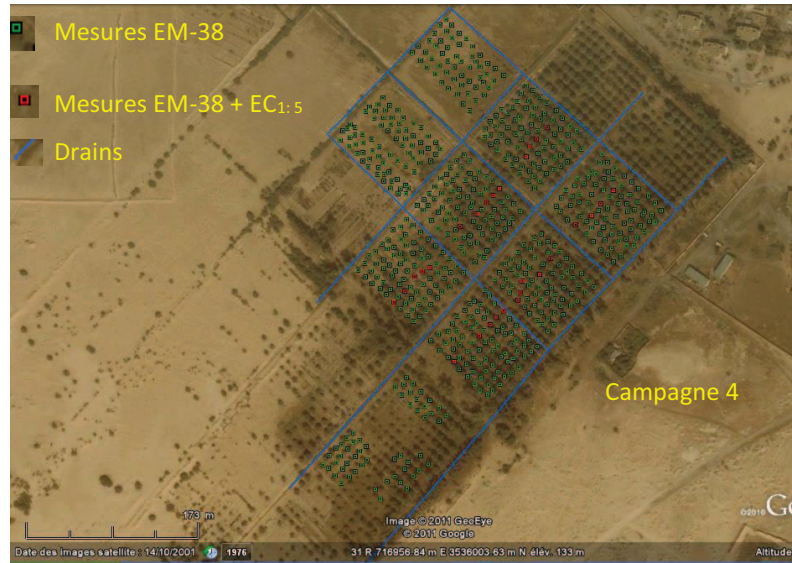


Figure 5. Plan d'échantillonnage de la campagne 4 (novembre 2010)

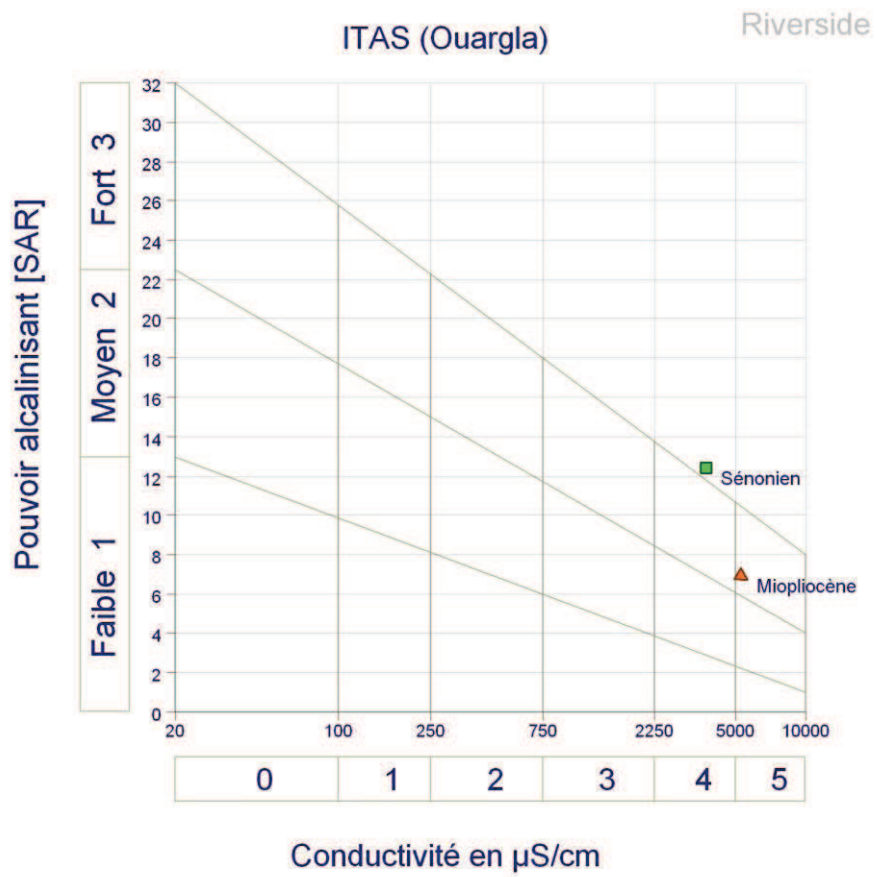


Figure 6. Classification des eaux d'irrigation



## Annexe II — Normes d'interprétation

### Classification de la teneur en gypse (FAOb, 2006)

%	Classes
0	Non gypseux
0-5	Légèrement gypseux
5-15	Modérément gypseux
15-60	Fortement gypseux
> 60	Extrêmement gypseux

### Classification des carbonates (Baize, 1988)

%	Classes
< 1	Non calcaire
1-5	Peu calcaire
5-25	Modérément calcaire
25-50	Fortement calcaire
50-80	Très fortement calcaire
> 80	Extrêmement calcaire

### Classification de la teneur en matière organique Djili (2000)

%	Classes
$\leq 1$	Très faibles
$1 \% < MO \leq 2 \%$	Faibles
$2 \% < MO \leq 3 \%$	Moyennes
$3 \% < MO \leq 4 \%$	Forte
> 4	Très fortes

