

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche
scientifique

المدرسة الوطنية العليا للفلاحة - الحراش - الجزائر
Ecole Nationale Supérieure Agronomique El Harrach –Alger

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de Magister en Sciences Agronomiques

Spécialité : science des sols

Option : Pédologie et mise en valeur des terres

THEME

Evolution temporelle de la salinité des sols du Bas-Chélif

Présenté par : Mr. AIT MECHEDAL Mouloud

Soutenu le : 16/01/2014

Devant le jury composé de :

Président du jury: Mr. DJILI K. Professeur

Promoteur : Mr. DAOUD Y. Professeur

Examineurs: Mr. SEMAR A. Maitre de conférences

M^{me}. KOURGLI N. Maitre assistante

Année Universitaire 2012-2013

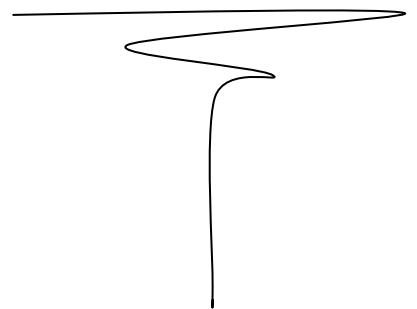
À toute ma famille

A tous mes amis

A toute personne que j'aime, et qui m'aime...

Je dédie ce modeste travail avec amour et honneur

MOULOU



Remerciement

De prime abord, il est indispensable de signaler qu'il n'était pas un point facile d'achever ce travail sans l'aide de Dieu tout puissant, notre Seigneur et guide.

*En premier lieu, mes plus sincères remerciements et reconnaissances vont à mon promoteur **Mr. DAOUD Y.** pour sa patience à mon égard et de m'avoir dirigée et orientée avec ses précieux conseils, tout au long de notre travail.*

*Je porte ma gratitude à **Mr. DJILI K.** m'a fait l'honneur de présider le jury, et ainsi de juger ce travail.*

*J'adresse mes respectueux remerciements à **Mr. SEMAR A.,** et à **Mme. KOURGLI N.** qui m'ont fait l'honneur en acceptant d'examiner ce travail.*

Je remercie mes très chers parents, en témoignage et en gratitude, de leurs sacrifices illimités, leur réconfort moral et tous les efforts qu'ils ont consentis pour mon éducation et mon instruction pour me voir réussir un jour. Que Dieu les garde.

Je tiens à remercier tout le personnel du département de science du sol

*Je tiens à remercier aussi tout le personnel de l'ITAF et surtout **M^{elle}. Benyahia Afaf.***

*Enfin, je remercie tous ceux et celles qui durant cette période m'ont porté conseils, encouragements et soutien, surtout **Karim et Fazia.***

AIT MECHEDAL MOULOUD

Résumé

Le présent travail porte sur la caractérisation de l'état de salinité des sols du périmètre de Hmadena situé dans le Bas-Cheliff, et sur l'évaluation de l'évolution temporelle de l'état de salinité des sols entre 1956 et 2012. Il s'agit de caractériser la solution des sols, de définir les profils de distribution des sels dans les sols, de déterminer les faciès chimiques des solutions des sols, de tester l'état de saturation des solutions vis-à-vis des sels peu solubles, et de cerner l'évolution temporelle de la salinité entre 1956 et 2012 en comparant les profils salins pour déterminer le sens et l'intensité de la variation de l'état de salinité des sols. Ce travail a porté sur l'analyse et l'exploitation des données obtenues sur la solution de 53 échantillons provenant de 11 profils.

Les principaux résultats obtenus montrent que la salinité des sols étudiés est variable. Elle varie entre 0,72 dS/m et 51,7 dS/m. Les échantillons salés ($CE > 4$ dS/m) représentent 84,9% du total. Le pH révèle une réaction relativement alcaline des sols. L'évolution des concentrations ioniques est généralement proportionnelle à celle de la CE, à l'exception du potassium qui présente une évolution spécifique et indépendante de la salinité. Les valeurs du SAR sont variables entre 0,98 et 154,62 et évoluent proportionnellement avec l'augmentation de la CE. L'augmentation de la salinité s'accompagne d'une sodisation du complexe adsorbant, 45 échantillons correspondent à des horizons sodiques ($ESP > 15$ %).

Le profil de distribution des sels est caractérisé par un gradient de salinité descendant.

Le faciès chloruré sodique est dominant et il caractérise 92 % des horizons. Les solutions des sols sont généralement saturées vis-à-vis de la calcite, et elles sont sous-saturées vis-à-vis du gypse.

L'évolution temporelle de la salinité des sols entre 1956 et 2012 est variable selon les profils et les horizons. Cette évolution de la salinité des sols durant 57 ans met en évidence l'importance **du micro-relief et** du fonctionnement du réseau de drainage dans le déterminisme du sens de variation du niveau de salinité des sols du Bas-Cheliff.

Mots clés : salinité, profils salins, géochimie, évolution temporelle, Bas-Cheliff

Abstract

The present work concerns the characterization of the state of soil salinity in the perimeter Hmadena located in Lower Cheliff, and the evaluation of the temporal evolution of the state of soil salinity between 1956 and 2012. It is to characterize the soil solution, define distribution patterns of salts in the soil to determine the chemical facies soil solution, test the saturation solutions for the low salt soluble, and to identify the temporal evolution of salinity between 1956 and 2012 by comparing saline profiles to determine the direction and magnitude of the change in the state of soil salinity. This work has concerned on the analysis and use of data obtained from the solution of 53 samples from 11 profiles.

The main results show that soil salinity is variable. It varies between 0.72 dS / m and 51.7 dS/m. Salt samples ($EC > 4$ dS / m) represent 84.9% of the total. The pH reveals a relatively alkaline soil. Evolution of ions concentration is generally proportional to that of the EC, except that potassium has a specific and independent evolution in salinity. SAR values vary between 0.98 and 154.62 and evolve proportionally with increasing EC. Increasing salinity is accompanied by sodification of the adsorption complex, 45 samples correspond to horizons sodium ($ESP > 15\%$).

The distribution profile of the salt is characterized by a descending salt gradient.

Sodium chloride facies is dominant and characterizes 92% of horizons. The solutions are generally saturated from the calcite and are under saturated from the gypsum.

The temporal evolution of soil salinity between 1956 and 2012 varies in profiles and in horizons. This evolution of the salinity during 57 years highlights the importance of micro-relief and operation of the drainage system in the determination of the direction of change in the level of soil salinity in Lower-Cheliff.

Key words: salinity, salt profiles, geochemistry, temporal evolution, Lower- Cheliff

الملخص

هذا العمل يتعلق بوصف حالة ملوحة التربة في محيط الحمادنة التي تقع في السهل المنخفض للشلف، و تقييم التطور الزمني لحالة ملوحة التربة ما بين عامي 1956 و 2012. يتعلق هذا العمل تحديدا بتوصيف محلول التربة، وتحديد أنماط توزيع الأملاح في التربة، وتحديد التركيبة الكيميائية لمحلول التربة، واختبار التشبع للمحلول بالنسبة الى الاملاح منخفضة القابلية للذوبان، والتعرف على التطور الزمني للملوحة ما بين عامي 1956 و 2012 من خلال مقارنة مقاطع الملوحة لتحديد اتجاه وحجم التغير في حالة ملوحة التربة. وقد ركز هذا العمل على تحليل واستخدام البيانات التي تم الحصول عليها من تحليل 53 عينة ل 11 مقطع للتربة.

أظهرت النتائج الرئيسية ان ملوحة التربة متغيرة وهي بين 0.72 و 51.7 ديسييمانس /م. وان عينات التربة المالحة (موصلية كهربائية < 4 ديسييمانس /م) تمثل 84.9 % . درجة الحموضة تكشف ان التربة قاعدية نسبيا. التغيرات في تركيز الأيونات عموما يتناسب مع زيادة نسبة الملوحة، إلا أن البوتاسيوم لديه تغييرات محددة ومستقلة في الملوحة. درجة امتصاص الصوديوم تختلف بين 0.98 و 154.62 وتتطور بشكل متناسب مع زيادة قيم الملوحة.

يتميز مقاطع توزيع الملوحة في التربة بالتدرج التنازلي للملح.

تركيبة كلوريد الصوديوم هي المهيمنة و تميز 92% من العينات. محلول التربة مشبعة عموما من الكالسيوم و غير مشبعة من الجبس.

التطور الزمني لملوحة التربة ما بين عامي 1956 و 2012 تختلف داخل مقاطع التربة، هذا تطور لاملوحة خلال 57 عاما يسلط الضوء على أهمية التضاريس وتشغيل نظام الصرف في تحديد اتجاه التغير في مستوى الملوحة في السهل المنخفض للشلف.

الكلمات الرئيسية : الملوحة ، مقاطع الملوحة ، الجيوكيميا ، التطور الزمني ، السهل المنخفض للشلف

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Le cycle des sels dans le sol.....	5
Figure 2. Les voies de la salinisation du sol.....	10
Figure 3. Les différents types de profils salins.....	2
Figure 4. Évolution des profils salins en fonction du temps.....	3
Figure 5. Evolution de la CE du sol du périmètre de Ouarizane entre 1975 et 2006.....	14
Figure 6 . Evolution de la salinité des sols du fleuve jaune entre 1958 et 2007.....	15
Figure 7. Evolution de la salinité de la nappe et du sol.....	15
Figure 8. Evolution de la composition chimique de la solution du sol en fonction de sa concentration	16
Figure 9. Evolution du rapport Chlorures/Sulfates en fonction de la conductivité électrique.....	17
Figure 10. Evolution du carbone de la biomasse microbienne en fonction de la CE.....	18
Figure 11. Evolution du rapport C/N en fonction de la CE.....	19
Figure 12. Les différents types de sols en Algérie.....	21
Figure 13. Carte de la salinité estimée par Krigeage.....	24
Figure 14. Présentation de la zone d'étude	26
Figure 15. Le diagramme ombrothermique de la station climatique de Hmadena 1985-2004.....	27
Figure 16. Carte des sols de la station de Hmadena	28
Figure 17. Carte de localisation des profils de la station de Hmadena.....	30
Figure 18. Carte actualisée de localisation des profils de la station de Hmadena	31
Figure 19. L'histogramme des fréquences des classes de salinité.....	38
Figure 20. Relation entre la somme des anions et la somme des cations.....	40
Figure 21. Relation entre la somme des cations et la conductivité électrique.....	42

Figure 22. Relation entre la somme des anions et la conductivité électrique.....	43
Figure 23. Relation entre le sodium et la conductivité électrique.....	44
Figure 24. Relation entre le calcium et la conductivité électrique	45
Figure 25. Relation entre le magnésium et la conductivité électrique.....	46
Figure 26. Relation entre les chlorures et la conductivité électrique.....	47
Figure 27. Relation entre les bicarbonates et la conductivité électrique.....	48
Figure 28. Relation entre les sulfates et la conductivité électrique.....	50
Figure 29. Relation entre le SAR et la conductivité électrique	51
Figure 30. L’histogramme des fréquences des classes de sodicité.....	52
Figure 31. Profils salins type D	56
Figure 32. Profils salins type B.....	57
Figure 33. Faciès chimiques des solutions qui ont une CE inférieure à 14 dS/m	59
Figure 34. Faciès chimiques des solutions qui ont une CE supérieure à 14 dS/m.....	60
Figure 35. Variation de l’indice de saturation de la calcite par rapport à la conductivité électrique	62
Figure 36. Variation de l’indice de saturation du gypse par rapport à la conductivité électrique	64
Figure 37. Profil salin du profil A503 pour les deux périodes (1956 et 2012)	67
Figure 38. Profil salin de profil A567 pour les deux périodes (1956 et 2012).....	67
Figure 39. Profil salin des profils B163, B217 et A495 pour les deux périodes (1956 et 2012)...	68
Figure 40. La localisation des profils comparés et le sens de circulation de l’eau.....	71

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I. Classes de la salinité en fonction de la conductivité électrique USSL (1954).	6
Tableau II. Classes de la salinité en fonction de la conductivité électrique de l'extrait aqueux à 25 °C.	6
Tableau III. Les classes du taux de sodium échangeable.	8
Tableau IV. Vitesse de salinisation des sols dans l'horizon de surface.	13
Tableau V. Les paramètres statistiques élémentaires de la CE des sols du Nord de l'Algérie.	22
Tableau VI. Les paramètres statistiques élémentaires du taux de sodium échangeable des sols du Nord de l'Algérie.	22
Tableau VII. Moyennes des températures et des précipitations de la station de Hmadena Pour la période 1985-2004.	27
Tableau VIII. Répartition de l'effectif des horizons en fonction des classes de teneurs en argile, limon et sable	29
Tableau IX. Les profils étudiés de la station de Hmadena.	33
Tableau X. Caractéristiques de la solution des sols.	39
Tableau XI. La somme des cations et des anions et leur écart.	41
Tableau XII. Résultats analytiques des ions de la solution des sols	44
Tableau XIII. Les teneurs calculées en carbonates de la solution des sols.	49
Tableau XIV. Les valeurs du SAR et de l'ESP des échantillons.	53
Tableau XV. Représentation des tests de saturation vis-à-vis de la calcite et le gypse.	65
Tableau XVI. L'écart et la vitesse de salinisation moyenne entre 1956 et 2012 des profils B163, A495, B217, A567, 5A03.	69
Tableau XVII. L'écart et la vitesse de salinisation entre 1956 et 2012 par horizon des profils comparés.	70

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
CHAPITRE I. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	3
1. LA SALINISATION	3
1.1. Définition	3
1.2. Origines de la salinité.....	3
1.3. Les sels solubles.....	4
1.4. La dynamique des sels	4
2. LES PARAMETRES ET LES METHODES DE CARACTERISATION DE LA SALINITE DU SOL	5
2.1. La conductivité électrique	5
2.1.1. Les méthodes de mesure de la conductivité électrique au laboratoire.....	5
2.1.2. Les autres méthodes de mesure de la salinité	7
2.2. Le taux de sodium échangeable	8
2.3. Le sodium adsorption ratio.....	8
2.4. Le bilan salin.....	9
3. EVOLUTION DE LA SALINITE	9
3.1. Les voies de la salinisation.....	9
3.2. Les profils salins	11
3.3. Evolution temporelle de la salinité.....	12
3.4. Evolution de la concentration ionique	16
4. EFFET DE LA SALINITE SUR LES PROPRIETES DU SOL	17
4.1. La structure du sol	17
4.2. La rétention en eau.....	17
4.3. L'activité biologique.....	18
5. LA CLASSIFICATION DES SOLS SALES	19
5.1. La classification selon le référentiel pédologique (2008).....	19
5.2. Le système de la WRB (2006)	20

6. LES SOLS SALES EN ALGERIE	20
7. LES SOLS SALES DE LA PLAINE DU BAS- CHELIFF	23
CONCLUSION	24
CHAPITRE II. MATERIEL ET METHODES	25
1. MATERIEL D'ETUDE	25
1.1. La zone d'étude	25
1.2. Les profils étudiés	29
2. METHODES D'ETUDE	34
2.1. Analyses du sol	34
2.2. Approche géochimiques	34
2.2.1. Les faciès chimiques.....	34
2.2.2. Calculs géochimiques	35
2.2.2.1. Les éléments du calcul	35
2.2.2.2. Organisation du calcul.....	36
CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSION	38
1. LES PARAMETRES DE CARACTERISATION DE LA SOLUTION DES SOLS.....	38
1.1. La conductivité électrique	38
1.2. Corrélation entre la somme des cations et la somme des anions	40
1.3. Corrélation entre la conductivité électrique et la concentration en électrolytes	42
1.4. Le pH	43
1.5. Le sodium.....	44
1.6. Le potassium.....	45
1.7. Le calcium	45
1.8. Le magnésium.....	46
1.9. Le chlore	46
1.10. Les bicarbonates	47
1.11. Les carbonates	48
1.12. Les sulfates.....	50
1.13. Le SAR et L'ESP	50

1. 14. Synthèse et discussion	54
2. LES PROFILS SALINS	55
2.1. Les types de profils salins	55
2.2. Synthèse et discussion.....	57
3. LE FACIES CHIMIQUE	58
3.1. Les résultats du logiciel Diagrammes	58
3.2. Synthèse et discussion.....	58
4. L'ETAT DE SATURATION DES SOLUTIONS VIS-A-VIS DES SELS PEU SOLUBLES.....	60
4.1. Test de saturation vis-à-vis de la calcite	61
4.2. Test de saturation vis-à-vis du gypse.....	63
4.3. Synthèse et discussion.....	64
5. L'EVOLUTION TEMPORELLE DE LA SALINITE	66
5.1. Comparaison des profils salins entre les deux périodes	66
5.2. Le gradient d'évolution de la salinité	68
5.2.1. Le gradient d'évolution de la salinité par profil.....	68
5.2.2. Le gradient d'évolution de la salinité par horizon	69
5.3. la position topographique des profils.....	71
5.4. Synthèse et discussion.....	72
CONCLUSION	73
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE.....	75

INTRODUCTION

La salinisation est un processus pédogénétique fréquent dans les sols d'Algérie (Daoud, 1993 ; Halitim, 1988). Les sols salés peuvent être subdivisés en trois catégories : les sols salins, les sols salins à alcalis et les sols à alcalis (USSL, 1954). Cette subdivision est essentiellement basée sur le niveau de salinité de la solution du sol (exprimé par la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée), et sur le niveau de sodicité du complexe adsorbant (exprimé par le taux de sodium échangeable).

La salinité est une contrainte qui affecte le comportement des végétaux, elle provoque des perturbations multiples sur le métabolisme, la croissance et le développement des plantes aux niveaux moléculaire, biochimique et physiologique (Munns, 2002). Elle modifie également certaines propriétés du sol (De Forges, 1972).

La salinisation se rapporte au processus de l'accumulation des sels solubles dans le sol (Arshad, 2008). Les sels Les plus fréquents dans les sols des régions arides et semi- arides sont les chlorures et les sulfates de sodium, les sulfates de magnésium et à un moindre degré les carbonates de sodium (Halitim, 1988). L'origine de la salinisation est primaire lorsqu'elle se produit naturellement, elle est secondaire lorsqu'elle se produit par l'action anthropique (Slama, 2004).

Les paramètres de caractérisation de la salinité du sol sont la conductivité électrique (CE, dS/m à 25°C), le taux de sodium échangeable (ESP en % de la CEC), le sodium adsorption ratio (SAR en $(\text{meq/l})^{1/2}$)(Girard *et al.*, 2005).

La salinisation se produit selon deux voies, la voie saline neutre et la voie alcaline. La condition de leur formation est liée au concept d'alcalinité résiduelle (Marlet et Job, 2006).

La salinité est variable dans l'espace et dans le temps. L'évolution de la salinité est influencée par plusieurs facteurs tels que l'apport d'eau d'irrigation salée, l'aridité du climat, la déficience du drainage, et la proximité de la nappe (USSL, 1954).

L'évolution de la salinité du sol engendre une modification de la composition chimique de la solution du sol. La variation de la concentration de la solution du sol est proportionnelle à la conductivité électrique pour certains ions, elle peut être particulière pour d'autres ions impliqués dans la précipitation des minéraux (Laoufi, 2010 ; Ait Mechedal, 2011 ; Boussoussa, 2012).

Les sols salés d'Algérie sont essentiellement des Solonchaks et ils sont préférentiellement localisés dans les bioclimats arides et semi- arides (FAO, 2005). Plus de 15 % de la surface des sols cartographiés en Algérie est occupée par des sols salés (Halitim, 1988).

Les sols du Bas-Cheliff sont généralement affectés par le phénomène de salinisation (Durand, 1956 ; Daoud, 1993 ; Douaoui, 2005 ; Hadj Miloud, 2010). Cette salinisation est liée à la nature des alluvions relativement riches en sels solubles, à la qualité des eaux d'irrigation et à la faible profondeur de la nappe (Durand, 1956). Dans le Bas-Cheliff, les sols non salés représentent 16 % de la superficie totale, les sols moyennement salés représentent 22 %, les sols salés représentent 30 %, et les sols très salés occupent 32 % de la surface totale (Douaoui, 2005).

Le présent travail porte sur la caractérisation de l'état de salinité des sols du périmètre de Hmadena situé dans le Bas-Cheliff, et sur l'évaluation de l'évolution temporelle de l'état de salinité des sols entre 1956 et 2012. Il s'agit donc de :

- Caractériser la solution des sols, de définir les profils de distribution des sels dans les sols, de déterminer les facies chimiques des solutions des sols, et de tester l'état de saturation des solutions vis-à-vis des sels peu solubles.
- Cerner l'évolution temporelle de la salinité entre 1956 et 2012 en comparant les profils salins pour déterminer le sens et l'intensité de la variation de l'état de salinité des sols.

Le présent document est structuré trois chapitres. Le premier chapitre porte sur une étude bibliographique. Le second chapitre présente le matériel et les méthodes d'étude utilisés. Les résultats obtenus sont présentés dans le troisième chapitre.