### Classification de la conductivité électrique (EC<sub>1:5</sub>) (U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954 in Durand 1983)

%	Classes
0 - 0,5	Non salin
0,5 – 1	Légèrement salin
1 – 2	Salin
2 - 4	Très salin
> 4	Extrêmement salin

### Classification du pH<sub>eau</sub> (Baize, 1988)

pH	Classes ou domaines
< 3,5	Hyper acide
3,5 – 4,2	Très acide
4,2-5	Acide
5-6,5	Peu acide
6,5-7,5	Neutre
7,5-8,7	Basique
> 8	Très basique

## Annexe III — FORMATION DES SELS

### Principe de la méthode

#### Formation de bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ )

Les ions  $\text{HCO}_3^-$  peuvent provenir de  $\text{NaHCO}_3$ , de  $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ , et de  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  dans la solution du sol. Au départ, en combinant les ions  $\text{HCO}_3^-$  avec les ions  $\text{Ca}^{2+}$ , ensuite les ions  $\text{HCO}_3^-$  avec les ions  $\text{Mg}^{2+}$ , puis avec les ions  $\text{Na}^+$  s'il reste des ions  $\text{HCO}_3^-$  en excès.

#### Formation des sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ )

Comme les ions  $\text{HCO}_3^-$ , les sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) peuvent être reliés avec les sels  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4$ , et  $\text{CaSO}_4$ . On commence à former le sel de sulfate de calcium ( $\text{CaSO}_4$ ) en premier lieu en combinant les ions  $\text{SO}_4^{2-}$  avec les ions  $\text{Ca}^{2+}$  (l'excès de  $\text{Ca}^{2+}$  restant de la combinaison  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ , ensuite on passe à la constitution de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  et de  $\text{MgSO}_4$  si des ions  $\text{SO}_4^{2-}$  restent en excès.

#### Formation des chlorures ( $\text{Cl}^-$ )

Pour reconstituer les sels de chlorures, on commence par la formation de  $\text{NaCl}$  en combinant les ions  $\text{Cl}^-$  et  $\text{Na}^+$  (éventuellement ceux qui sont en excès par rapport à  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). Ensuite on procède à la formation de  $\text{MgCl}_2$ , puis de  $\text{CaCl}_2$  s'il reste des ions de chlorures en excès et surtout des  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{Ca}^{2+}$  non combinés aux carbonates et aux sulfates.

## Annexe IV — FICHER CUBIST

Cette approche statistique de prédiction de la conductivité électrique, est fondée sur la construction d'arbres de décision. Elle est connue pour être efficace dans le traitement de données manquantes, capable de tenir compte des relations non linéaires entre les variables et enfin pouvant intégrer d'autres variables susceptibles d'avoir un effet dans les prédictions (Rulequest Research, 2007).

Cubist est un outil pour générer à base de règles des modèles prédictifs à partir de données. Deux fichiers sont indispensables pour le fonctionnement de Cubist.

Le premier fichier essentiel est le fichier des noms (**\*.names**) qui définit les attributs utilisés pour décrire chaque cas. La construction de ce fichier est primordiale au fonctionnement de Cubist. Il est impérativement nécessaire de suivre l'architecture du fichier. Si on souhaite prendre en compte un attribut dans le modèle, on le renseigne « continuous », mais quant on veut l'ignorer on le renseigne « ignore » (Figure 1).

Le second fichier essentiel est le fichier de données de l'application (**\*.data**). Il consiste en une ou plusieurs lignes qui donnent les valeurs pour tous les attributs explicitement défini. Les valeurs sont séparées par des virgules et l'entrée pour chaque cas est éventuellement terminée par un point (Figure 2).

La première étape est la construction d'arbres de décisions Cubist à partir des données des 30 échantillons de sol collectés pour la calibration des mesures de conductivité apparente (ECa) pendant les quatre campagnes ( $30 \times 4 = 120$  échantillons) et ceux pour chaque profondeur considérée. Il y aura génération de fichiers (**\*.out**, **\*.model** et **\*.set**). C'est ces derniers qui seront utilisés pour prédire la  $EC_{1.5}$  à partir des mesures géophysiques en deux modes (verticale et horizontale). Les modèles seront construits avec les 2889 points des mesures EM 38 des quatre campagnes.



## EC234.names - Bloc-notes

Fichier Edition Format Affichage ?

```
| Données de Ouargla - Prédiction de EC1/5 en utilisant Cubist|
ECH1: | a expliquer
Numpoint: label. | numero de point, 119points
LNECaV:continuous. |Logarithme népérien de la ECapparente verticale
LNECaH:continuous. |Logarithme népérien de la ECapparente horizontale
LNECaV/LNECaH:ignore. | ratio de V sur H
ECH1:continuous. |conductivite electrique de l'extrait 1/5 en ds/m entre 0-10 cm
ECH2:ignore. |conductivite electrique de l'extrait 1/5 en ds/m entre 10-25 cm
ECH3:ignore. |conductivite electrique de l'extrait 1/5 en ds/m entre 25-50 cm
MoyEC:ignore. |conductivite electrique de l'extrait 1/5 en ds/3
Hh1:ignore. |Humidité pondérale de la profondeur 1 en pourcentage
Hh2:ignore. |Humidité pondérale de la profondeur 2 en pourcentage
Hh3:ignore. |Humidité pondérale de la profondeur 3 en pourcentage
MoyH:continuous. |Moyenne Humidité pondérale en pourcentage
Gyp1:ignore. |taux de Gypse dans la profondeur 1 en pourcentage
Gyp2:ignore. |taux de Gypse dans la profondeur 2 en pourcentage
Gyp3:ignore. |taux de Gypse dans la profondeur 3 en pourcentage
MoyGyp:continuous. |Moyenne du Gypse en pourcentage
IdCampagnes:ignore. | numero de campagne
Altitudes:ignore. | Altitudes du point en metre
hs:continuous. | profondeur de la surface piezometrique en mètre
IdParcelles:ignore. | numero de parcelle
Dates:ignore. | date de la prise de l'échantillon
```

Figure 1. Un exemple du fichier (\*.names)