CHAPITRE I. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1. LA SALINISATION

1.1. Définition

Selon Marlet et Job (2006) « La salinisation est un terme générique caractérisant une augmentation progressive de la concentration des sels solubles dans les sols sous l'influence d'apport d'eau d'irrigation salée, de l'aridité du climat ou de conditions hydrologiques particulières (lessivage insuffisant, proximité de la nappe) ».

La salinisation se rapporte au processus de l'accumulation des sels dans le sol. La salinisation se produit quand l'eau contenant des sels dissous s'évapore (Arshad, 2008).

Une teneur élevée en sels solubles dans le sol est néfaste pour la vie végétale, elle modifie également certaines propriétés du sol (De Forges, 1972).

La salinité est un état caractérisé par une accumulation des sels hydrosolubles principalement du sodium, mais également du potassium, du calcium et du magnésium. Ces sels peuvent être des chlorures, des sulfates ou des carbonates. Ils peuvent affecter la croissance des plantes et les propriétés des sols (Hazelton et Murphy, 2007).

1.2. Origines de la salinité

La salinisation primaire se produit naturellement à partir de la roche mère, ou bien en présence d'une nappe phréatique proche de la surface lorsque les précipitations sont insuffisantes pour lixivier les sels solubles du sol, et ou lorsque le drainage naturel est insuffisant (FAO, 2006).

La salinisation secondaire se produit par l'action anthropique à la suite de l'utilisation d'une eau d'irrigation chargée en sels, de l'utilisation intensive des produits de traitement des cultures ou des engrais minéraux (Slama, 2004).

1.3. Les sels solubles

Les sels solubles sont des sels plus solubles dans l'eau que le gypse. Les plus fréquents dans les sols des régions arides et semi- arides sont les chlorures et les sulfates de sodium, les sulfates de magnésium et à un moindre degré les carbonates de sodium (Halitim, 1988).

Les éléments chimiques qui constituent les sels solubles sont essentiellement Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Cl^- , SO_4^{--} , HCO_3^- , CO_3^{--} (Boivin et Le Brusq, 1985).

1.4. La dynamique des sels

Le transfert des sels concorde avec la dynamique de l'eau et les variations verticales et temporelles de la tension de l'eau, il résulte des termes du bilan hydrique (figure 1) (Majdoubet *al.*, 2012).

Le transfert des éléments chimiques en solution dans le sol se produit par convection et par diffusion.

La convection se produit lorsque les éléments dissous suivent le mouvement de l'eau, il s'agit d'un transfert de masse (Lahlou *et al.*, 2000). Dans un sol humide, lorsque la teneur en eau dépasse la capacité au champ, la convection est le mécanisme dominant pour le mouvement des sels dans le profil (Abbott et El Quosy, 1996).

La diffusion se produit lorsque les éléments dissous suivent dans la phase liquide le gradient de concentration, ce mécanisme est prédominant en l'absence de l'eau gravitaire lorsque la teneur en eau du sol est inférieure à la capacité au champ (Abbott et El Quosy, 1996).

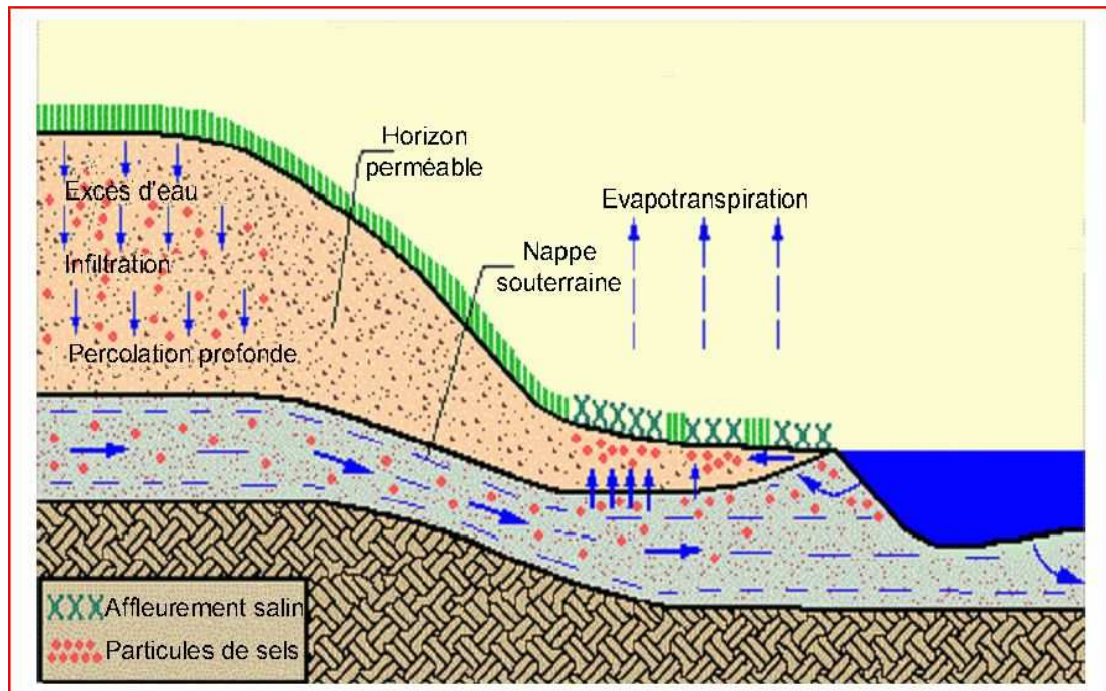


Figure 1. le cycle des sels dans le sol (Lahlou et al., 2000).

2. LES PARAMETRES ET LES METHODES DE CARACTERISATION DE LA SALINITE DU SOL

Les paramètres de caractérisation de la salinité du sol sont la conductivité électrique (CE, dS/m à 25°C), le taux de sodium échangeable (ESP en % de la CEC), le sodium adsorption ratio (SAR en $(\text{meq/l})^{1/2}$). La détermination de la conductivité électrique exprime la concentration totale en électrolytes de la solution du sol, elle ne donne pas d'indications sur la nature des ions en solution. La distribution des espèces en solution est obtenue par analyse chimique, elle est complétée par le calcul des réactions d'équilibre entre les espèces aqueuses et cristallisées et entre les espèces aqueuses elle-même (Girard et al., 2005).

2.1. La conductivité électrique

La mesure de la conductivité électrique permet d'estimer la concentration des sels solubles et donc de caractériser l'état de salinité du sol (USSL, 1954).

2.1.1. Les méthodes de mesure de la conductivité électrique au laboratoire

La méthode de la patte saturée qui est proposée par (USSL, 1954). Le principe de cette méthode consiste à ramener une prise d'essai de sol de 200 à 500 g à saturation par l'eau déminéralisée.

Après un repos de 12 à 24 heures, on extrait la solution du sol par centrifugation ou à l'aide d'une pompe à vide, la conductivité électrique est mesurée sur cette solution (Mathieu et Pieltain, 2003).

La méthode de l'extrait dilué correspond à un rapport entre la quantité de sol et la quantité d'eau nécessaire à la préparation de l'extrait. Plusieurs rapports sont utilisés, mais le rapport le plus utilisé est le rapport 1/5 (Montoroi, 1997).

Selon USSL (1954) (tableau I), Les sols sont considérés salés quand leur CE est supérieure à 4dS/m.

Tableau I. Classes de la salinité en fonction de la conductivité électrique USSL (1954).

<i>Classe de salinité</i>	<i>CE dS/m</i>
Non salé	<2
Peu salé	2-4
Moyennement salé	4-8
Salé	8-16
Très salé	>16

Pour les extraits aqueux 1/5 et 1/10, les classes de la salinité définies selon les valeurs de la conductivité électrique à 25 °C sont rapportées par Mathieu et Pieltain (2003) (tableau II).

Tableau II. Classes de la salinité en fonction de la conductivité électrique de l'extrait aqueux à 25 °C (Mathieu et Pieltain, 2003)

<i>CE dS/m à 25°C</i>	<i>< 0.6</i>	<i>0.6 – 1</i>	<i>1 – 2</i>	<i>2 - 3</i>	<i>3 - 4</i>	<i>> 4</i>
CE (extrait 1/5)	Non salé	peu salé	Salé	Très salé	Très salé	Extrêmement salé
CE (extrait 1/10)	Non salé à peu salé	Salé	Très salé	Extrêmement salé	Extrêmement salé	Extrêmement salé

Pour certains systèmes de classification des sols, les sols sont classés salés à partir d'une conductivité électrique de 8 dS/m ou de 15 dS/m (Référentielle pédologique, 2008 ; WRB, 2006).

2.1.2. Les autres méthodes de mesure de la salinité

Plusieurs autres méthodes de mesure de la salinité sont proposées :

-La mesure de la résistivité électrique : La résistivité électrique est égale à l'inverse de la conductivité. Elle caractérise la propriété de sol à conduire le courant du au déplacement des ions. Elle s'exprime en (ohm) (Bottraud *et al.*, 1985). La résistivité est mesurée par injection d'un courant électrique continu dans le sol par le biais d'électrodes d'injection, le courant électrique transmis est récupéré au niveau d'électrodes de réception (Goulet et Barbeau, 2004).

-La mesure de la conductivité électromagnétique : Une spire primaire, parcourue par un courant électrique de fréquence donnée, produit un champ magnétique primaire de même fréquence dans le sol, les courants induits dans les horizons produisent à leur tour un champ secondaire qui est mesuré à l'aide d'une spire secondaire (Job *et al.*, 1987). La mesure peut s'effectuer jusqu'à deux mètres de profondeur. C'est une mesure non destructrice, plus le sol est conducteur plus les courants induits dans les différents horizons sont importants (Boivin *et al.*, 1988).

-La mesure par télédétection : L'efflorescence saline est détectée directement suite à la réflectance des sels. La télédétection peut aussi être utilisée pour la détermination de la salinité par ses effets sur la structure (détection des pseudosables), la végétation (stress salin, végétation spécifique) ou l'absence de végétation dans les cas extrêmes (Mougenot, 1993). Douaouiet Lépinard (2010) ont montré une corrélation significative entre les valeurs de la salinité obtenues par télédétection avec celles obtenues par des mesures au laboratoire sur des échantillons des sols la plaine du Bas-Chellif.

2.2. Le taux de sodium échangeable

Le taux de sodium échangeable (ESP) est calculé par la formule suivante (USSL, 1954) :

$$ESP \% = (Na/CEC)*100$$

ESP = taux de sodium échangeable (exchangeable sodium percentage).

Na⁺ et CEC sont exprimés en Cmol(+) /Kg de terre.

Ce paramètre caractérise l'état de sodicité du complexe adsorbant du sol.

Selon la FAO (1984), la limite de classe pour le taux de sodium échangeable est donnée dans le (tableau III).

Tableau III. Les classes du taux de sodium échangeable (FAO, 1984).

Classe de sodicité	ESP%
sodicité légère	< 5
sodicité modérée	5 –20
sodicité grave	20 - 45
sodicité très grave	> 45

Pour certains systèmes de classification des sols, les sols sont considérés sodiques lorsque le taux de sodium échangeable est supérieur à 15 %(USSL ,1954 ; WRB, 2006 ; Référentielle pédologique, 2008).

2.3. Le sodium adsorption ratio

Le SAR (sodium adsorption ratio) est une caractéristique de la solution du sol. Il se calcule selon la formule suivante :

$$SAR = Na/\sqrt{(Ca + Mg)/2}$$

Na⁺, Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺ sont les concentrations de la solution du sol exprimées en meq/l.

Il existe une relation entre le taux de sodium échangeable (ESP) et le sodium adsorption ratio (SAR) (USSL, 1954) :

$$ESP = 100 (- 0,0126 + 0,01475 X SAR)/(1+ (- 0,0126 + 0,01475 X SAR))$$

Cette relation permet d'estimer le taux de sodium échangeable à partir du SAR de la solution du sol.

2.4. Le bilan salin

Le bilan salin correspond à la variation du stock salin (ΔMS) dans le sol au cours d'une période donnée. Il permet de caractériser à différentes échelles de temps et d'espace les processus qui conduisent à mobiliser les sels (Montoroi, 1996) :

$$MS = CD \cdot Hv \cdot V$$

MS : Stock de sel (g)

CD : charge dissoute de la solution du sol (g/l).

Hv : Humidité volumique.

V : volume de la solution.

Un bilan positif indiquera un apport en sels, un bilan négatif indiquera une perte en sels, et un bilan nul indiquera un équilibre entre les apports et les pertes (Girard *et al.*, 2005).

3. EVOLUTION DE LA SALINITE

3.1. Les voies de la salinisation

La détermination des voies de la salinisation est basée sur le concept d'alcalinité résiduelle calcite, qui est défini par Droubiet *al.*(1980) par le produit des activités en calcium et en carbonates qui doit rester constant dans la solution de sorte que si l'un diminue, l'autre augmente. Aussi quand l'eau s'évapore et que la solution devient saturée par rapport à la calcite, ce minéral précipite sous forme de $CaCO_3$. L'alcalinité résiduelle au moment de la précipitation de la calcite se calcule ainsi :

$$Alc-rés \cdot Calcite = Alcalinité-2Ca$$

D'après Marlet et Job (2006), on distingue deux voies de la salinisation (figure 2) :

-La voie neutre : Lorsque l'alcalinité résiduelle calcite est négative, l'alcalinité diminue et la molarité en calcium augmente. L'évolution du pH reste proche de la neutralité. Deux processus secondaire sont distingués :

-Si la molarité en sulfate augmente, on a une voie neutre de salinisation à dominante sulfatée.

-Si la molarité en sulfate diminue, on a une voie neutre de salinisation à dominante chlorurée.

-Lavoie alcaline : Lorsque l'alcalinité résiduelle calcite est positive, l'alcalinité augmente et la molarité en calcium diminue. Les carbonates jouent un rôle important qui se traduit par une augmentation du pH du sol.

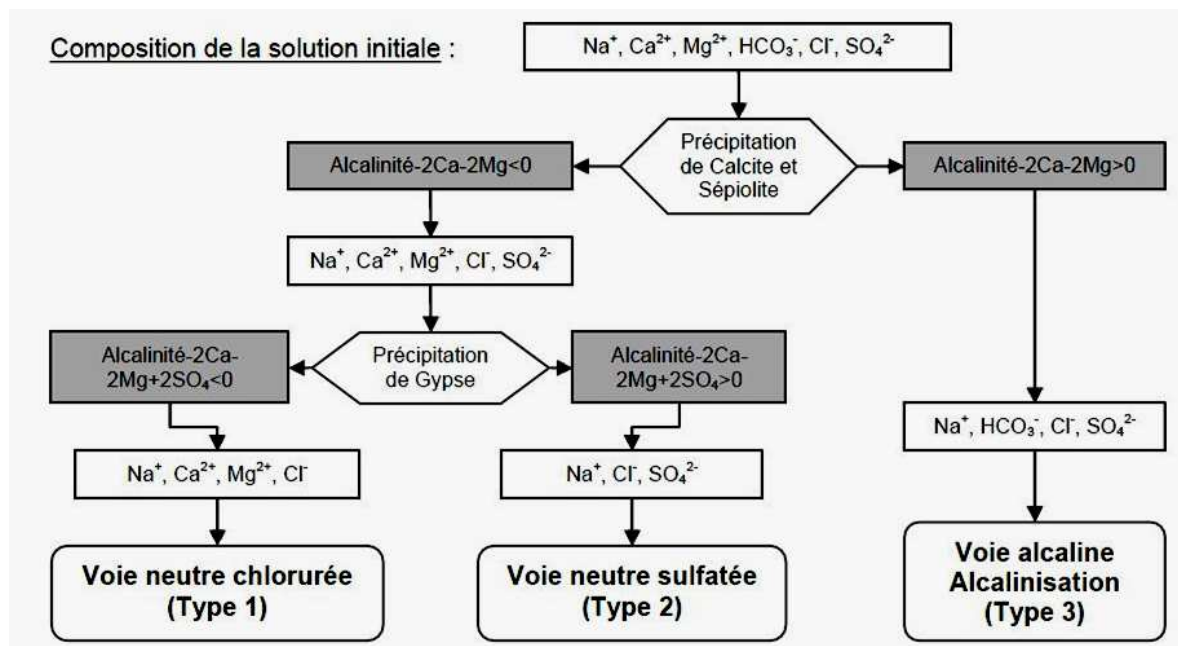


Figure 2. Les voies de la salinisation du sol (Marlet et Job, 2006).

3.2. Les profils salins

Les principaux profils salins sont, selon Servant (1976), de plusieurs types :

-Le profil de type A : Le gradient de salinité est orienté vers la surface, ou le maximum de salinité s'observe. Ce type de profildistribution ascendant s'observe à la suite d'une saison sèche qui provoque une évaporation et une concentration des sels dans la partie supérieure du sol. Il peut être favorisé également par la présence d'une nappe salée peu profonde (figure 3).

-Le profil de type B : Le maximum da salinité est localisé au niveau de la partie médiane du profil. Ce profil convexe résulte d'une phase de désalinisation des profils de type A (figure 3).

-Le profil de type C : Le maximum da salinité se localise au niveau de la partie supérieure et au niveau de la base du profil. Ce type de profil caractérise une phase de résalinisation des profils (figure 3).

-Le profil de type D : Le gradient de salinité est descendant. Le maximum de salinité se situe à la base du profil. Ce type de distribution est observé dans les sols qui présentent une bonne lixiviation des sels et une nappe profonde (figure 3).

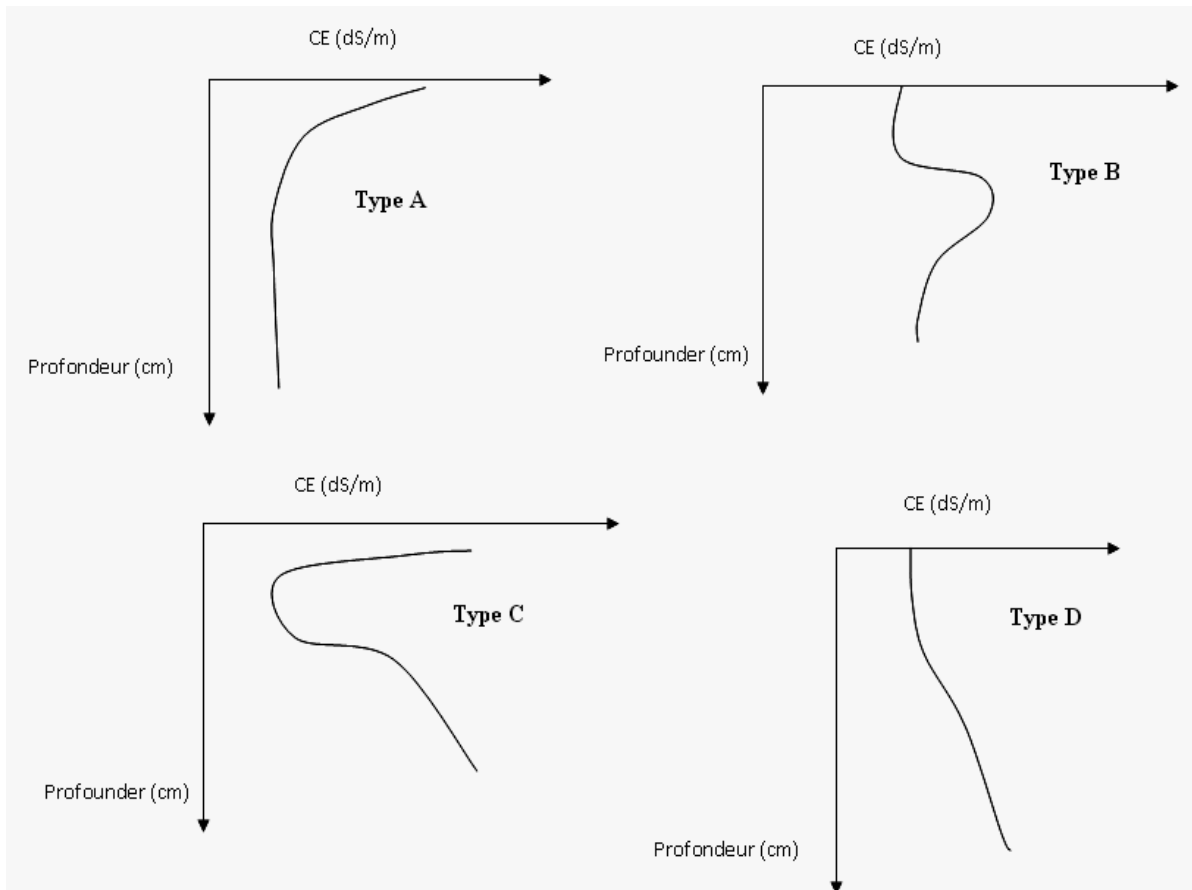


Figure 3. Les différents types de profils salins (Servant, 1976).