## EC234.data - Bloc-notes

Fichier Edition Format Affichage ?

```
30,5.7,5.73,0.99,6.42,3.05,4.17,4.54,22.29,66.87,30.73,39.96,43.24,43.24,56.57,47.68,2.135,1.94,C2,2009/10/23
31,5.56,5.84,0.95,6.04,3.9,2.84,4.26,24.45,24.71,34.04,27.73,43.24,43.24,56.57,47.68,2.135,1.94,C2,2009/10/23
32,5.5,5.41,0.92,2.92,1.9,2.12,2.31,21.61,31.5,37.21,30.11,12.9,12.9,23.95,16.58,2.136,1.95,D1,2009/10/23
33,5.05,4.97,1.01,4.7,2.26,2.13,3.03,17.97,26.31,29.93,24.74,12.9,12.9,23.95,16.58,2.136,1.95,D1,2009/10/23
34,5.14,4.64,1.11,2.11,2.12,3.2,2.48,12.24,24.33,29.97,22.18,12.9,12.9,23.95,16.58,2.136,1.95,D1,2009/10/23
35,4.86,4.8,1.01,3.18,1.91,2.15,2.41,18.96,27.29,31.01,25.75,12.9,12.9,23.95,16.58,2.136,1.95,D1,2009/10/23
36,5.57,5.56,1.10,5.3,4.1,3.04,5.89,14.52,25.53,27.93,22.68,12.9,12.9,23.95,16.58,2.136,1.95,D1,2009/10/23
37,5.6,5.93,0.94,11.97,6.16,3.54,7.22,17.55,20.29,33.99,23.94,11.06,9.21,18.42,12.9,2.135,2.01,B1,2009/10/23
38,5.5,5.43,1.3,38.2,38.2,2.68,1.59,46.07,32.3,26.65,11.06,9.21,18.42,12.9,2.135,2.01,B1,2009/10/23
39,5.13,5.34,0.96,3.68,2.56,2.31,2.85,23.12,25.38,26.63,25.04,11.06,9.21,18.42,12.9,2.135,2.01,B1,2009/10/23
40,4.89,5.31,0.92,5.85,2.81,2.19,3.62,23.14,21.31,28.85,24.43,11.06,9.21,18.42,12.9,2.135,2.01,B1,2009/10/23
41,5.56,6.02,0.92,6.8,4.69,2.84,4.78,17.63,21.37,14.41,17.8,11.06,9.21,18.42,12.9,2.135,2.01,B1,2009/10/23
42,5.55,5.36,1.04,2.66,2.31,2.47,2.48,22.6,26.05,28.25,55.11,06,9.21,18.42,12.9,2.135,2.01,B1,2009/10/23
43,5.42,5.8,0.93,5.93,3.05,3.22,4.06,18.01,21.73,28.49,22.74,11.06,9.21,18.42,12.9,2.135,2.01,B1,2009/10/23
44,5.31,5.34,1.5,94.2,43.2,39.3,59.18,59.20,88.24,82.21,43.11,06,9.21,18.42,12.9,2.135,2.01,B1,2009/10/23
45,5.29,5.47,0.97,3.35,2.32,2.42,2.7,18.36,23.31,26.89,22.85,11.06,9.21,18.42,12.9,2.135,2.01,B1,2009/10/23
46,4.97,5.06,0.98,4.26,2.26,2.17,2.9,20.28,20.57,23.19,21.35,11.06,9.21,18.42,12.9,2.135,2.01,B1,2009/10/23
47,5.34,5.36,1.6,82.3,94.9,43.6,73.19,81.21,98.23,25.21,68.11,06,9.21,18.42,12.9,2.135,2.01,B1,2009/10/23
48,4.86,5.24,0.93,8.92,4.22,3.11,5.42,19.47,17.19,21.66,19.44,11.06,9.21,18.42,12.9,2.135,2.01,B1,2009/10/23
49,5.58,5.45,1.02,4.91,3.15,2.75,3.6,18.07,24.19,29.72,23.99,11.06,9.21,18.42,12.9,2.135,2.01,B1,2009/10/23
50,5.1,5.27,0.97,6.63,4.52,2.44,4.53,15.61,21.63,23.31,20.18,28.56,47.9,26.72,34.39,2.137,2.05,B2-1,2009/10/23
51,4.45,3.91,1.14,1.91,1.87,2.09,1.96,16.75,22.39,16.08,18.41,28.56,47.9,26.72,34.39,2.137,2.05,B2-1,2009/10/23
52,5.21,5.01,1.04,4.39,3.95,3.38,3.91,16.25,24.81,29.7,23.59,28.56,47.9,26.72,34.39,2.137,2.05,B2-1,2009/10/23
53,5.5,5.71,0.96,6.41,4.12,3.64,4.72,17.86,18.29,17.86,18.28,56.47,9.26,72.34,39.2,137,2.05,B2-1,2009/10/23
54,5.39,5.59,0.96,10.7,4.15,2.76,5.87,18.58,20.79,20.57,19.98,28.56,47.9,26.72,34.39,2.137,2.05,B2-1,2009/10/23
55,4.76,5.05,0.94,6.35,3.04,2.25,3.88,17.59,23.69,22.11,21.13,28.56,47.9,26.72,34.39,2.137,2.05,B2-1,2009/10/23
56,5.3,5.15,1.03,4.42,2.73,2.6,3.25,14.35,17.61,26.44,19.47,28.56,47.9,26.72,34.39,2.137,2.05,B2-1,2009/10/23
57,5.29,4.79,1.11,2.82,2.77,2.64,2.74,13.5,18.24,20.36,17.3,6.45,3.68,7.37,5.83,2.137,3,B2-2,2009/10/23
58,5.21,5.44,0.96,10.7,3.63,3.6,5.97,21.89,25.17,33.62,26.89,6.45,3.68,7.37,5.83,2.137,3,B2-2,2009/10/23
59,5.56,5.32,1.04,3.56,3.52,3.26,3.45,15.3,19.53,25.94,20.26,6.45,3.68,7.37,5.83,2.137,3,B2-2,2009/10/23
60,3.99,3.77,1.06,8.94,7.36,4.15,6.82,11.04,13.88,19.84,14.92,6.45,3.68,7.37,5.83,3.137,3,B2-2,2010/03/23
61,5.49,5.53,0.99,19.27,21.23,10.63,17.04,12.83,15.81,18.57,15.73,6.45,3.68,7.37,5.83,3.137,3,B2-2,2010/03/23
62,4.98,4.68,1.06,5.41,4.12,4.54,4.69,12.52,14.59,23.11,16.74,6.45,3.68,7.37,5.83,3.137,3,B2-2,2010/03/23
63,5.24,5.47,0.96,20.69,8.36,3.7,10.92,16.62,19.31,26.86,20.93,12.9,12.9,23.95,16.58,3.136,1.07,D1,2010/03/23
64,5.69,5.63,1.01,14.14,2.26,5.1,7.17,17.48,24.18,21.75,21.14,12.9,12.9,23.95,16.58,3.136,1.07,D1,2010/03/23
65,5.6,17.0,81.5,44.6,61.17,33.9,8,22.04,21.71,30.86,24.87,11.06,9.21,18.42,12.9,3.135,0.95,B1,2010/03/23
66,5.42,5.51,0.98,15.49,4.91,4.43,8.27,18.29,22.34,29.91,23.52,11.06,9.21,18.42,12.9,3.135,0.95,B1,2010/03/23
67,5.51,5.8,0.95,3.68,3.81,5.03,4.17,1.66,2.01,26.7,10.12,11.06,9.21,18.42,12.9,3.135,0.95,B1,2010/03/23
68,5.62,5.6,1.24,16.10,8.5,4.94,13.32,15.54,21.34,32.5,23.12,11.06,9.21,18.42,12.9,3.135,0.95,B1,2010/03/23
69,5.87,5.94,0.99,8.23,4.99,4.81,6.01,16.26,19.35,32.5,22.7,11.06,9.21,18.42,12.9,3.135,0.95,B1,2010/03/23
70,5.37,5.3,1.01,4.19,3.65,4.67,4.17,17.33,14.46,30.84,20.88,11.06,9.21,18.42,12.9,3.135,0.95,B1,2010/03/23
71,5.6,5.63,1.15,0.3,5.15,3.65,7.95,9.62,11.3,26.86,15.93,11.06,9.21,18.42,12.9,3.135,0.95,B1,2010/03/23
```

Figure 2. Un exemple du fichier (\*.data)

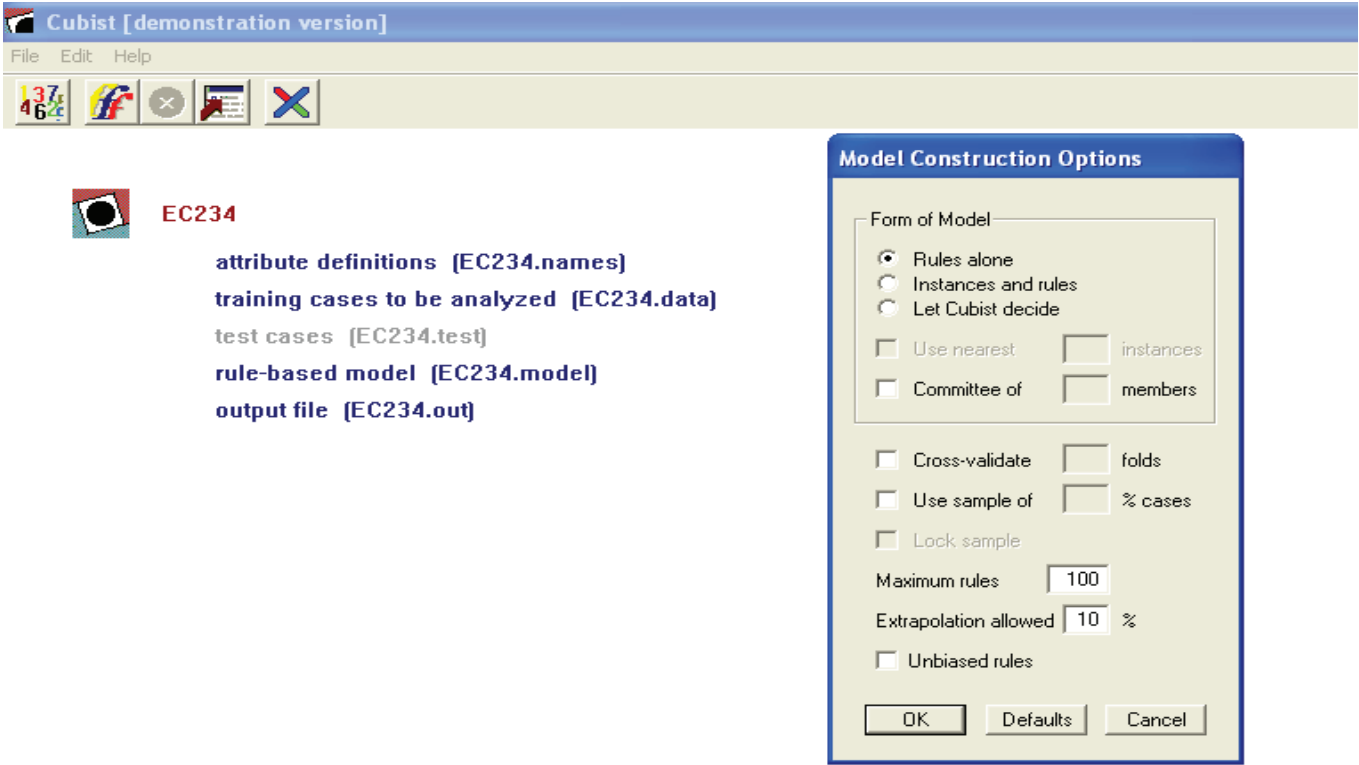


Figure 3. Interface de Cubist

## Annexe V — Tableaux de contingence

### 5.1. Prédiction Cubist

**Effectifs observés**

H1	Prédictions Cubist						
	C1	C2	C3	C4	C5		
Observées	C1	0	0	0	0	0	0
	C2	0	0	0	0	2	2
	C3	0	0	0	3	0	3
	C4	0	0	0	3	11	14
	C5	0	0	0	1	96	97
		0	0	0	7	109	116

**Effectifs théoriques**

H1	Prédictions Cubist						
	C1	C2	C3	C4	C5		
Théorique	C1	0	0	0	0	0	0
	C2	0	0	0,00	0,12	1,88	2
	C3	0	0	0,00	0,18	2,82	3
	C4	0	0	0,00	0,84	13,16	14
	C5	0	0	0,00	5,85	91,15	97
		0	0	0	7	109	116

**Calcul de Khi-2**

H1	Prédictions Cubist						
	C1	C2	C3	C4	C5		
Observées	C1						
	C2				0,12	0,01	
	C3				43,90	2,82	
	C4				5,50	0,35	
	C5				4,02	0,26	
				53,54	3,44	<b>56,98</b>	ddl V table p 1*3=3 7,815 0

**H2**

Observées	Prédictions Cubist					
	C1	C2	C3	C4	C5	
C1	0	0	0	0	0	0
C2	0	0	0	0	0	0
C3	0	0	0	3	3	6
C4	0	0	0	20	19	39
C5	0	0	0	13	58	71
		0	0	36	80	116