3.3. Evolution temporelle de la salinité

L'intensité de la salinisation varie au cours du temps. Daoud (1990) a montré que la salinité augmente avec l'irrigation dans les sols du Haut-Cheliff, en particulier au niveau de la base du profil (figure 4). Cette évolution de la salinité serait due à une irrigation sans drainage qui engendre un bilan salin positif dans le profil.

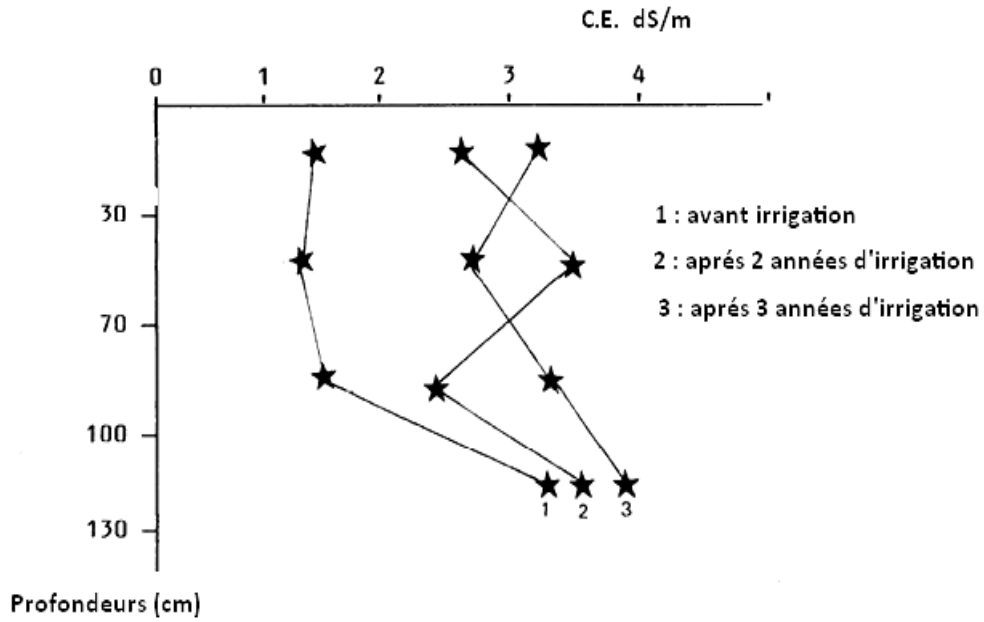


Figure 4. Évolution des profils salins en fonction du temps (Daoud, 1990).

Les travaux de Ziza (2006) réalisés sur des sols du Sahara montrent que la vitesse de salinisation des sols est variable en fonction du nombre d'années d'irrigation (tableau IV). En général, les parcelles irriguées pendant 2 et 3 années présentent une vitesse de salinisation relativement plus faible par rapport à la parcelle irriguée pendant 4 années.

Tableau IV. Vitesse de salinisation des sols dans l'horizon de surface (0-30 cm) (Ziza, 2006).

Parcelles et nombre d'années d'irrigation	CE (dS/m)	CE du témoin (dS/m)	Vitesse de salinisation (dS/m)/année
1 (2 ans)	5.51	2.55	1.5
2 (3 ans)	5.73	2.55	1.06
3 (4 ans)	11.7	2.55	2.3

Le travail de Hartaniet *al.* (2007) met en évidence l'évolution de la salinité des sols du Bas-Cheliff entre 1975 et 2006 (figure 5). Cette évolution est irrégulière selon les parcelles considérées et l'efficacité de leur réseau de drainage.

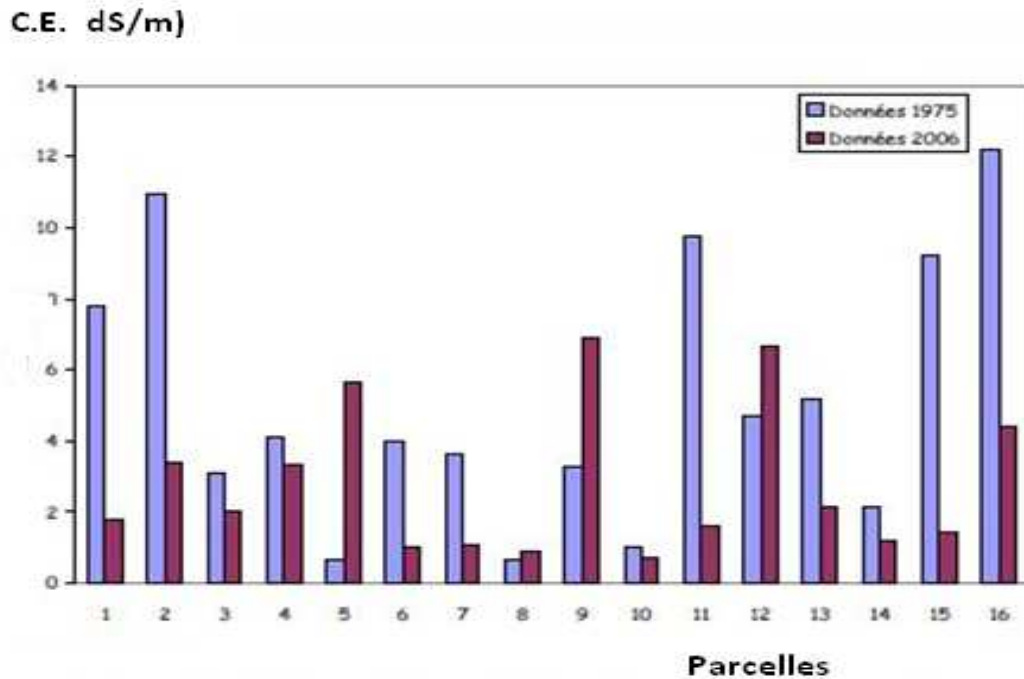


Figure 5. Evolution de la CE du sol du périmètre de Ouarizane entre 1975 et 2006 (Hartani et al., 2007).

Par ailleurs, De Zhou *et al.* (2010) montrent une diminution de la salinité des sols du fleuve jaune en Chine entre 1958 et 2007 (figure 6). Cette diminution de la salinité est provoquée par un aménagement et par l'installation du réseau de drainage.

Diminution du niveau de salinité par rapport à l'état initial (%)



Figure 6. Evolution de la salinité des sols du fleuve jaune entre 1958 et 2007 (De Zhou et al., 2010).

Le drainage permet aussi de contrôler le niveau de la nappe qui agit sur l'évolution de la salinité des sols (Ben Hassine, 2005). Hachichaet al. (1995) montrent qu'il existe une relation entre l'état de salinité de l'eau de la nappe et la salinisation du sol (figure 7).

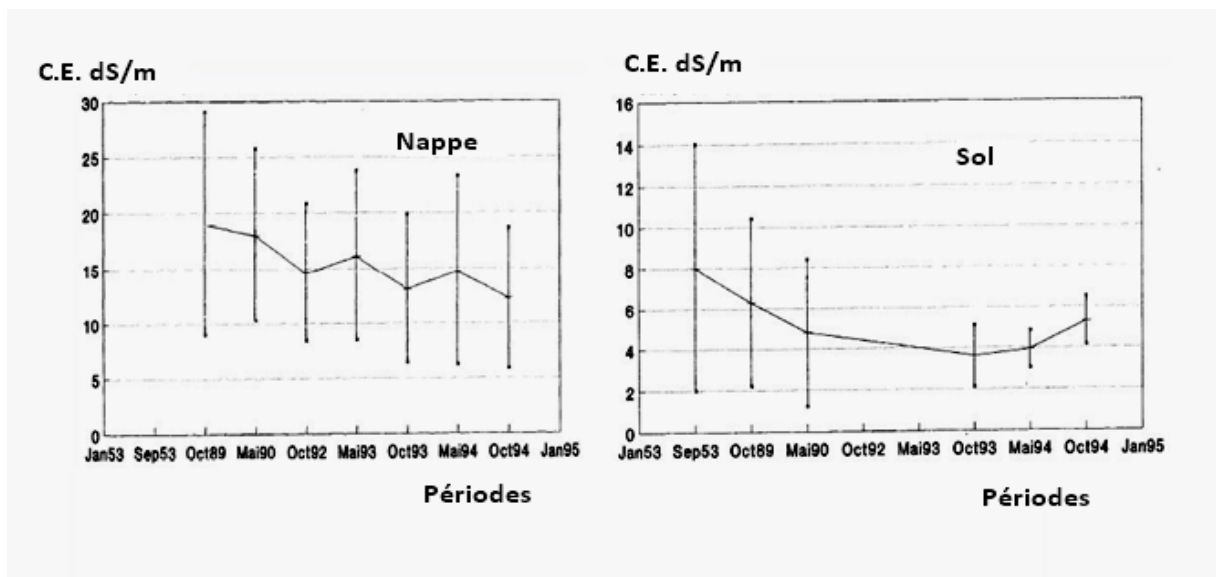


Figure 7. Evolution de la salinité de la nappe et du sol (Hachicha et al., 1995).

3.4. Evolution de la concentration ionique

L'évolution de la salinité entraîne une variation de la composition chimique de la solution du sol qui varie en fonction de la concentration. L'augmentation de la conductivité électrique engendre généralement une augmentation de la concentration en Na^+ et Cl^- (figure 8). Pour les autres ions Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^+ , SO_4^{-2} , HCO_3^- leur évolution n'est pas toujours proportionnelle à la conductivité électrique (Daoud, 1990).

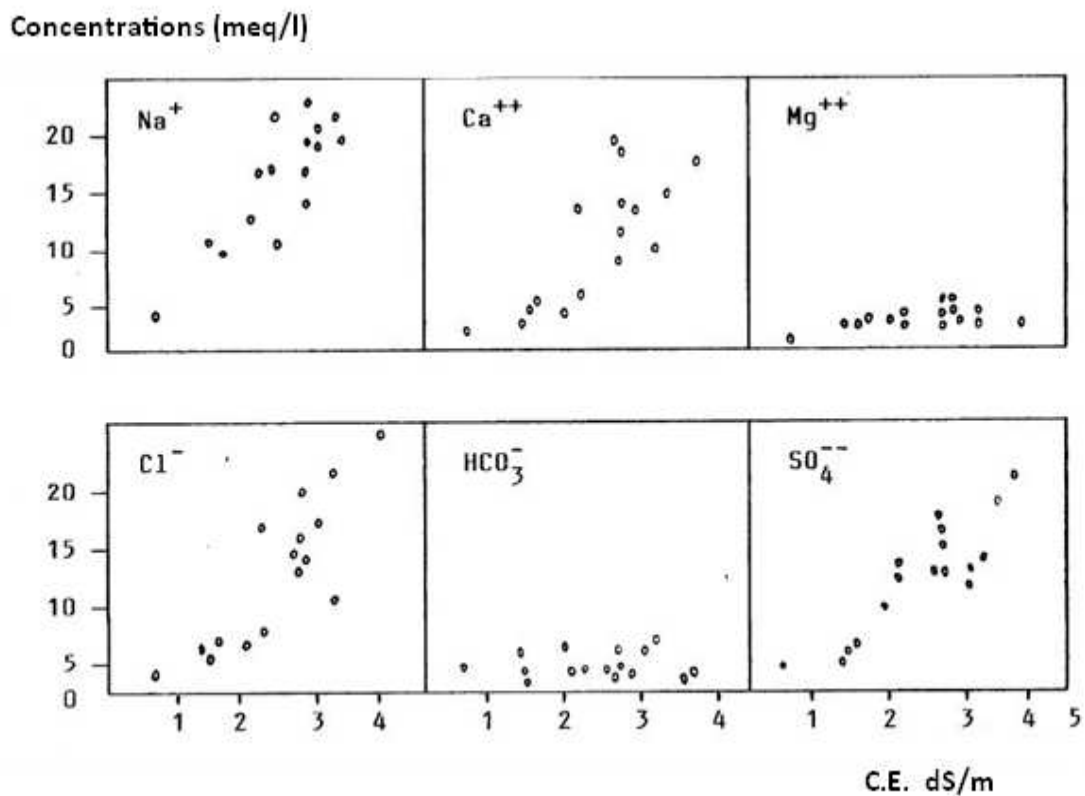


Figure 8. Evolution de la composition chimique de la solution du sol en fonction de sa concentration (Daoud, 1990).

Dans le même sens, Ziza (2006) a montré qu'en zone saharienne, une augmentation de la salinité engendre une augmentation de la concentration en chlore.

Nezliet *al.* (2007) ont montré une augmentation du rapport Cl/SO_4 en fonction du niveau de conductivité électrique sur l'eau de nappe (figure 9).

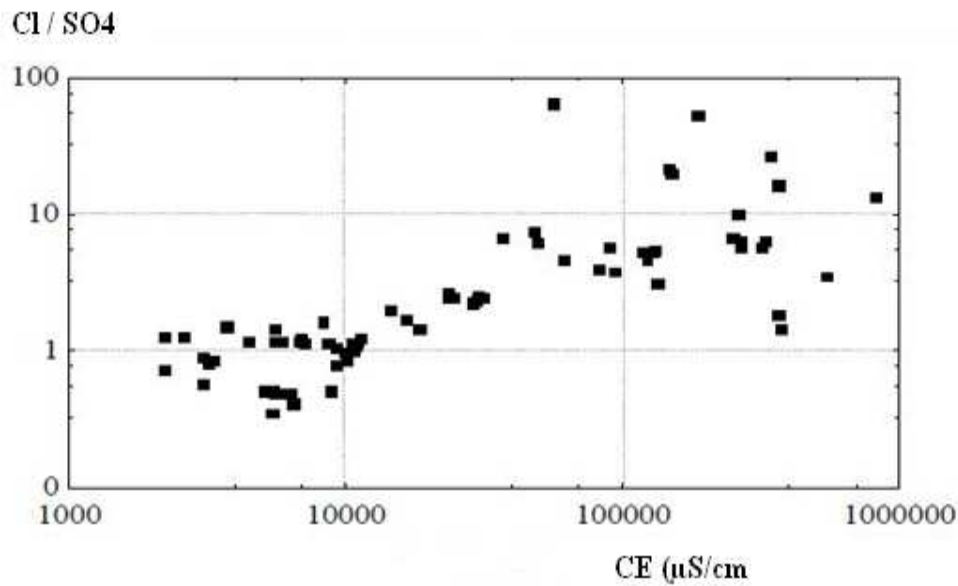


Figure 9. Evolution du rapport Chlorures/Sulfates en fonction de la conductivité électrique (Nezli et al., 2007).

4. EFFET DE LA SALINITE SUR LES PROPRIETES DU SOL

4.1. La structure du sol

L'augmentation du taux de sodium échangeable en présence d'un faible niveau de salinité entraîne une dégradation de la structure par une dispersion physico-chimique des agrégats (Daoud, 1993 ; Saidiet al., 2004 ; Ben Aissaet al., 2004). Cette dégradation structurale provoque une diminution du taux d'infiltration et de la conductivité hydraulique du sol (Salim et Tessier, 1998).

4.2. La rétention en eau

La concentration élevée en sels et la composante osmotique de la rétention en eau du sol, elle entraîne une augmentation considérable de la rétention en eau (Salim et Tessier, 1998).

4.3. L'activité biologique

Généralement la salinité entraîne une diminution du nombre de micro-organismes dans le sol, mais la sensibilité des micro-organismes à la salinité varie avec l'espèce. Les germes nitrifiants sont plus sensibles. Les champignons tolèrent mieux la salinité et la sodicité que les bactéries (Slama , 2004).

D' après Shah et Shah (2011), le carbone de la biomasse microbienne diminue lorsque la salinité augmente (figure 10), et le rapport C/N augmente avec l'augmentation de la salinité (figure 11).

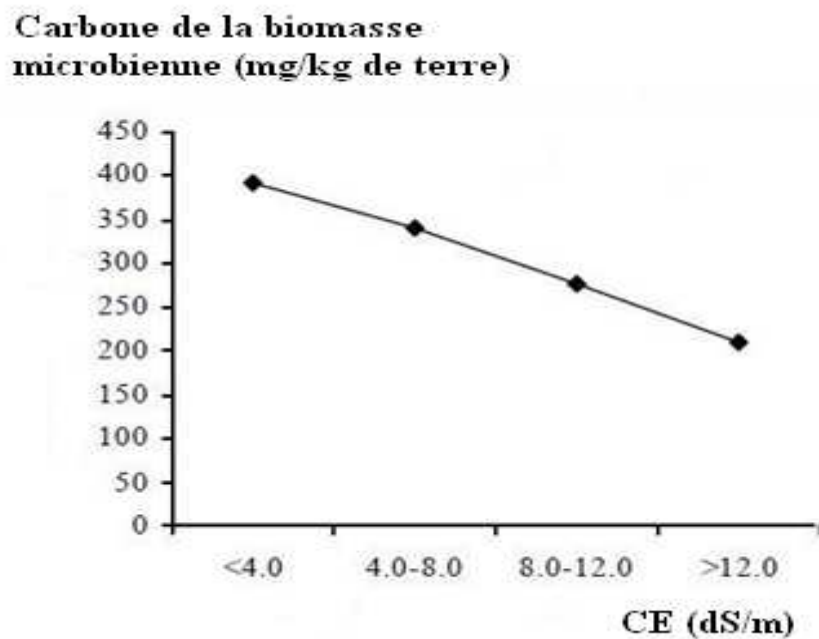


Figure 10. Evolution du carbone de la biomasse microbinne en fonction de la CE (Shah et Shah, 2011)

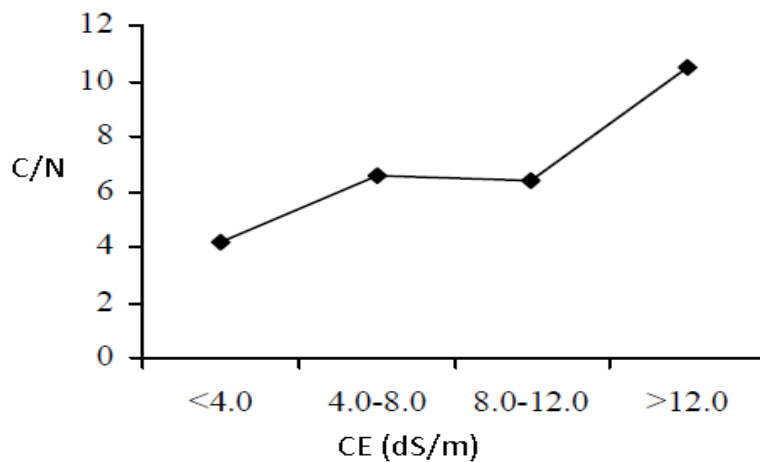


Figure 11. Evolution du rapport C/N en fonction de la CE (Shah et Shah, 2011)

5. LA CLASSIFICATION DES SOLS SALES

Les critères de classification des sols salés varient en fonction des systèmes de classification.

5.1. La classification selon le référentiel pédologique (2008)

Pour les sols dont les propriétés sont affectées par la présence de sels solubles, ce référentiel distingue les groupes de référence suivants :

-Salisols : Ils sont caractérisés par la présence d'un horizon salique débutant à moins de 60 cm de profondeur. La présence des sels solubles en quantité suffisante entraîne obligatoirement dans ce même horizon un transfert de sodium sur le complexe adsorbant, mais la structure n'est pas dégradée.

-Sodisols : Ils sont caractérisés par la présence d'un horizon sodique, apparaissant à moins de 60 cm de profondeur, et par l'absence quasi totale des sels solubles, en présence desquels la structure se maintiendrait stable. Selon la garniture cationique du complexe d'échange, on peut différencier des sodisols sodiques et des sodisols magnésiens.

-Thiosols : Ils sont définis par la présence d'un matériau thionique débutant à moins de 50 cm de profondeur. Les caractères diagnostiques pour l'ensemble du sol sont la présence de soufre élémentaire et de sulfates de fer, avec une teneur en soufre total > 0,75 %, le pH diminue et peut atteindre des valeurs < 3,5 après séchage. La consistance est fluide à très plastique, le solum est sans structure parce qu'il est toujours inondé.

-Sulfatosols : Ils sont caractérisés par la présence d'un horizon sulfaté débutant à moins de 50 cm de profondeur. Un matériau sulfidique existe immédiatement sous l'horizon U.

5.2. Le système de la WRB (2006)

Ce système répertorie les sols salés dans deux groupes de sols de référence :

-Les *Solonchaks* : ce sont des sols qui ont une concentration élevée en sels solubles à un moment donné dans l'année. Ils sont en grande partie confinés aux zones arides et semi-arides et aux régions côtières dans tous les climats.

-Les *Solonetz* : ce sont des sols qui renferment une proportion élevée d'ions adsorbés de Na^+ et/ou de Mg^{++} , ils peuvent contenir du Na_2CO_3 , ils sont fortement alcalins ($\text{pH} > 8.5$).

6. LES SOLS SALES EN ALGERIE

Les sols salés en Algérie se trouvent essentiellement à l'Ouest du pays (Mina, Cheliff, Habra, Sig, Maghnia), dans les hautes plaines de l'Est (Constantine, Sétif, Bordj Bou Arreridj, Oum El Bouagui), aux abords des Chotts et de Sebkhass (Chott Ech Chergui, Chott Gharbi, Chott El Hodna, Chott Melghir, Sebkhass d'Oran, Chott de Benziane, Chott Zemmoul, Chott Zazhrez Gharbi et Chergui), et dans le grand Sud (dans les Oasis, le long des oueds) (INSID, 2008).

Les eaux d'irrigation en régions arides du Maghreb sont de qualité médiocre, riches en chlorures mais aussi en sulfates (Halitim, 2011).

Selon la carte des sols de la FAO (2005), les sols salés d'Algérie sont essentiellement des Solonchaks et ils sont préférentiellement localisés dans les bioclimats arides et semi-arides (figure 12).

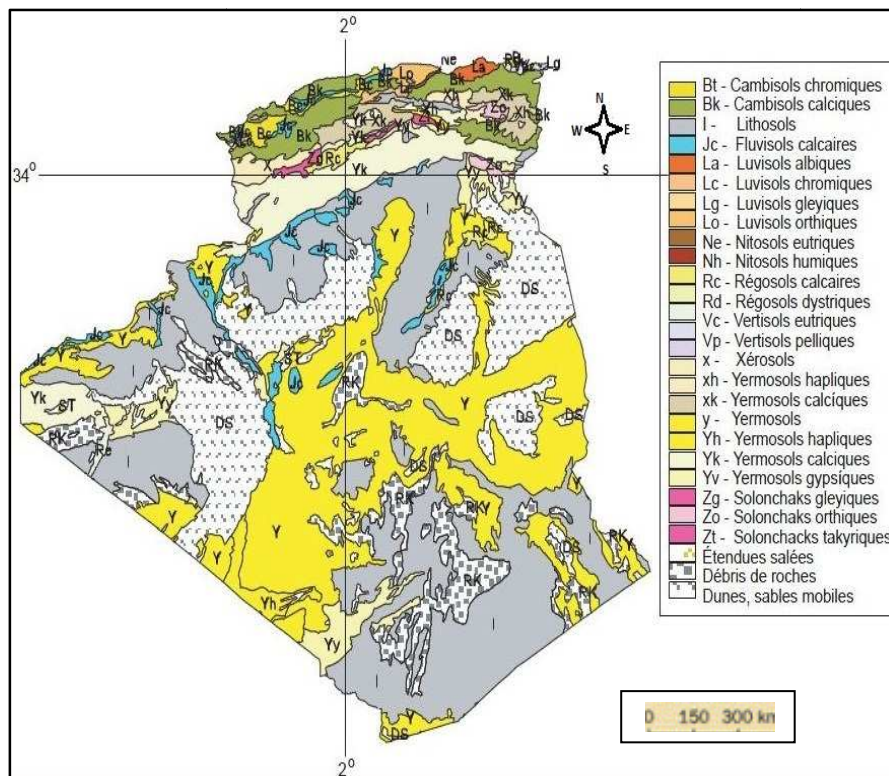


Figure 12. Les différents types de sols en Algérie (FAO, 2005).

Touaf (2002) montre que la conductivité électrique des sols du Nord de l'Algérie varie entre 0.1 et 99 dS/m, avec une valeur moyenne de 4.4 dS/m. 50% des horizons ont une conductivité électrique égale à 1.4 dS/m, mais il existe une grande variabilité de la salinité puisque le coefficient de variation est très élevé (Tableau V). D'après Touaf (2002), 24.50% des horizons sont salés, la salinité augmente généralement avec la profondeur, Les sols les plus salés sont essentiellement localisés dans les étages climatiques arides et semi arides.

Tableau V. Les paramètres statistiques élémentaires de la CE des sols du Nord de l'Algérie (Touaf, 2002).

Les paramètres	Les valeurs
Nombre d'horizons	2081
CE minimum	0.1
CE maximum	99
Moyenne	4.4
Médiane	1.4
Ecart type	8.98
C V %	204.09

Par ailleurs, Touaf (2002) montre que les taux de sodium échangeable des sols du Nord de l'Algérie varient entre 0.2 et 57.81%, la valeur moyenne étant de 8.5%. 50% des horizons ont un taux de sodium échangeable égal à 5.88%, mais il existe une forte variabilité du taux de sodium échangeable dans ces sols (100.81%) (tableau VI). D'après Touaf(2002), 13.27% des horizons sont sodiques, et la sodicité augmente généralement en profondeur. Les valeurs élevées de la sodicité sont observées dans les étages climatiques arides et semi arides.

Tableau VI. Les paramètres statistiques élémentaires du taux de sodium échangeable des sols du Nord de l'Algérie (Touaf, 2002)

Les paramètres	Les valeurs
Nombre d'horizons	1856
ESP minimum	0.28
ESP maximum	57.81
Moyenne	8.56
Médiane	5.88
Ecart type	8.63
C V %	100.81

7. LES SOLS SALES DE LA PLAINE DU BAS- CHELIFF

La salinité des sols du Bas-Cheliff a pour origine une salinité primaire liée à la nature des alluvions relativement riches en sels solubles, et une salinité secondaire liée à la qualité des eaux d'irrigation et à la profondeur de la nappe. Cette salinisation est souvent accompagnée par une sodisation du complexe adsorbant et une absence d'alcalinisation ($\text{pH} < 8,5$). Il s'agit d'une voie de salinisation neutre (Douaoui, 2005).

La qualité des eaux d'irrigation est médiocre, ces eaux contiennent environ 1.5 g/l pour les eaux de surface (INSID, 2008).

Les eaux souterraines de la plaine du Bas-Chéiff ont une salinité élevée. Elles sont classées dans le diagramme de l'USSL (1954) en C3S1 (18,4 %), C5S3 et C5S4 (12,2 %) qui indiquent des risques élevés de salinisation et de sodisation des sols. L'évolution chimique de ces eaux sous l'effet d'une évaporation a montré qu'une bonne partie est susceptible de précipiter la calcite et la sépiolite (Bradai *et al.*, 2011). Les niveaux de salinité rencontrés dans les nappes sont souvent supérieurs à 5dS/m (INSID, 2008).

La carte de la salinité des sols établie par Douaoui (2005) a montré que les superficies dont la salinité est supérieure à 25 dS/m, sont localisées essentiellement dans la partie Ouest de la plaine. D'un autre côté, les superficies ayant une salinité inférieure à 4 dS/m n'apparaissent pratiquement qu'au niveau du plateau de Benziane et de la colline de partage. Par ailleurs, les sols qui se trouvent de part et d'autre de l'oued Chlef appartiennent à la classe de salinité comprise entre 4 et 8 dS/m suivie par la classe 8-16 dS/m (figure 13).

Plus généralement, cet auteur montre que les sols non salés ($\text{CE} < 4 \text{ dS/m}$) représentent 16 % de la superficie totale, les sols moyennement salés ($4 < \text{CE} < 8 \text{ dS/m}$) représentent 22 %, les sols salés ($8 < \text{CE} < 16 \text{ dS/m}$) représentent 30 %, et les sols très salés ($\text{CE} > 16 \text{ dS/m}$) occupent 32 % de la surface totale.

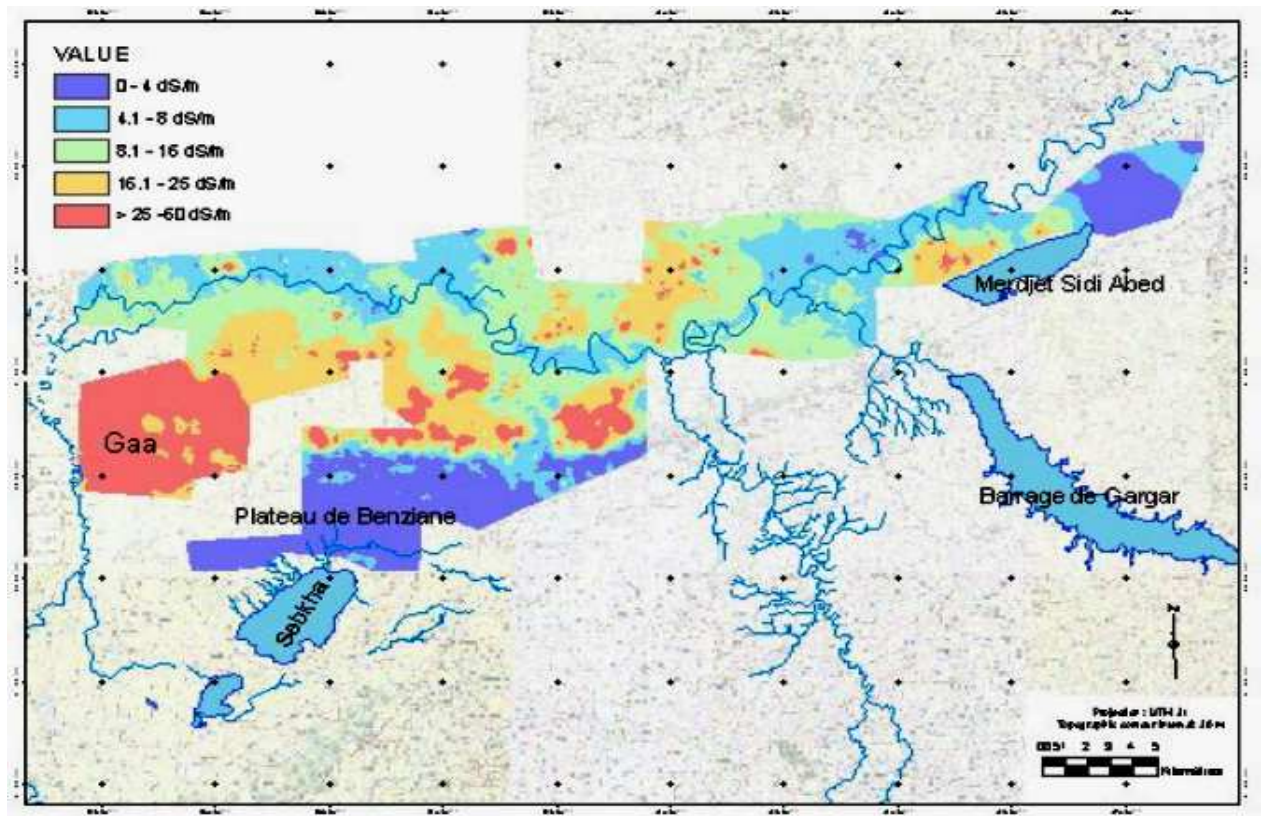


Figure 13. Carte de la salinité estimée par Krigeage(Douaoui, 2005).

D'après Laoufi (2010), le faciès chimique dominant dans les sols salés des plaines du Cheliff est de type chloruré sodique, et à un degré, moindre le faciès chloruré calcique et sulfaté sodique. Les tests de saturation vis-à-vis des minéraux montrent que les solutions sont sursaturées vis-à-vis de l'hydromagnésite, la dolomite, la calcite et la magnésite.

CONCLUSION

L'accumulation des sels plus solubles que le gypse entraîne une salinisation du sol. Cette salinisation est caractérisée par plusieurs paramètres dont les plus pertinents sont la conductivité électrique et le taux de sodium échangeable.

L'évolution de la salinité est variable dans l'espace et dans le temps.

En Algérie, les sols salés sont localisés essentiellement dans les étages bioclimatiques arides et semi- arides.

CHAPITRE II. MATERIEL ET METHODES

1. MATERIEL D'ETUDE

1.1. La zone d'étude

Ce travail est réalisé sur des échantillons provenant des sols du périmètre de Hmadena situé dans la plaine du Bas Chélif (figure 14). Cette plaine du Bas-Chélif fait partie de la vallée de l'oued Chélif qui est située dans la partie Nord-Ouest de l'Algérie. Son extension couvre environ 50 km de longueur sur une largeur variant de 6 km à l'Est à plus de 20 km à l'Ouest. Cette plaine est relativement plate, elle se trouve à une altitude moyenne de 70 m, et elle couvre une superficie de l'ordre de 65 000 ha. La plaine du Bas-Chélif comporte plusieurs périmètres irrigués, dont les plus importants sont le périmètre de l'oued Rhiou, le périmètre Ouarizane, le périmètre Djédouia, le périmètre Hmadena et le périmètre Guerouaou (Douaoui, 2005).

La parcelle étudiée est localisée dans le périmètre de Hmadena qui est situé dans la partie occidentale de la plaine. Ce périmètre a une superficie d'environ de 250ha, et pour l'essentiel il fait partie de la station de recherche de l'INRA (figure 18) (Durand, 1956).

Le régime thermique de la région est caractérisé par des températures élevées en été et relativement basses en hiver. Le tableau VII montre que les températures les plus élevées sont enregistrées durant les mois de juillet et août. Les basses températures se manifestent au mois de janvier.

Les précipitations mensuelles montrent que le mois de novembre est le plus pluvieux. La période estivale s'étalant entre juin et août, c'est la période la moins pluvieuse de l'année. La plus faible pluviosité est enregistrée durant le mois de juillet.

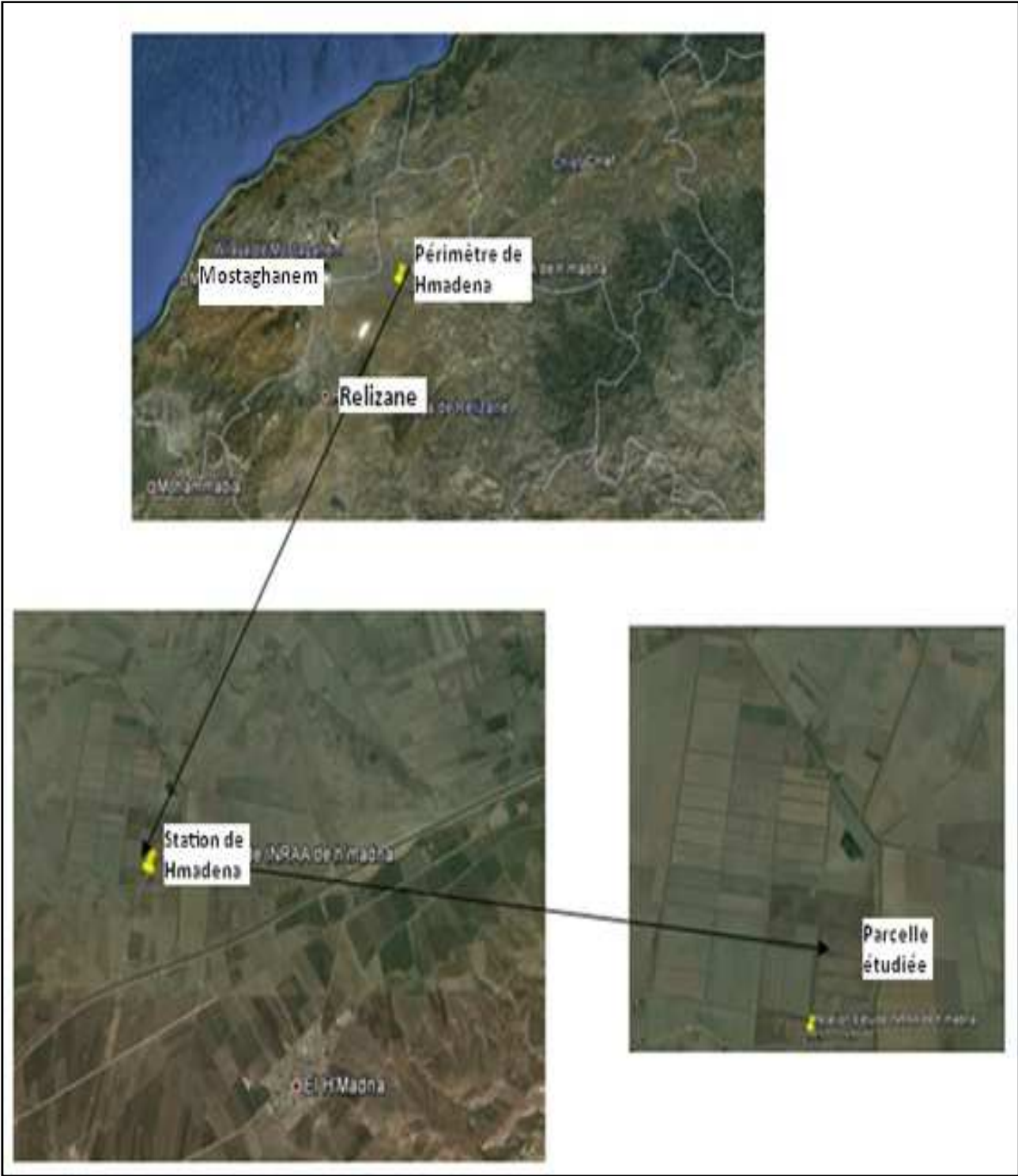


Figure 14. Présentation de la zone d'étude (image Google earth).

Tableau VII. Moyennes des températures et des précipitations de la station de Hmadena Pour la période 1985-2004.

Mois	Période 1985/2004	
	Tm (°C)	P (mm)
Janvier	10.56	39.45
Février	11.69	32.58
Mars	14.48	27.92
Avril	16.66	29.12
Mai	21.20	21.53
Juin	25.78	5.15
Juillet	29.10	1.33
Août	29.94	2.89
Septembre	25.28	16.11
Octobre	20.68	31.26
Novembre	14.57	51.03
Décembre	11.65	29.77
<i>Total</i>		288.15
<i>Moyenne</i>	19.30	

Le diagramme ombrothermique de la station climatique de Hmadenamontre que la période sèche s'étale sur 8 mois, soit du mois de mars au mois d'octobre (figure 15).

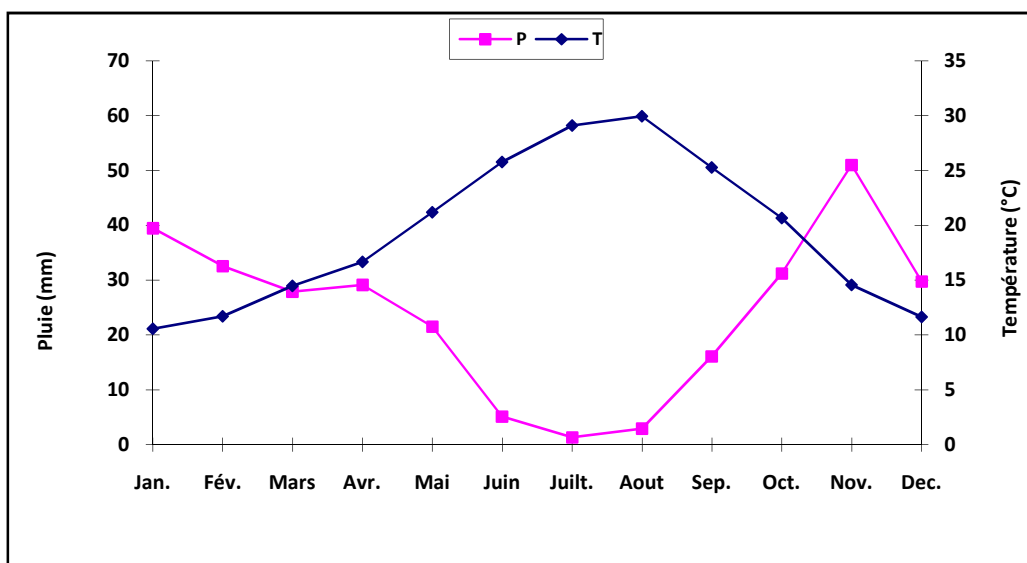


Figure 15. Le diagramme ombrothermique de la station climatique de Hmadena (1985-2004).

Les sols de la plaine du bas-Cheliff comportent cinq classes : les sols salés, les sols hydromorphes, les vertisols, les sols peu évolués, et les sols calcimagnésiques (Douaoui, 2005).

Les sols du périmètre de Hmadena sont considérés comme des sols salés, soit des solontchaks et des solonetz selon Durand (1956) (figure16).