**H2**

Théorique	Prédictions Cubist					
	C1	C2	C3	C4	C5	
C1	0	0	0	0	0	0
C2	0	0	0,00	0,00	0,00	0
C3	0	0	0,00	1,86	4,14	6
C4	0	0	0,00	12,10	26,90	39
C5	0	0	0,00	22,03	48,97	71
		0	0	36	80	116

**H2**

Observées	Prédictions Cubist						
	C1	C2	C3	C4	C5		
C1							
C2							
C3				0,70	0,31		
C4				5,15	2,32		
C5				3,70	1,67		
				9,55	4,30	<b>13,85</b>	ddl V table p 1*2=2 5,991 0,000983

**H3**

Observées	Prédictions Cubist					
	C1	C2	C3	C4	C5	
C1	0	0	0	0	0	0
C2	0	0	0	1	1	2
C3	0	0	0	0	2	2
C4	0	0	0	53	9	62
C5	0	0	0	8	42	50
		0	0	62	54	116

**H3**

Théorique	Prédictions Cubist					
	C1	C2	C3	C4	C5	
C1	0	0	0	0	0	0
C2	0	0	0,00	1,07	0,93	2
C3	0	0	0,00	1,07	0,93	2
C4	0	0	0,00	33,14	28,86	62
C5	0	0	0,00	26,72	23,28	50
		0	0	62	54	116

**H3**

Observées	Prédictions Cubist						
	C1	C2	C3	C4	C5		
C1							
C2				0,00	0,01		
C3				1,07	1,23		
C4				11,90	13,67		
C5				13,12	15,06		
				26,10	29,96	<b>56,06</b>	ddl V table p 1*3=3 7,815 0

## 5.2. Prédiction ESAP

Effectifs observés

h1	Prédictions ESAP 0-30v						
	C1	C2	C3	C4	C5		
Observées	C1	0	0	0	0	0	0
	C2	0	0	1	0	1	2
	C3	1	0	0	0	2	3
	C4	4	3	1	3	3	14
	C5	10	9	24	32	22	97
		15	12	26	35	28	116

Effectifs théoriques

h1	Prédictions ESAP 0-30v						
	C1	C2	C3	C4	C5		
Observées	C1	0	0	0	0	0	0
	C2	0,26	0,21	0,45	0,60	0,48	2
	C3	0,39	0,31	0,67	0,91	0,72	3
	C4	1,81	1,45	3,14	4,22	3,38	14
	C5	12,54	10,03	21,74	29,27	23,41	97
		15	12	26	35	28	116

Calcul de Khi-2

h1	Prédictions ESAP 0-30v						
	C1	C2	C3	C4	C5		
Observées	C1						
	C2	0,26	0,21	0,68	0,60	0,55	2
	C3	0,97	0,31	0,67	0,91	2,25	3
	C4	2,65	1,66	1,46	0,35	0,04	14
	C5	0,52	0,11	0,23	0,26	0,09	97
		4,39	2,29	3,04	2,12	2,93	14,77
							4*3=12
							21,026
							0,25

h1	Prédictions ESAP 0-30h						
	C1	C2	C3	C4	C5		
Observées	C1	0	0	0	0	0	0
	C2	1	0	0	1	0	2
	C3	0	1	1	1	0	3
	C4	1	3	5	5	0	14
	C5	18	28	27	18	6	97
		20	32	33	25	6	116

h1	Prédictions ESAP 0-30h						
	C1	C2	C3	C4	C5		
Observées	C1	0	0	0	0	0	0
	C2	0,34	0,55	0,57	0,43	0,10	2
	C3	0,52	0,83	0,85	0,65	0,16	3
	C4	2,41	3,86	3,98	3,02	0,72	14
	C5	16,72	26,76	27,59	20,91	5,02	97
		20	32	33	25	6	116

h1	Prédictions ESAP 0-30h						
	C1	C2	C3	C4	C5		
Observées	C1						
	C2	1,24	0,55	0,57	0,75	0,10	2
	C3	0,52	0,04	0,03	0,19	0,16	3
	C4	0,83	0,19	0,26	1,30	0,72	14
	C5	0,10	0,06	0,01	0,40	0,19	97
		2,69	0,84	0,87	2,65	1,18	8,22
							4*3=12
							21,026
							0,77

h2	Prédictions ESAP 0-30v						
	C1	C2	C3	C4	C5		
Observées	C1	0	0	0	0	0	0
	C2	0	0	0	0	0	0
	C3	1	1	1	1	2	6
	C4	6	7	10	9	7	39
	C5	8	4	15	25	19	71
		15	12	26	35	28	116

h2	Prédictions ESAP 0-30v						
	C1	C2	C3	C4	C5		
Observées	C1	0	0	0	0	0	0
	C2	0	0	0,00	0,00	0,00	0
	C3	0,78	0,62	1,34	1,81	1,45	6
	C4	5,04	4,03	8,74	11,77	9,41	39
	C5	9,18	7,34	15,91	21,42	17,14	71
		15	12	26	35	28	116