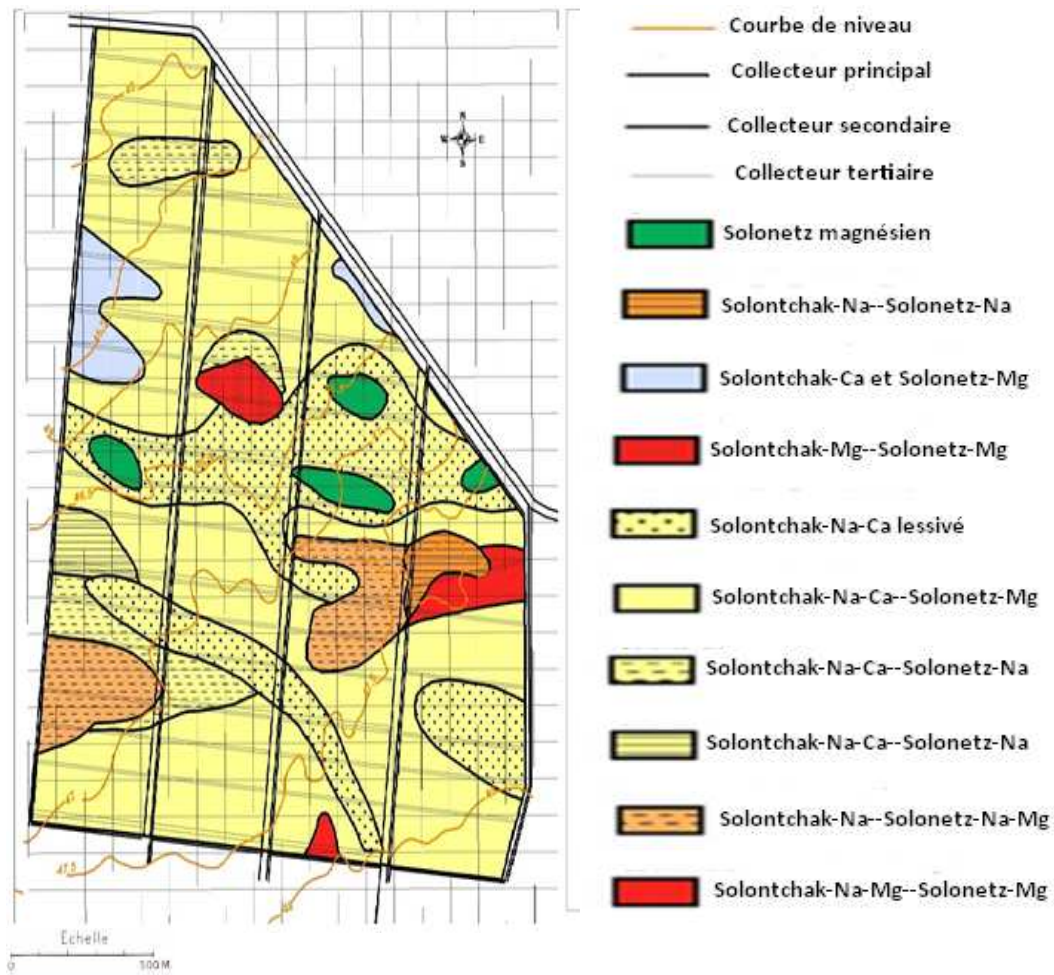


Figure 16. Carte des sols de la station de Hmadena (Durand, 1956).

Douaoui (2005) a montré que la texture argileuse est dominante dans les sols de la plaine du Bas-Cheliff. Le tableau VIII montre que la majorité des horizons présentent des taux

d'argile supérieurs à 40%, et que les horizons de surface sont relativement plus argileux que les horizons profonds.

Tableau VIII. Répartition de l'effectif des horizons en fonction des classes de teneurs en argile, limon et sable (Douaoui, 2005).

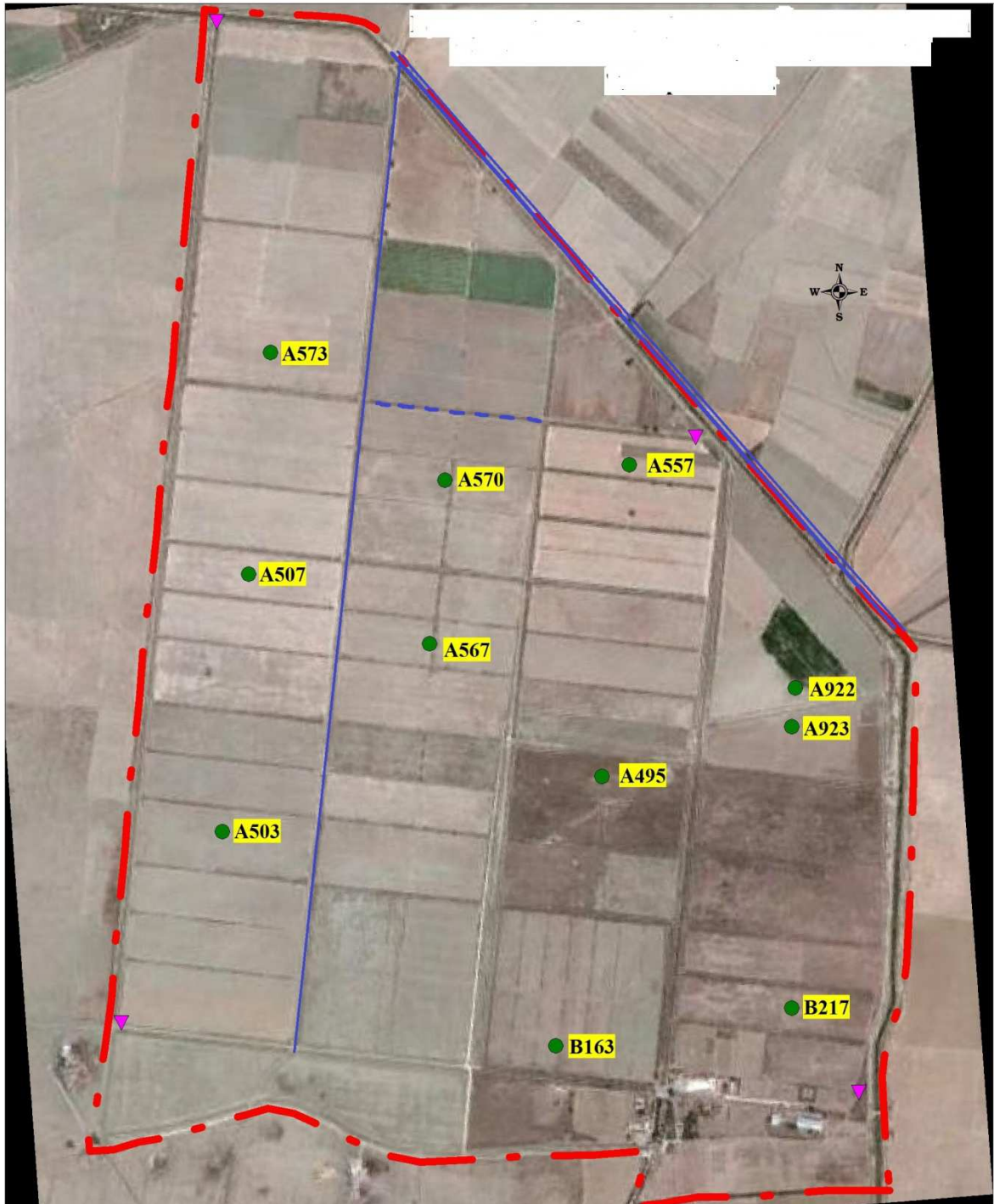
Classes des teneurs en argile (%)	H1	H2	H3	H4
≤ 20	8	9	20	17
20-30	10	12	14	9
30-40	16	19	20	20
40-55	48	39	33	31
>55	18	21	13	23
Classes des teneurs en limon (%)	H1	H2	H3	H4
≤ 40	46	48	33	65
40-50	31	30	28	26
50-60	21	18	28	9
>60	2	4	11	0
Classes des teneurs en sable (%)	H1	H2	H3	H4
≤10	53	55	62	43
10-30	30	24	19	30
30-80	15	18	17	25
>80	2	3	2	2

1.2. Les profils étudiés

Les 11 profils qui font l'objet de ce travail sont ceux étudiés par Durand (1956). Ils sont repérés après le calage de la carte des sols de Durand (1956) et le plan de situation des profils sur Mapinfo en utilisant une projection Universal Transverse Mercator (WGS 84) (figure 17). La carte de localisation actualisée est présentée sur la figure 18.



Figure 17. Carte de localisation des profils de la station de Hmadena (Durand, 1956).



Légende

Echelle d'étude 1/10.000

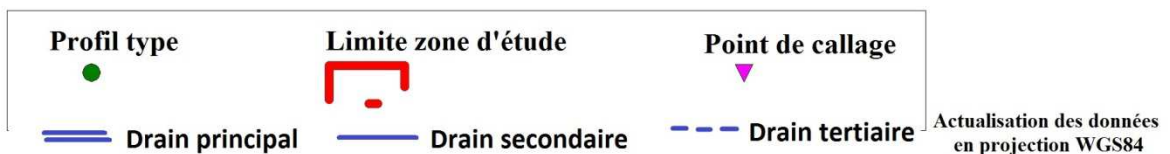


Figure 18. Carte actualisée de localisation des profils de la station de Hmadena

Les profils A503, A507, A573, A570, A567, A557, B217 sont localisés dans une zone cultivée en orge. Les A495, A922, A923, B163 sont localisés dans une zone mise en jachère.

Le réseau d'irrigation existant se compose d'un canal adducteur qui prend naissance de barrage Boukadir dans la wilaya de Chlef. Le réseau de drainage dans le périmètre de Hmadena est composé de 2 types de systèmes de drainage. Un ancien système de drainage à ciel ouvert installé à l'époque colonial et un nouveau système de drainage souterrain installé en 2001 (figure 18) (INRA, 2011).

Sur les 11 profils étudiés, 53 échantillons ont été prélevés au mois d'avril 2012 avec une tarière, selon les profondeurs des horizons indiqués par Durand (1956). Les échantillons sont analysés pour tenter de cerner déterminer le sens d'évolution de leur état de salinité entre 1956 et 2012. Les coordonnées des profils sont présentées dans le tableau IX.

Tableau IX. Les profils étudiés de la station de Hmadena

Profil	Code du profil selon Durand (1956)	Horizons	Profondeurs
495	A495	1	0-20cm
495	A495	2	20-40cm
495	A495	3	40-80cm
495	A495	4	80-100cm
495	A495	5	100-108cm
503	A503	1	0-25cm
503	A503	2	25-75cm
503	A503	3	75-85cm
503	A503	4	85-93cm
503	A503	5	93-100cm
503	A503	6	100-115cm
507	A507	1	0-30cm
507	A507	2	30-50cm
507	A507	3	50-105cm
507	A507	4	105-145cm
557	A557	1	0-30cm
557	A557	2	30-65cm
557	A557	3	65-75cm
557	A557	4	75-90cm
557	A557	5	90-100cm
567	A567	1	0-25cm
567	A567	2	25-65cm
567	A567	3	65-90cm
567	A567	4	90-115cm
567	A567	5	115-120cm
570	A570	1	0-30cm
570	A570	2	30-70cm
570	A570	3	70-80cm
570	A570	4	80-110cm
570	A570	5	110-130cm
573	A573	1	0-20cm
573	A573	2	20-35cm
573	A573	3	35-65cm
573	A573	4	65-72cm
573	A573	5	72-95cm
573	A573	6	>95cm
922	A922	1	0-2cm
922	A922	2	2-40cm
922	A922	3	40-80cm
922	A922	4	80-110cm
922	A922	5	>110cm
923	A923	1	0-10cm
923	A923	2	10-50cm
923	A923	3	50-115cm
923	A923	4	>115cm
163	B163	1	0-10cm
163	B163	2	10-50cm
163	B163	3	50-120cm
163	B163	4	120-200cm
217	B217	1	0-25cm
217	B217	2	25-52cm
217	B217	3	52-76cm
217	B217	4	76-110cm

2. METHODES D'ETUDE

2.1. Analyses du sol

Les échantillons de sol prélevés sont d'abord séchés à l'air libre puis tamisés à 2 mm. Pour l'obtention de la solution du sol, nous avons utilisé l'extrait de pâte saturée correspondant à la méthode de référence l'USSL (1954).

Les analyses suivantes sont réalisées sur la solution du sol selon les méthodes préconisées par l'USSL (1954):

- La conductivité électrique : par conductivimétrie électrique.
- Le pH : mesure potentiométrique au pH-mètre.
- Les sulfates : méthode gravimétrique par précipitation au chlorure de baryum.
- Les carbonates et les bicarbonates : méthode volumétrique à l'aide de l'acide sulfurique.
- Les chlorures : méthode volumétrique au nitrate d'argent.
- Le sodium : par spectrophotométrie à flamme d'émission atomique.
- le potassium, le calcium et le magnésium : par photométrie d'absorption atomique.

2.2. Approche géochimiques

2.2.1. Les faciès chimiques

Le recours à des diagrammes et graphiques divers est très utile en géochimie, pour visualiser des caractéristiques importantes d'un échantillon ou même d'un groupe de solutions. Plusieurs logiciels permettant de représenter ces différents diagrammes. Parmi ces logiciels, Le logiciel diagrammes de Simler (2012) permet de réaliser :

- diagramme de Piper, Stiff, Schoeller-Berkalov, Korjinski, Riverside et Wilcox, Stabler, ternaire
- Statistiques (fréquences, matrice de corrélation), calcul de balance ionique
- Simulation de neutralisation, datation ^{14}C , relation ^{18}O et deutérium

- transfert vers PHREEQ d'une partie ou de l'ensemble des données avec récupération des résultats

Le diagramme de Piper qui est utilisé dans notre étude, permet de représenter le faciès chimique d'un ensemble d'échantillons des solutions de sol. Il est composé de deux triangles permettant de représenter le faciès cationique et le faciès anionique, à la base des proportions des cations et des anions présents dans la solution du sol.

2.2.2. Calculs géochimiques

Les calculs géochimiques permettent l'étude de l'évolution de la composition chimique des solutions des sols en fonction de leur concentration, et la réalisation des tests de saturation vis-à-vis des minéraux susceptibles de se former, et enfin le calcul des alcalinités résiduelles.

Les calculs géochimiques sont réalisés à l'aide du programme *Active* (Montoroi et Rieu, 1987). Il a pour objectif de calculer l'activité des ions dans une solution aqueuse dont la force ionique n'excède pas 0.1.

2.2.2.1. Les éléments du calcul

Le programme utilise les données analytiques des concentrations des éléments en solution suivants :

K^+ , Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Cl^- , SO_4^{--} et du pH.

Le programme détermine la molalité et l'activité des 18 espèces suivantes :

CO_2 , $H_2CO_3^o$, HCO_3^- , CO_3^{--} , H^+ , OH^- , K^+ , Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Cl^- , SO_4^{--} , $CaHCO_3^+$, $MgHCO_3^+$, $CaCO_3^o$, $CaSO_4^o$, $MgCO_3^o$, $MgSO_4^o$.

- Les équations d'équilibres

$$[H_2CO_3^o] / pCO_2 = K_0 = 10^{-1.46}$$

$$[H_3O^+]. [HCO_3^-] / [H_2CO_3] = 10^{-6.35} = K_1$$

$$[H_3O^+]. [CO_3^{--}] / [HCO_3^-] = 10^{-10.32} = K_2$$

$$[\text{H}_3\text{O}^+]. [\text{OH}^-] = K_w = 10^{-14}$$

$$[\text{Ca}^{++}]. [\text{CO}_3^{--}] / [\text{CaCO}_3^\circ] = 10^{-3.20} = K_4$$

$$[\text{Ca}^{++}]. [\text{SO}_4^{--}] / [\text{CaSO}_4^\circ] = 10^{-2.31} = K_5$$

$$[\text{Ca}^{++}]. [\text{HCO}_3^-] / [\text{CaHCO}_3^+] = 10^{-1.27} = K_8$$

$$[\text{Mg}^{++}]. [\text{CO}_3^{--}] / [\text{MgCO}_3^\circ] = 10^{-3.40} = K_6$$

$$[\text{Mg}^{++}]. [\text{SO}_4^{--}] / [\text{MgSO}_4^\circ] = 10^{-2.25} = K_7$$

$$[\text{Mg}^{++}]. [\text{HCO}_3^-] / [\text{MgHCO}_3^+] = 10^{-0.9} = K_9$$

- Les équations de conservation de masse

$$K_t = K^+$$

$$\text{Na}_t = \text{Na}^+$$

$$\text{Cl}_t = \text{Cl}^-$$

$$\text{Ca}_t = \text{Ca}^{++} + \text{CaCO}_3^\circ + \text{CaSO}_4^\circ + \text{CaHCO}_3^+$$

$$\text{Mg}_t = \text{Mg}^{++} + \text{MgCO}_3^\circ + \text{MgSO}_4^\circ + \text{MgHCO}_3^+$$

$$\text{SO}_{4t} = \text{SO}_4^{--} + \text{CaSO}_4^\circ + \text{MgSO}_4^\circ$$

- L'équation d'électroneutralité

$$2(\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++} - \text{SO}_4^{--} - \text{CO}_3^{--}) + \text{K}^+ + \text{Na}^+ + \text{H}^+ + \text{CaHCO}_3^+ + \text{MgHCO}_3^+ - \text{HCO}_3^- -$$

$$\text{OH}^- - \text{Cl}^- = 0.$$

2.2.2.2. Organisation du calcul

L'activité des ions libres est calculée à partir de la concentration des ions libres multipliées par leur coefficient d'activité. Le calcul du coefficient d'activité nécessite la force ionique, le calcul de la force ionique demande la connaissance préalable des concentrations de toutes les espèces chargées, or ces concentrations ne peuvent être déterminées qu'à la suite du calcul de la distribution des espèces totales en paires d'ions et ions libres qui à leur tour nécessite la connaissance des coefficients d'activités.

Avec un pH connu, le calcul est initialisé avec une $p\text{CO}_2$ arbitraire $10^{-3.5}$. Les activités des espèces carbonatées sont déduites à partir du pH. À chaque itération sur le pH, le programme calcule les concentrations des paires d'ions et des ions simples, la force de la solution, et les coefficients d'activité des ions en solution.

La condition initiale nécessaire au traitement des données introduites est que la somme $\text{K}^+ + \text{Na}^+ + \text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ soit supérieure à la somme $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{--}$. En effet, le programme calcule la concentration en HCO_3^- et en CO_3^- à partir de la valeur du pH et de la $p\text{CO}_2$. Cette condition permet par la suite de valider l'exigence de la loi de l'électroneutralité de la solution.

CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSION

1. LES PARAMETRES DE CARACTERISATION DE LA SOLUTION DES SOLS

1.1. La conductivité électrique

Les résultats obtenus montrent une variation de la conductivité électrique d'un profil à un autre et d'un horizon à un autre (tableau X). Les valeurs obtenues sont comprises entre 0,72 dS/m pour l'échantillon B217 H1 et 51,7 dS/m pour l'échantillon A495 H5. La valeur moyenne obtenue est de 15,27 dS/m, la médiane est égale à 12,61 dS/m.

Selon les normes de l'USSL (1954), 5 échantillons sont classés non salés (CE < 2 dS/m), 3 échantillons sont peu salés (CE comprise entre 2 et 4 dS/m), 8 échantillons sont moyennement salés (CE comprise entre 4 et 8 dS/m), 18 échantillons sont salés (CE comprise entre 8 et 16 dS/m), et 19 échantillons sont très salés (CE > 16 dS/m).

L'histogramme des fréquences des classes de salinité montre une dominance de la classe très salée avec 35,85 % des échantillons, elle est suivie par la classe salée avec 33,96 % (figure 19). Les échantillons moyennement salés représentent 15,09 %, et les échantillons peu salés et non salés représentent respectivement 5,66 % et 9,43 %. Ces résultats montrent une nette prédominance des échantillons salés et très salés qui représentent 69,81 % des échantillons.

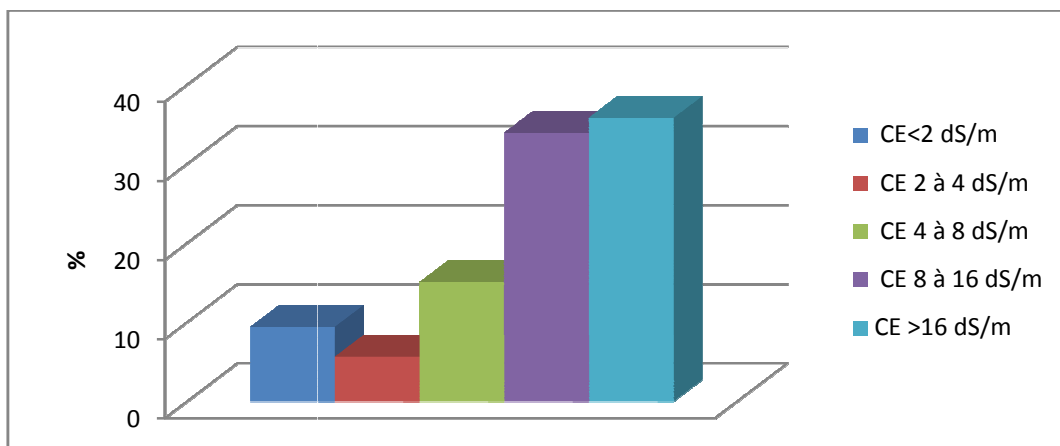


Figure 19. L'histogramme des fréquences des classes de salinité

Tableau X. Caractéristiques de la solution des sols

Profil	Horizon	CE (dS/m)	pH
A 495	H1	4,95	8,3
	H2	11,18	7,45
	H3	26,1	7,95
	H4	32	7,97
	H5	51,7	7,5
A503	H1	8,66	8,29
	H2	16,82	8,15
	H3	31,5	7,49
	H4	25,9	8,01
	H5	24,4	8,15
	H6	23	8,17
A507	H1	1,6	8,35
	H2	7,45	8,02
	H3	14,57	7,41
	H4	15,02	7,51
A557	H1	1,7	8,32
	H2	2,56	7,66
	H3	6,9	7,64
	H4	8,46	8,02
	H5	8,84	8,07
A567	H1	1,55	8,36
	H2	7,27	7,73
	H3	20,3	7,65
	H4	29,7	7,51
	H5	30,5	7,47
A570	H1	3,14	8,34
	H2	14,38	7,41
	H3	25,6	7,98
	H4	25,3	7,87
	H5	23,9	7,92
A573	H1	1,63	7,91
	H2	4,76	7,7
	H3	10,26	7,03
	H4	11,87	7,82
	H5	12,78	7,73
	H6	14,88	7,15
A922	H1	5,1	8,38
	H2	13,3	8,29
	H3	20,4	7,79
	H4	41,2	7,67
	H5	37,7	7,53
A923	H1	7,25	8,23
	H2	12,01	8,29
	H3	18,96	8,02
	H4	34,9	7,82
B163	H1	1,58	7,84
	H2	6,77	8,27
	H3	14,15	7,69
	H4	12,61	8,05
B217	H1	0,72	8,24
	H2	3,57	8,04
	H3	8,43	7,53
	H4	9,63	7,47

1.2. Corrélation entre la somme des cations et la somme des anions

L'équation de régression calculée entre la somme des cations et la somme des anions est de type $y = ax$ dans la mesure où une solution indemne d'électrolytes ne contiendra ni cations ni anions. L'équation obtenue est la suivante:

$$\sum \text{anions} = 0,96 \sum \text{cations} \quad R^2 = 0,87 \text{ et } n = 53$$

La corrélation est significative ($r(\text{observé})=0,93$; $r(\text{critique})=0,27$ pour $\text{ddl} = 51$ et $\alpha=0,05$) (figure 20). Le coefficient de régression obtenu est de 0.96, il est inférieur à l'unité. Or, conformément à loi d'électroneutralité, la somme des cations doit être égale à la somme des anions dans la solution du sol.

L'écart entre la somme des cations et la somme des anions varie entre -0,06 % et 96,12% (tableau XI).

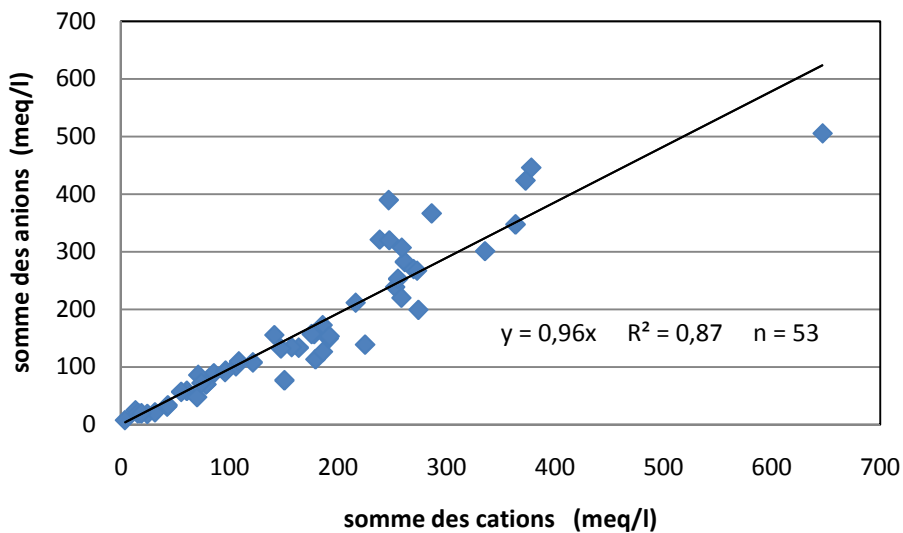


Figure 20. Relation entre la somme des anions et la somme des cations

Tableau XI. La somme des cations et des anions et leur écart

Profils	Horizons	Somme des cations meq/l	Somme des anions meq/l	$\frac{\Sigma(+)-\Sigma(-)}{\Sigma(-)} \cdot 100$
A 495	H1	60,89	58,46	4,16
	H2	121,73	108,04	12,67
	H3	261,74	282,37	-7,31
	H4	335,71	300,92	11,56
	H5	372,98	423,5	-11,93
A503	H1	85,86	89,25	-3,79
	H2	186,06	172,62	7,79
	H3	238,69	320,92	-25,62
	H4	269,75	269,92	-0,06
	H5	273,07	267,12	2,23
	H6	252,81	238,62	5,95
A507	H1	17,35	19,42	-10,65
	H2	71,31	86,25	-17,31
	H3	178,25	157,29	13,33
	H4	141,5	155,46	-8,98
A557	H1	24,44	18,58	31,53
	H2	31,52	21,5	46,62
	H3	78,54	69,67	12,74
	H4	96,57	93,46	3,33
	H5	106,09	101,08	4,95
A567	H1	13,63	25,08	-45,64
	H2	78,84	69,96	12,69
	H3	216,5	211,58	2,32
	H4	286,5	366,46	-21,82
	H5	246,93	389,54	-36,61
A570	H1	42,8	31,12	37,51
	H2	191,73	149,21	28,5
	H3	247,48	319,79	-22,61
	H4	258,96	306,92	-15,62
	H5	255,48	252,92	1,01
A573	H1	15,54	19,79	-21,45
	H2	70,31	47,83	46,99
	H3	179,47	113,42	58,24
	H4	164,05	133,46	22,92
	H5	157,52	134,42	17,19
	H6	175,92	157,21	11,9
A922	H1	55,66	56,87	-2,14
	H2	225,14	138,83	62,17
	H3	258,68	220	17,58
	H4	646,74	505,12	28,03
	H5	378,31	445,83	-15,15
A923	H1	150,85	76,92	96,12
	H2	186,37	126,37	47,48
	H3	274,23	199,16	37,69
	H4	363,81	347,29	4,76
B163	H1	19,07	19,62	-2,82
	H2	74,29	72,25	2,83
	H3	192,38	153,37	25,43
	H4	147,63	132,21	11,66
B217	H1	3,87	7,87	-50,87
	H2	43,33	33,58	29,03
	H3	96,08	91,12	5,44
	H4	108,82	109,71	-0,81

1.3. Corrélation entre la conductivité électrique et la concentration en électrolytes

La somme des cations varie entre 3,87 à 646,74 méq/l (tableau XI). L'équation de régression entre la somme des cations et la conductivité électrique est la suivante:

$$\Sigma \text{cations} = 9,63\text{CE} + 23,34 \quad R^2 = 0,85 \text{ et } n = 53$$

La corrélation est significative ($r(\text{observé})=0,92$; $r(\text{critique})=0,27$ pour ddl = 51 et $\alpha=0,05$) (figure 21). La somme des cations augmente proportionnellement avec l'augmentation de la CE. La somme des cations est égale à 9.63 fois la CE.

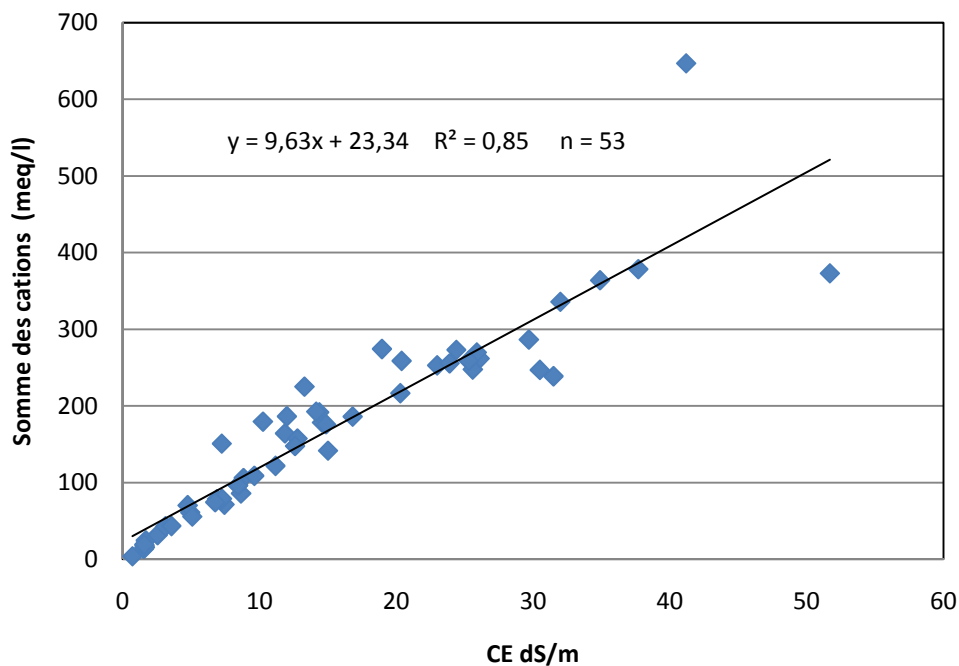


Figure 21. Relation entre la somme des cations et la conductivité électrique

La somme des anions varie entre 7,87 à 505,12 méq/l (tableau XI). L'équation de régression entre la somme des anions et la conductivité électrique est la suivante:

$$\Sigma \text{anions} = 10,51\text{CE} + 3,87 \quad R^2 = 0,96 \text{ et } n = 53$$

La corrélation est significative ($r(\text{observé})=0,97$; $r(\text{critique}) =0,27$ pour $ddl = 51$ et $\alpha=0,05$) (figure 22). La somme des anions augmente proportionnellement avec la CE. La somme des anions est égale à 10,51 fois la CE.

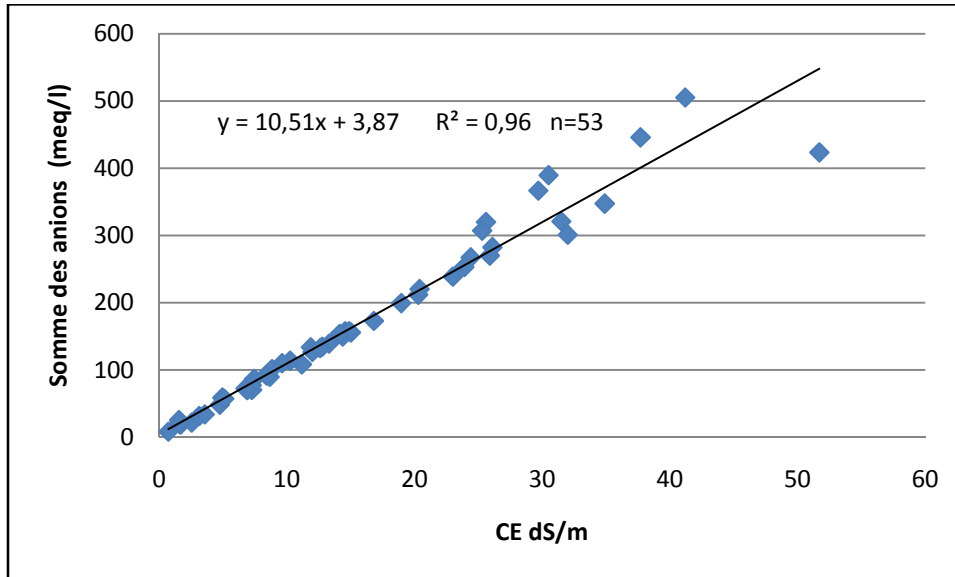


Figure 22. Relation entre la somme des anions et la conductivité électrique

1.4. Le pH

Les valeurs de pH obtenues varient entre 7,03 pour l'échantillon A573 H3 et 8,38 pour l'échantillon A922 H1 (tableau X). Les valeurs de pH révèlent une certaine alcalinité de la réaction des sols.

Dans la solution des sols, l'alcalinité mesurée est représentée par les bicarbonates. L'équation de régression entre le pH et la teneur en bicarbonate est la suivante:

$$\text{pH} = -0,21 \text{ HCO}_3^- + 3,95 \quad R^2 = 0,004 \text{ et } n = 53$$

La corrélation est non significative ($r(\text{observé})=0,063$; $r(\text{critique}) = 0,2732$ pour $ddl = 51$ et $\alpha = 0,05$). Cette relation signifie que la variation du pH est indépendante de la variation du HCO_3^- .

1.5. Le sodium

La concentration en sodium varie entre 0,82 à 588,51méq/l, la valeur moyenne est égale à 140,69méq/l (tableau XII). L'équation de régression entre la teneur en sodium et la conductivité électrique est la suivante:

$$\text{Na}^+ \text{ (meq/l)} = 8,53\text{CE} + 10,36 \quad R^2 = 0,82 \text{ et } n = 53$$

La corrélation est significative($r(\text{observé})=0,91$; $r(\text{critique}) =0,27$ pour $\text{ddl} = 51$ et $\alpha=0,05$) (figure 23). Cette relation statistique signifie que la teneur en sodium évolue proportionnellement avec l'augmentation de la CE.

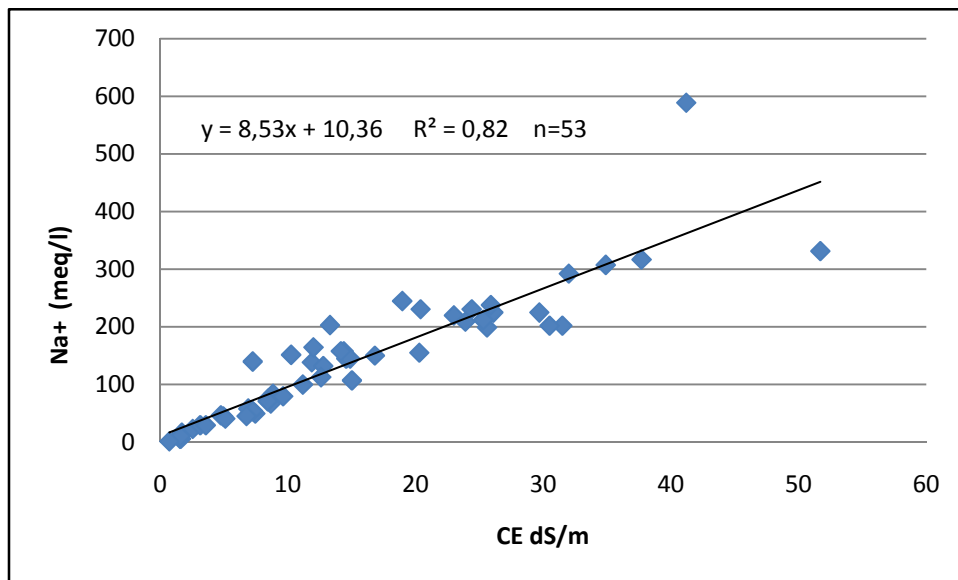


Figure 23. Relation entre le sodium et la conductivité électrique

Tableau XII. Résultats analytiques des ions de la solution des sols

Les ions	Ca ⁺⁺ meq/l	Mg ⁺⁺ meq/l	Na ⁺ meq/l	K ⁺ meq/l	Cl ⁻ meq/l	HCO ₃ ⁻ meq/l	SO ₄ ⁻⁻ meq/l
La valeur minimale	0,75	1,68	0,82	0,21	5	1	1,87
La valeur maximale	57,85	5,95	588,51	0,33	490	3,5	23,12
La moyenne	26,47	2,98	140,69	0,27	151,04	2,33	11,15

1.6. Le potassium

La concentration en potassium varie entre 0,21 à 0,33 méq/l, la valeur moyenne est égale à 0,27méq/l (tableau XII). L'équation de régression entre la teneur en potassium et la conductivité électrique est la suivante:

$$K^+ = 0,0001CE + 0,26 \quad R^2 = 0,061 \text{ et } n = 53$$

La corrélation est non significative($r(\text{observé})= 0,25$; $r(\text{critique}) = 0,27$ pour $ddl = 51$ et $\alpha=0,05$). Ce résultat statistique signifie que La concentration en potassium ne varie pas en fonction de la CE.

1.7. Le calcium

La concentration en calcium varie entre 0,75 à 57,85 méq/l, la valeur moyenne est égale à 26,47méq/l (tableau XII). L'équation de régression entre la teneur en calcium et la conductivité électrique est la suivante:

$$Ca^{++} \text{ (meq/l)} = 1,02CE + 10,83 \quad R^2 = 0,69 \text{ et } n = 53$$

La corrélation est significative($r(\text{observé})= 0,83$; $r(\text{critique}) = 0,2732$ pour $ddl = 51$ et $\alpha=0,05$) (figure 24). Cette relation statistique signifie que la teneur en calcium varie avec l'augmentation de la CE.

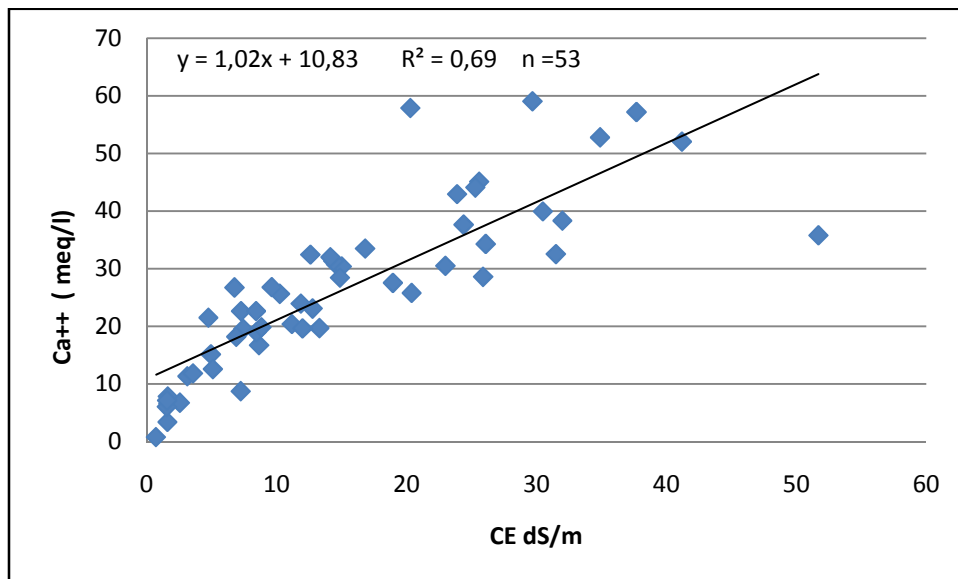


Figure 24. Relation entre le calcium et la conductivité électrique

1.8. Le magnésium

La concentration en magnésium varie entre 1,68 à 5,95 méq/l, la valeur moyenne est égale à 2,98méq/l (tableau XII). L'équation de régression entre la teneur en magnésium et la conductivité électrique est la suivante:

$$\text{Mg}^{++} \text{ (meq/l)} = 0,07\text{CE} + 1,89 \quad R^2 = 0,68 \quad \text{et } n = 53$$

La corrélation est significative ($r(\text{observé})=0,82$; $r(\text{critique}) =0,27$ pour $\text{ddl} = 51$ et $\alpha=0,05$) (figure 25). Cette relation statistique signifie que la teneur en magnésium varie en fonction de la CE.

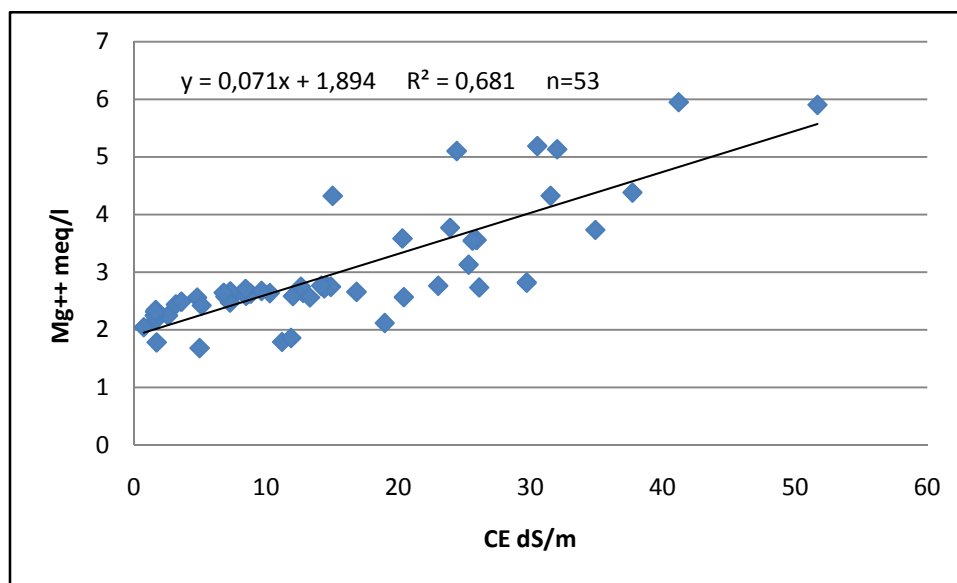


Figure 25. Relation entre le magnésium et la conductivité électrique

1.9. Le chlore

La concentration en chlore varie entre 5 à 490 méq/l, la valeur moyenne est égale à 151,04méq/l (tableau XII). L'équation de régression entre la teneur en chlorure et la conductivité électrique est la suivante :

$$\text{Cl}^- \text{ (meq/l)} = 9,85\text{CE} + 0,87 \quad R^2 = 0,91 \text{ et } n = 53$$

La corrélation est significative ($r(\text{observé})= 0,95$; $r(\text{critique}) =0,27$ pour $\text{ddl} = 51$ et $\alpha=0,05$) (figure 26). Cette relation statistique signifie que la teneur en chlorure évolue proportionnellement avec l'augmentation de la CE.