h2	Prédictions ESAP 0-30v						
	C1	C2	C3	C4	C5		
Observées	C1						
	C2						
	C3	0,06	0,23	0,09	0,36	0,21	6
	C4	0,18	2,18	0,18	0,65	0,62	39
	C5	0,15	1,52	0,05	0,60	0,20	71
		0,40	3,93	0,32	1,61	1,03	7,30
							4*2=8
							15,507
							0,5

h2	Prédictions ESAP 0-30h						
	C1	C2	C3	C4	C5		
Observées	C1	0	0	0	0	0	0
	C2	0	0	0	0	0	0
	C3	2	1	2	1	0	6
	C4	4	11	13	11	0	39
	C5	14	20	18	13	6	71
		20	32	33	25	6	116

h2	Prédictions ESAP 0-30h						
	C1	C2	C3	C4	C5		
Observées	C1	0	0	0	0	0	0
	C2	0	0	0,00	0,00	0,00	0
	C3	1,03	1,66	1,71	1,29	0,31	6
	C4	6,72	10,76	11,09	8,41	2,02	39
	C5	12,24	19,59	20,20	15,30	3,67	71
		20	32	33	25	6	116

h2	Prédictions ESAP 0-30h						
	C1	C2	C3	C4	C5		
Observées	C1						
	C2						
	C3	0,90	0,26	0,05	0,07	0,31	
	C4	1,10	0,01	0,33	0,80	2,02	
	C5	0,25	0,01	0,24	0,35	1,48	
		2,26	0,27	0,62	1,21	3,80	8,16

Khi-2 ddl V table p  
4\*2=8 15,507 0,42

h3	Prédictions ESAP 30-60v						
	C1	C2	C3	C4	C5		
Observées	C1	0	0	0	0	0	0
	C2	0	0	0	0	2	2
	C3	0	0	0	2	0	2
	C4	2	7	23	28	2	62
	C5	1	4	9	23	13	50
		3	11	32	53	17	116

h3	Prédictions ESAP 30-60v						
	C1	C2	C3	C4	C5		
Observées	C1	0	0	0	0	0	0
	C2	0,05	0,19	0,55	0,91	0,29	2
	C3	0,05	0,19	0,55	0,91	0,29	2
	C4	1,60	5,88	17,10	28,33	9,09	62
	C5	1,29	4,74	13,79	22,84	7,33	50
		3	11	32	53	17	116

h3	Prédictions ESAP 30-60v						
	C1	C2	C3	C4	C5		
Observées	C1						
	C2	0,05	0,19	0,55	0,91	9,94	
	C3	0,05	0,19	0,55	1,29	0,29	
	C4	0,10	0,21	2,03	0,00	5,53	
	C5	0,07	0,12	1,67	0,00	4,39	
		0,27	0,71	4,80	2,21	20,15	28,14

Khi-2 ddl V table p  
4\*3=12 21,026 0,01

h3	Prédictions ESAP 30-60h						
	C1	C2	C3	C4	C5		
Observées	C1	0	0	0	0	0	0
	C2	0	0	0	0	2	2
	C3	0	1	0	1	0	2
	C4	5	9	22	25	1	62
	C5	5	0	14	18	13	50
		10	10	36	44	16	116

h3	Prédictions ESAP 30-60h						
	C1	C2	C3	C4	C5		
Observées	C1	0	0	0	0	0	0
	C2	0,17	0,17	0,62	0,76	0,28	2
	C3	0,17	0,17	0,62	0,76	0,28	2
	C4	5,34	5,34	19,24	23,52	8,55	62
	C5	4,31	4,31	15,52	18,97	6,90	50
		10	10	36	44	16	116

h3	Prédictions ESAP 30-60h						
	C1	C2	C3	C4	C5		
Observées	C1						
	C2	0,17	0,17	0,62	0,76	10,78	
	C3	0,17	3,97	0,62	0,08	0,28	
	C4	0,02	2,50	0,40	0,09	6,67	
	C5	0,11	4,31	0,15	0,05	5,40	
		0,48	10,95	1,79	0,98	23,12	37,32

Khi-2 ddl V table p  
4\*3=12 21,026 0



**Résumé** L'oasis de Ouargla (sud-est algérien) située dans un système endoréique, se caractérise par un climat aride qui ne permet l'installation d'aucune culture sans le recours à l'irrigation. Elle procure de grands services écosystémiques et économiques même dans ce contexte environnemental difficile. Actuellement, elle se trouve menacée par les effets négatifs de la salinisation de ses sols et de la remontée des eaux salées de la nappe phréatique, dues principalement à une irrigation et à un assainissement mal gérés à l'échelle de l'oasis.