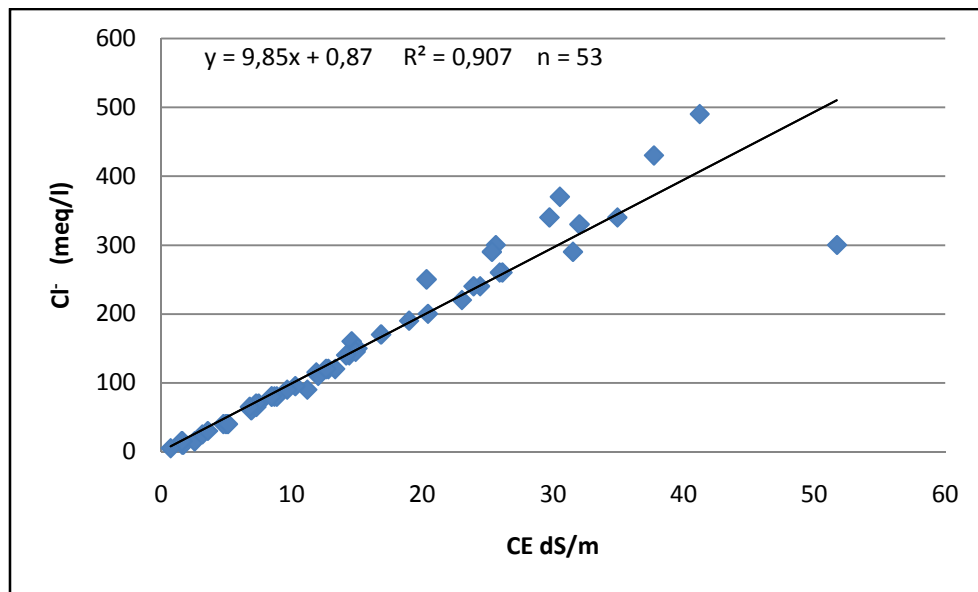


Figure 26. Relation entre les chlorures et la conductivité électrique

1.10. Les bicarbonates

La concentration en bicarbonates varie entre 1 à 3,5méq/l, la valeur moyenne est égale à 2,33méq/l (tableau XII). L'équation de régression entre la teneur en bicarbonate et la conductivité électrique est la suivante:

$$\text{HCO}_3^- \text{ (meq/l)} = 0,03\text{CE} + 1,83 \quad R^2 = 0,089 \text{ et } n = 53$$

La corrélation est significative ($r(\text{observé}) = 0,3$; $r(\text{critique}) = 0,27$ pour $\text{ddl} = 51$ et $\alpha = 0,05$) (figure 27). Cette relation statistique signifie que La concentration en bicarbonate soluble varie en fonction de la CE.

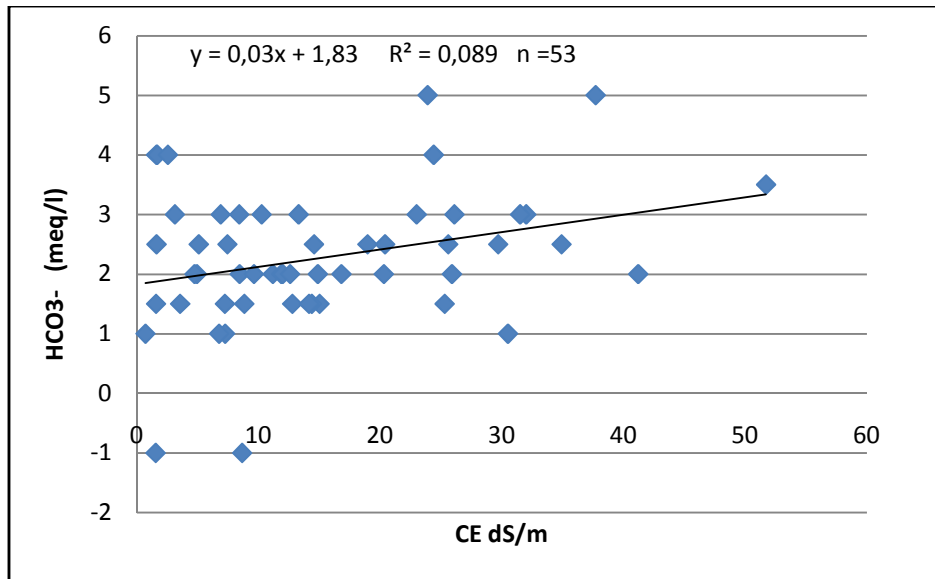
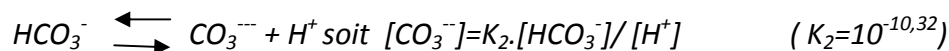
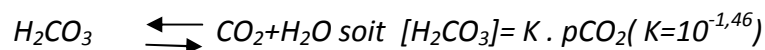


Figure 27. Relation entre les bicarbonates et la conductivité électrique

1.11. Les carbonates

La méthode d'analyse utilisée n'a pas permis de quantifier la teneur en carbonates solubles des échantillons analysés. Les concentrations en carbonates sont calculées à partir du pH, en utilisant les réactions des équilibres suivantes (GARRELS et CHRIST, 1967 ; in Laoufi, 2010):

$$pH = \log [H^+], \quad \text{soit } [H^+] = 10^{-pH}$$



Le tableau XIII montre que les teneurs en carbonates de la solution des sols varient entre une valeur minimale de 0,001 meq/l et une valeur maximale de 0,04 meq/l.

Tableau XIII. Les teneurs calculées en carbonates de la solution des sols

Profil	Horizon	pH	[H ⁺] (mole/l)	CO ₃ ⁻ (meq/l)
A 495	H1	8,3	5,01E-09	0,02
	H2	7,45	3,55E-08	0,003
	H3	7,95	1,12E-08	0,01
	H4	7,97	1,07E-08	0,01
	H5	7,5	3,16E-08	0,005
A503	H1	8,29	5,13E-09	0,005
	H2	8,15	7,08E-09	0,01
	H3	7,49	3,23E-08	0,004
	H4	8,01	9,77E-09	0,01
	H5	8,15	7,08E-09	0,03
	H6	8,17	6,76E-09	0,02
A507	H1	8,35	4,47E-09	0,04
	H2	8,02	9,55E-09	0,01
	H3	7,41	3,89E-08	0,003
	H4	7,51	3,09E-08	0,002
A557	H1	8,32	4,79E-09	0,04
	H2	7,66	2,19E-08	0,009
	H3	7,64	2,29E-08	0,006
	H4	8,02	9,55E-09	0,01
	H5	8,07	8,51E-09	0,008
	H6	8,07	8,51E-09	0,008
A567	H1	8,36	4,36E-09	0,005
	H2	7,73	1,86E-08	0,003
	H3	7,65	2,24E-08	0,004
	H4	7,51	3,09E-08	0,004
	H5	7,47	3,39E-08	0,001
A570	H1	8,34	4,57E-09	0,03
	H2	7,41	3,89E-08	0,002
	H3	7,98	1,05E-08	0,01
	H4	7,87	1,35E-08	0,005
	H5	7,92	1,20E-08	0,02
A573	H1	7,91	1,23E-08	0,01
	H2	7,7	1,99E-08	0,005
	H3	7,03	9,33E-08	0,002
	H4	7,82	1,51E-08	0,006
	H5	7,73	1,86E-08	0,004
	H6	7,15	7,08E-08	0,001
A922	H1	8,38	4,17E-09	0,03
	H2	8,29	5,13E-09	0,03
	H3	7,79	1,62E-08	0,007
	H4	7,67	2,138E-08	0,004
	H5	7,53	2,95E-08	0,008
A923	H1	8,23	5,89E-09	0,01
	H2	8,29	5,13E-09	0,02
	H3	8,02	9,55E-09	0,01
	H4	7,82	1,51E-08	0,008
B163	H1	7,84	1,44E-08	0,005
	H2	8,27	5,37E-09	0,009
	H3	7,69	2,04E-08	0,004
	H4	8,05	8,91E-09	0,01
B217	H1	8,24	5,75E-09	0,008
	H2	8,04	9,12E-09	0,008
	H3	7,53	2,95E-08	0,005
	H4	7,47	3,39E-08	0,003

1.12. Les sulfates

La concentration en sulfates varie entre 1,87 à 23,12 méq/l, la valeur moyenne est égale à 11,15 méq/l (tableau XII). L'équation de régression entre les teneurs en sulfates et la conductivité électrique est la suivante :

$$\text{SO}_4^- \text{ (meq/l)} = 0,076\text{CE} + 2,418 \quad R^2 = 0,23 \text{ et } n = 53$$

La corrélation est significative ($r(\text{observé})=0,48$; $r(\text{critique}) = 0,27$ pour $\text{ddl} = 51$ et $\alpha=0,05$) (figure 28). Cette relation statistique signifie que l'évolution de la concentration en sulfates est dépendante de l'évolution de la CE.

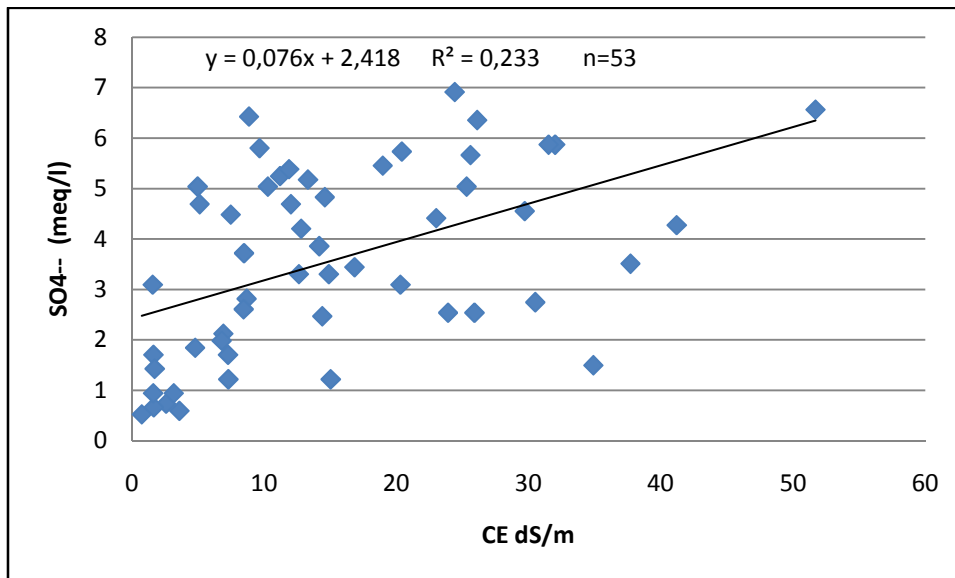


Figure 28. Relation entre les sulfates et la conductivité électrique

1.13. Le SAR et L'ESP

Les résultats du tableau XIV montrent que les valeurs du SAR sont comprises entre 0,98 et 154,62. L'équation de régression entre le SAR et la conductivité électrique et de type $y=ax$ (si $\text{SAR} = 0$ et $\text{CE} = 0$), le calcul donne la relation suivante :

$$\text{SAR} = 2,801\text{CE} \quad R^2 = 0,612 \text{ et } n = 53$$

La corrélation est significative ($r(\text{observé}) = 0,78$; $r(\text{critique}) = 0,27$ pour $ddl = 51$ et $\alpha = 0,05$) (figure 29). Cette relation statistique signifie que le SAR évolue proportionnellement avec l'augmentation de la CE et que le risque de sodisation du complexe adsorbant augmente avec le niveau de salinité.

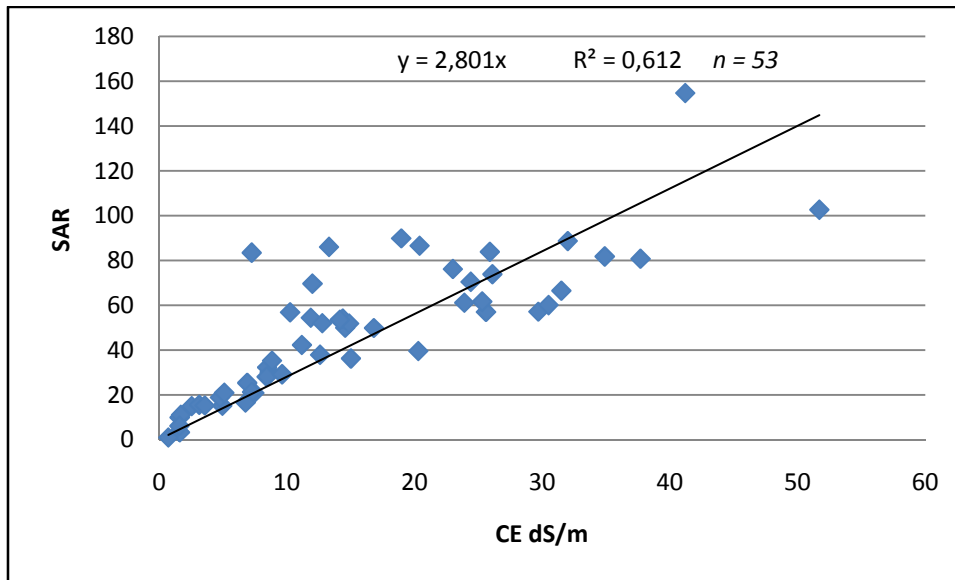


Figure 29. Relation entre le SAR et la conductivité électrique

Le taux de sodium échangeable est calculé à partir des valeurs du SAR présentées dans le tableau XIII. L'équation utilisée est celle de l'USSS (1954) :

$$ESP = 100 (- 0,0126 + 0,01475 X SAR) / 1 + (- 0,0126 + 0,01475 X SAR)$$

Les résultats du tableau XIV montrent que 48 échantillons présentent des taux de sodium échangeables supérieurs à 15%.

Selon les normes de la FAO (1984), 3 échantillons présentent une sodicité légère ($ESP < 5\%$), 3 échantillons présentent une sodicité modérée (ESP compris entre 5% et 20%), 13 échantillons présentent une sodicité grave (ESP compris entre 20% et 45%), et 34 échantillons présentent une sodicité très grave ($ESP > 45\%$).

L'histogramme des fréquences des classes de sodicité montre une dominance de la sodicité très grave avec 64,15% des échantillons, la sodicité grave représente 24,53% des échantillons, 5,66% des échantillons présentent une sodicité modérée, et 5,66% des échantillons ont une légère sodicité (figure 30). Les niveaux de sodicité du complexe adsorbant seraient donc élevés à très élevés pour 88,68% des échantillons.

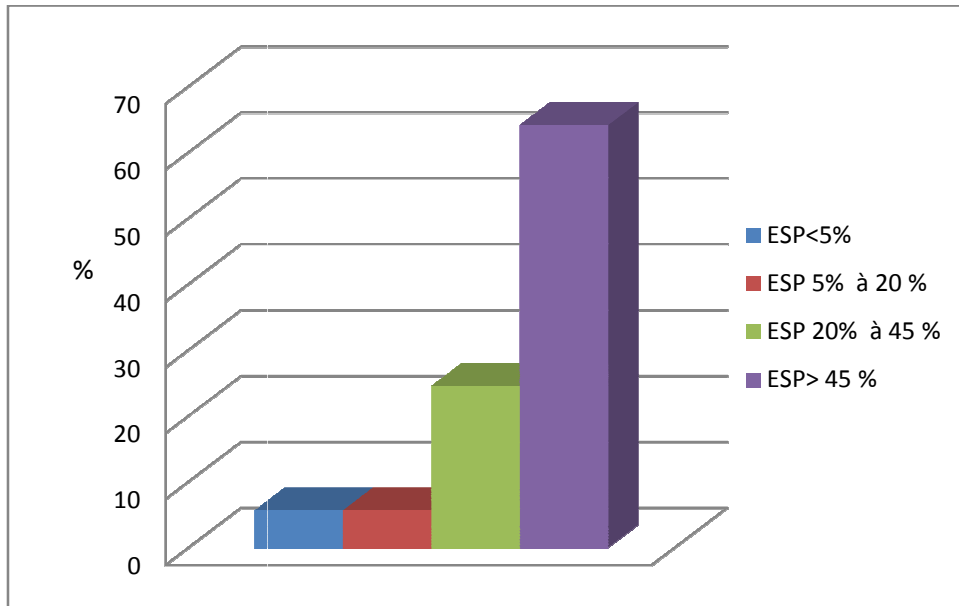


Figure 30. L'histogramme des fréquences des classes de sodicité

Tableau XIV. Les valeurs du SAR et de l'ESP des échantillons

Profil	Horizon	SAR	ESP
A 495	H1	15,14	21,29
	H2	42,21	61,61
	H3	73,82	108,70
	H4	88,61	130,74
	H5	102,59	151,56
A503	H1	30,13	43,61
	H2	49,80	72,92
	H3	66,44	97,71
	H4	83,78	123,53
	H5	70,42	103,64
	H6	76,12	112,13
A507	H1	9,87	13,43
	H2	20,85	29,79
	H3	49,93	73,11
	H4	36,21	52,66
A557	H1	11,00	15,12
	H2	14,93	20,98
	H3	25,31	36,43
	H4	32,24	46,76
	H5	35,24	51,23
A567	H1	3,57	4,05
	H2	21,21	30,32
	H3	39,49	57,56
	H4	57,09	83,78
	H5	60,04	88,18
A570	H1	15,53	21,87
	H2	53,98	79,14
	H3	56,98	83,62
	H4	61,59	90,49
	H5	61,06	89,69
A573	H1	3,22	3,52
	H2	18,78	26,71
	H3	56,83	83,39
	H4	54,40	79,77
	H5	51,93	76,09
	H6	51,79	75,89
A922	H1	20,87	29,82
	H2	85,99	126,83
	H3	86,49	127,57
	H4	154,62	229,07
	H5	80,69	118,94
A923	H1	83,41	122,99
	H2	69,59	102,41
	H3	89,79	132,49
	H4	81,72	120,46
B163	H1	6,15	7,89
	H2	16,50	23,30
	H3	53,44	78,34
	H4	37,86	55,12
B217	H1	0,98	0,19
	H2	15,24	21,44
	H3	28,03	40,49
	H4	29,17	42,19

1. 14. Synthèse et discussion

La solution des sols est caractérisée par une conductivité électrique variable. Elle couvre une large gamme de salinité qui va du niveau non salé ($CE < 2$ dS/m) jusqu'au niveau très salé ($CE > 16$ dS/m). Les échantillons ayant une $CE > 4$ dS/m représentent 84,9% du total, ils sont salés selon les normes de l'USSS (1954).

L'écart entre la somme des cations et la somme des anions varie entre -0,06 % et 96,12%. La loi de l'électroneutralité stipule que la somme des cations doit être égale à la somme des anions dans une solution. Les écarts relativement élevés observés entre la somme des cations et la somme des anions peuvent s'expliquer ainsi (Laoufi, 2010):

- soit qu'un ou plusieurs ions présents en solution n'ont pas été quantifiés.
- soit que les manipulations ont engendré des erreurs d'analyse.

La somme des cations et la somme des anions augmentent proportionnellement avec la CE. La somme des cations est égale à 9,63 fois la CE, et la somme des anions est égale à 10,51 fois la CE. Ces résultats concordent avec ceux obtenus par l'USSS (1954) qui montrent que la somme des cations ou des anions est de l'ordre de 10 fois la conductivité électrique.

Le pH révèle une réaction relativement alcaline des sols. La variation du pH est indépendante de la variation du HCO_3^- .

Les relations statistiques entre les ions et la conductivité électrique présentent des corrélations hautement significative entre la CE et Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Cl^- , SO_4^{--} , une corrélation significative entre la CE et HCO_3^- , et une corrélation non significative entre la CE et le K^+ . L'évolution des cations et des anions est donc proportionnelle par rapport à l'évolution de la CE, à l'exception du potassium qui présente une évolution spécifique et indépendante de la salinité.

Le sodium qui est le cation dominant dans la solution des sols, il ne rentre pas dans les phénomènes de précipitation des minéraux jusqu'à des valeurs de CE très élevées (Droubiet *al.*, 1980).

Pour le calcium et le magnésium leur évolution peut être contrôlée par la précipitation de la calcite et de la magnésite, mais ce contrôle semble insuffisant pour limiter leur évolution avec le niveau de salinité (Laoufi, 2010).

Le comportement du potassium n'est pas lié à l'évolution de la CE, il pourrait être contrôlé par le phénomène d'échange cationique ou par la rétrogradation par des minéraux argileux (Ait Mechedal, 2011 ; Boussoussa, 2012).