Ce projet vise en premier lieu une meilleure prévention des risques de salinisation par un suivi dynamique de la salinité des sols. L'objectif est de tester la capacité des enquêtes de conductivité électromagnétique (EM) à décrire les changements spatiotemporels de la salinité des sols à différentes profondeurs à l'échelle d'une palmeraie irriguée, caractérisée par des sols (Salic Solonchaks Aridic) très sableux.

Le second volet de ce travail porte sur une modélisation de l'évolution de la salinité à l'échelle de la palmeraie en tenant compte de l'état initial observé et de l'évolution au cours de la période d'étude, des conditions climatiques, des niveaux de la nappe et des apports d'eau par irrigation

2889 mesures EM 38 de conductivité électrique apparente (ECa) ont été obtenues pendant quatre dates entre mars 2009 et novembre 2010. A des fins d'étalonnage et de validation, la EC<sub>1.5</sub> de 30 points choisis au hasard à chaque date a été mesurée dans trois couches de sol.

Les résultats montrent que la combinaison de prospections géophysiques (EM), de mesures de calibration EC<sub>1.5</sub> et de méthodes de prédiction inférentielle par arbres de régression, permet de décrire les variations inter-parcellaires de la salinité et de sa dynamique saisonnière à différentes profondeurs. Ce suivi dynamique de la salinité dans les sols suppose néanmoins une connaissance assez fine des caractéristiques pédologiques nécessaires à la construction de modèles de prédiction précis. De façon générale, la précision de la prédiction décroît depuis le bas vers le haut du profil du sol et l'évolution de la salinité de surface apparaît de ce fait difficile à caractériser.

Les simulations d'une modélisation hydrologique "1-D" mettent en évidence l'effet salinisant d'une fluctuation haute de la nappe et des faibles doses d'irrigation sur la zone racinaire du dattier dans la cuvette de Ouargla. A l'opposé, des doses accrues maintiennent le niveau de la salinité au niveau le plus bas, mais doivent être impérativement échelonnées sur une semaine pour empêcher le dessèchement du sol dans ces milieux fortement évaporants. La comparaison des scénarios croisant les doses d'irrigations avec des eaux de qualités différentes du Mio-Pliocène et du Sénonien suggère un impact de la salinité sur les rendements en datte même avec l'utilisation des doses d'irrigation accrues.

La modélisation de l'évolution verticale de la salinité de la zone racinaire du palmier combine l'effet de la nappe phréatique, de la qualité de l'eau et des doses d'irrigation. Son amélioration

nécessitera une modélisation plus générique capable d'inclure les exigences de lixiviation et le rendement des cultures dans les simulations.

**Mots clés :** EM 38, cuvette de Ouargla, climat aride, oasis, salinité, nappe phréatique, sols sableux, irrigation, modélisation hydrologique.

### Abstract

The Saharan Ouargla oasis (Algeria) is an endorheic system characterized by an arid climate that allows the installation of any culture without the use of irrigation. It provides great ecosystem and economic services even with this difficult environmental context. Currently, she is threatened by the negative effects of salinization of soils and hauling salt water from the water table, mainly due to insufficient irrigation management in the oasis.

This project tested the ability of electromagnetic conductivity surveys (EM) to describe the spatial and temporal changes in soil salinity at various depths across an irrigated grove, characterized by soils (Salic Solonchaks Aridic) very sandy.

The second part of this work is a modelling of the evolution of salinity of palm grove, taking into account the original state and trends observed during the study period, climatic conditions, of groundwater levels, water irrigation and evapotranspiration.

2889 measures EM 38 apparent electrical conductivity (ECa) were obtained for four dates between March 2009 and November 2010. For purposes of calibration and validation, EC<sub>1.5</sub> from 30 points randomly selected each time was measured in three soil layers.

The results show that the combination of geophysical prospecting (EM) of calibration measurements EC<sub>1.5</sub> and inferential prediction methods by regression trees, allows describe the inter-compartmental variations in salinity and its seasonal dynamics at different depths. This dynamic monitoring of salinity in soils nevertheless presupposes a fairly detailed knowledge of soil characteristics required to build accurate predictive models. Generally, the prediction accuracy decreases from the bottom to the top of the soil profile and the evolution of surface salinity appears therefore difficult to characterize.

Simulations of a hydrological modelling "1D" show the salinizing effect of a high fluctuation of the water table and low doses of irrigation in the root zone of the date in the basin of Ouargla. In contrast, increased doses maintain the level of salinity in the lowest level, but must necessarily be spread over a week to prevent the soil from drying in these highly evaporative media. Comparing scenarios crossing irrigation doses with different water qualities Mio-Pliocene and Senonian suggests an impact of salinity on the yields of date even with the use of increased irrigation doses.

Modelling the vertical development of the salinity of the root zone of the palm combines the effect of the water table, the water quality and irrigation doses. His improvement will require



a more generic modelling can include leaching requirements and crop yield in the simulations.

**Keywords:** EM 38, Ouargla depression, arid climate, oasis, salinity, water table, sandy soils, irrigation, hydrological modelling.