L'ion chlore, qui ne rentre pas dans les précipitations des minéraux jusqu'à des niveaux de salinité très élevés, présente un comportement semblable à celui du sodium est suit l'évolution de la CE. L'évolution des bicarbonates pourrait être contrôlée par la précipitation des minéraux calciques et l'évolution des sulfates pourrait être contrôlée par la précipitation des minéraux sulfatés, ces évolutions semblent insuffisantes pour contrôler leur augmentation avec le niveau de salinité (Daoud, 1993).

Les valeurs du SAR sont variables et comprises entre 0,98 et 154,62. Le SAR évolue proportionnellement avec l'augmentation de la CE comme l'ont déjà montré les travaux de Touaf (2002) et de Hadj Miloud (2010). L'augmentation de la salinité s'accompagne d'une sodisation du complexe adsorbant. Les valeurs calculées de l'ESP à partir du SAR couvrent une large gamme de valeurs avec une prédominance du caractère très sodique. Selon les normes de l'USSS (1954), 48 échantillons présentent des taux de sodium échangeable supérieurs à 15% et correspondent à des horizons sodiques.

2. LES PROFILS SALINS

2.1. Les types de profils salins

L'étude des profils de distribution des sels révèle l'existence de deux types de profils salins. La figure 31 montre une distribution des sels selon un gradient descendant, la salinité augmente avec la profondeur. Ce type de profils de distribution concerne 7 profils, il correspond à un profil salin de type D (Servant, 1976).

La figure 32 montre un autre type de profils de distribution des sels. Ce type de profils montre une concentration maximale des sels à moyenne profondeur, il concerne 4 profils. D'après Servant (1976), cette distribution correspond à un profil salin convexe de type B.

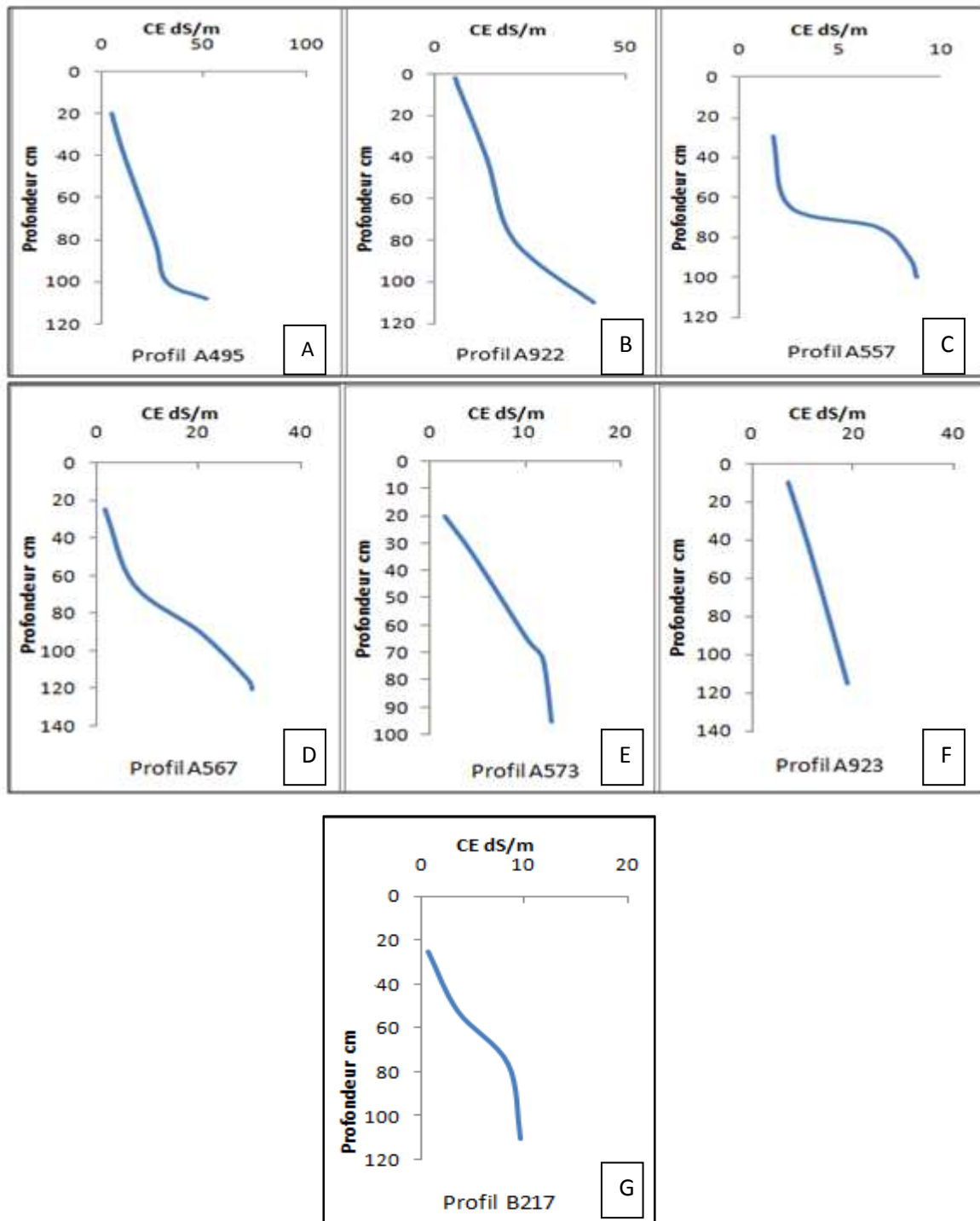


Figure 31. Profils salins type D

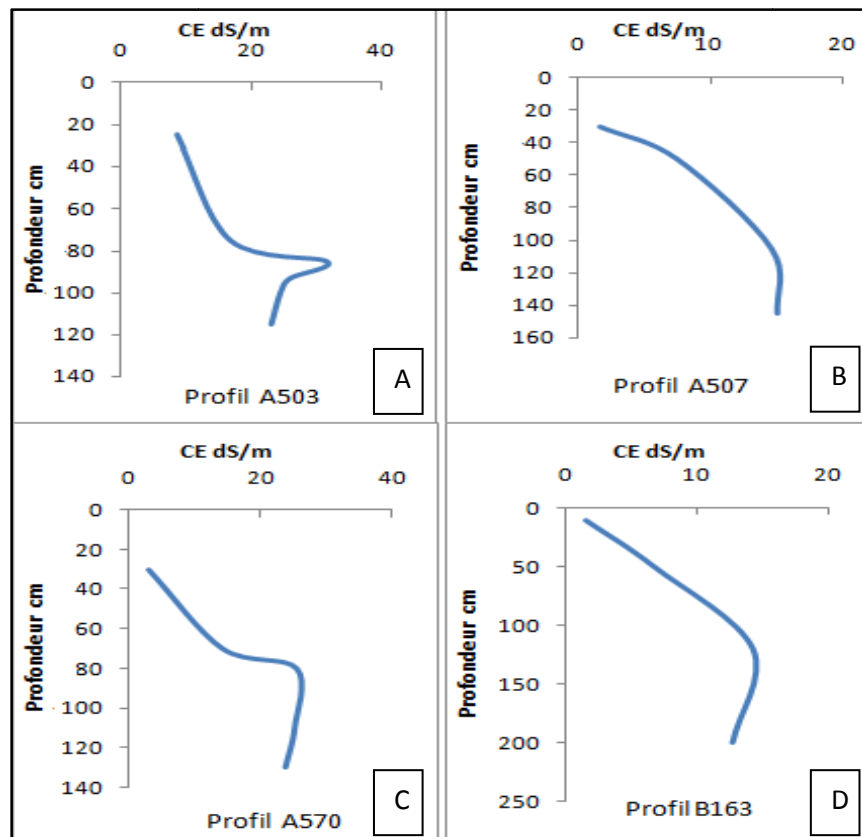


Figure 32. Profils salins type B

2.2. Synthèse et discussion

Le profil de distribution des sels révèle la présence de deux types de profils salins. Ces deux types de profils salins sont caractérisés par un gradient de salinité descendant, seule la localisation du niveau de salinité maximum diffère.

L'augmentation de la salinité avec la profondeur serait due à une lixiviation partielle des sels des horizons de surface pendant la période pluvieuse (Servant, 1976). L'inefficacité du réseau de drainage empêche l'évacuation des sels solubles et provoque leur accumulation à moyenne profondeur ou à la base du profil (Daoud, 1993). L'intensité de la lixiviation dépendrait des propriétés d'infiltration des sols qui seraient conditionnées par la texture relativement fine et par la structure affectée par la sodicité du complexe adsorbant (Saidiet *al.*, 2004 ; Douaouiet *al.*, 2004).

3. LE FACIES CHIMIQUE

3.1. Les résultats du logiciel Diagramme

La détermination des faciès chimiques se base sur la proportion des cations et des anions présents dans la solution du sol.

Le sodium présente un pourcentage de 21,14 à 92,4 % de la somme des cations. Le calcium présente une proportion de 5,77 à 50,18 % de la somme des cations. La proportion en magnésium est comprise entre 0,77 à 52,82 % de la somme des cations. Enfin, la proportion en potassium varie de 0,04 à 20 % de la somme des cations.

Les chlorures dominent les anions présents dans la solution des sols, leur proportion est comprise entre 51,5 à 97,9 % de la somme des anions. Les sulfates ont une proportion de 1,38 à 38,2 % de la somme des anions. Les bicarbonates représentent 0,26 à 21,52 % de la somme des anions.

Le logiciel Diagramme utilisé dans ce travail (Simler, 2012) ne traite simultanément que 30 solutions. Les données présentées dans le diagramme de Piper sont divisées en deux groupes selon la valeur de CE. La figure 33 présente les échantillons qui ont une CE inférieure à 14dS/m, les échantillons qui ont une CE supérieure à 14dS/m sont présentés dans la figure 34.

L'analyse des diagrammes de Piper montre la présence d'un faciès de type chloruré sodique pour la majorité des échantillons, l'échantillon B217 H1 a un faciès de type chloruré magnésien, et les échantillons B163 H1, A573 H1, A567 H1 ont un faciès chloruré sans dominance de l'un des cations.

3.2. Synthèse et discussion

L'analyse du diagramme de Piper, a permis de mettre en évidence trois types de faciès chimiques de la solution des sols. Un faciès chloruré sodique qui domine la solution des sols,

les faciès de type chloruré magnésien (L'échantillon B217 H1), et le faciès chloruré sans dominance de l'un des cations pour les échantillons B163 H1, A573 H1, A567 H1.

Le faciès chloruré sodique est observé au niveau des solutions qui ont une CE élevée. Les autres faciès sont observés pour des niveaux de CE plus faibles qui varient entre 0,725 dS/m et 1,63 dS/m. Ces sols évoluent donc selon la voie saline neutre à dominante chlorurée (Marlet et Job, 2006).

Sur le plan géochimique, le faciès chimique chloruré sodique ne favorise pas les phénomènes de précipitation des sels jusqu'à des niveaux de salinité très élevés (Droubiet *al.*, 1980). Sur le plan agronomique, ce faciès chloruré sodique est néfaste pour la croissance des plantes. En effet, les concentrations élevées en sodium et en chlore provoquent des perturbations multiples sur le métabolisme, la croissance et le développement des plantes aux niveaux moléculaire, biochimique et physiologique (Munns, 2002).

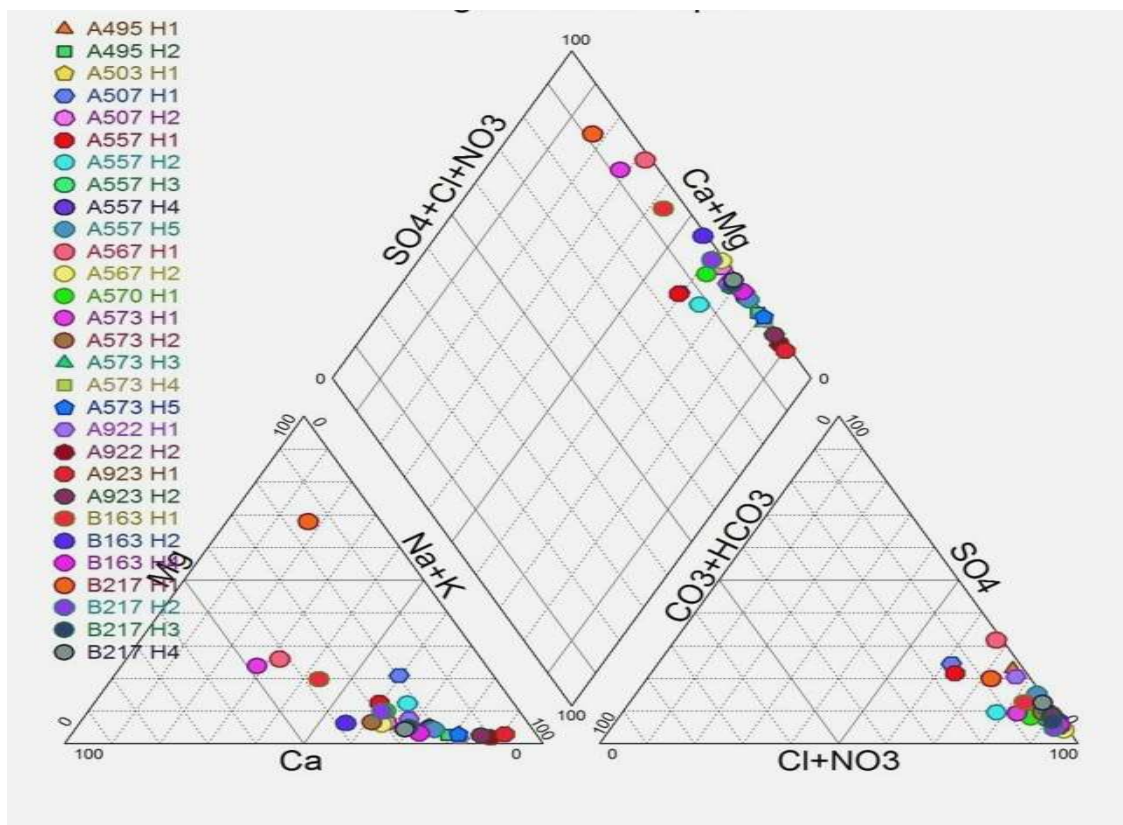


Figure 33. Faciès chimiques des solutions qui ont une CE inférieure à 14 dS/m

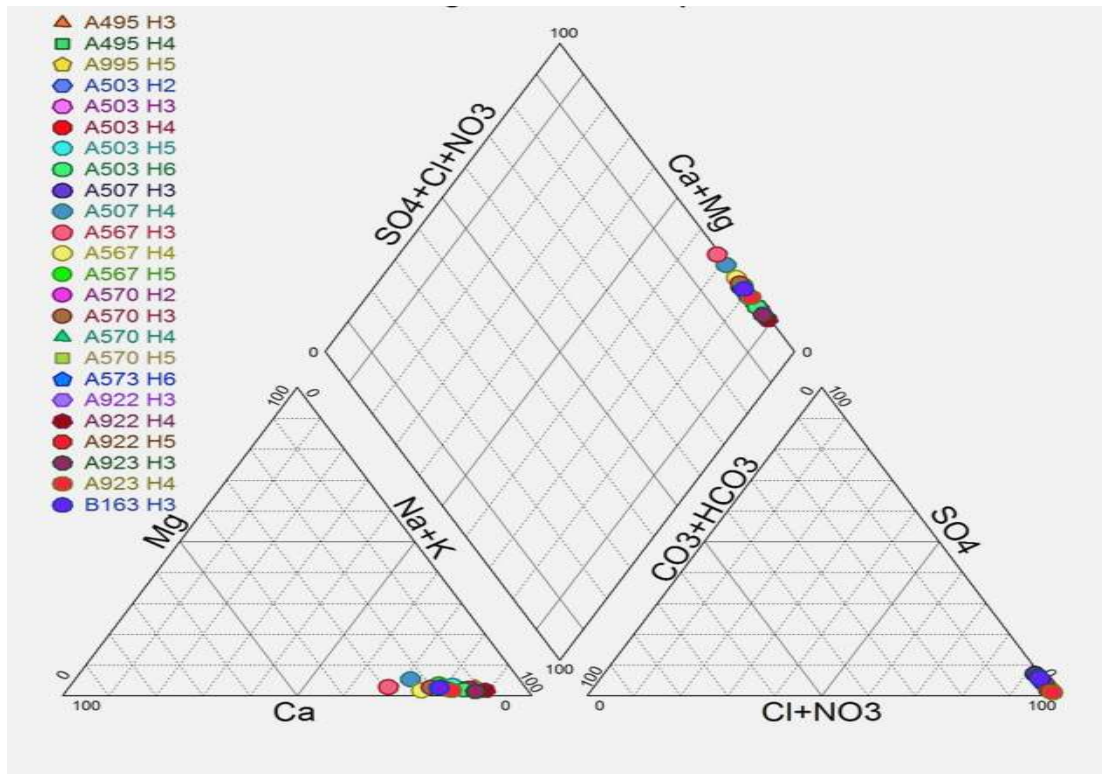


Figure 34. Faciès chimiques des solutions qui ont une CE supérieure à 14 dS/m

4. L'ETAT DE SATURATION DES SOLUTIONS VIS-A-VIS DES SELS PEU SOLUBLES

Les deux principaux sels peu solubles qui seront testés sont la calcite et le gypse. Ces sels contrôlent assez rapidement la concentration de certains ions dans la solution du sol (Droubiet *al.*, 1976).

Le degré de saturation d'une solution vis-à-vis d'un minéral est testé par une comparaison de produit de solubilité (K_{ps}) au produit ionique (Q) des ions présents dans la solution (Droubi *et al.*, 1976) :

$Q = K_{ps}$: la solution est juste à saturation vis-à-vis du minéral testé

$Q < K_{ps}$: la solution est sous-saturée vis-à-vis de ce minéral

$Q > K_{ps}$: la solution est sursaturée vis-à-vis de ce minéral

Le degré de saturation d'une solution vis-à-vis d'un minéral peut être testé par le logarithme du rapport entre le produit ionique (Q) et le produit de solubilité (Kps). La valeur obtenue correspondra à l'indice de saturation (IS) dont l'interprétation utilise les indications suivantes :

IS > 0 : solution sur saturée vis-à-vis du minéral

IS = 0 : solution en équilibre vis-à-vis du minéral

IS < 0 : solution sous saturée vis-à-vis du minéral.

Les activités ioniques sont calculées à l'aide du logiciel Active (Montoroi et Rieu, 1987).

4.1. Test de saturation vis-à-vis de la calcite

La réaction de dissolution-précipitation de la calcite peut être présentée ainsi :



$$K_{ps} = (\text{Ca}^{++}) \cdot (\text{CO}_3^{--}) / (\text{CaCO}_3) = 10^{-8,37}$$

(CaCO₃) = activité du solide = 1 (Droubiet *al.*, 1976)

Les échantillons pour lesquels le résultat n'est pas affiché ne répondent pas à l'exigence de la convergence de l'électroneutralité. Ces échantillons présentent un écart trop élevé entre la somme des cations et la somme des anions pour répondre à la condition de l'électroneutralité. Le logiciel exige que $K^+ + Na^+ + 2Ca^{++} + 2Mg^{++} \geq Cl^- + 2SO_4^-$, pour calculer $HCO_3^- + 2CO_3^{--}$. Si cette condition n'est pas réunie, il n'est pas possible de calculer $HCO_3^- + 2CO_3^{--} < 0$, et le calcul sera abandonné avec le message d'erreur : pas de convergence de l'électroneutralité (Montoroi et Rieu, 1987).

Les résultats du test de saturation vis-à-vis de la calcite montrent que IS > 0 à l'exception de l'échantillon B217 H4 (tableau XV). Les solutions sont donc saturées par rapport à la calcite.

La variation de l'indice de saturation vis-à-vis de la calcite par rapport à la conductivité électrique est abordée selon les modèles mathématiques suivants ($y = IS$, $x = CE$) (figure 35):

-Le modèle linéaire : $y = 0,023x + 1,024$ $R^2 = 0,169$ et $n = 53$

La corrélation est significative ($r(\text{observé}) = 0,41$; $r(\text{critique}) = 0,27$ pour $ddl = 51$ et $\alpha = 0,05$).

-Le modèle polynomiale de second degré : $y = -0,000x^2 + 0,040x + 0,920$
 $R^2 = 0,179$ et $n = 53$

La corrélation est significative ($r(\text{observé}) = 0,42$; $r(\text{critique}) = 0,27$ pour $ddl = 51$ et $\alpha = 0,05$).

-Le modèle logarithmique : $y = 0,288\ln(x) + 0,668$ $R^2 = 0,205$ et $n = 53$

La corrélation est significative ($r(\text{observé}) = 0,45$; $r(\text{critique}) = 0,27$ pour $ddl = 51$ et $\alpha = 0,05$).

Le meilleur modèle d'ajustement est donc le modèle logarithmique.

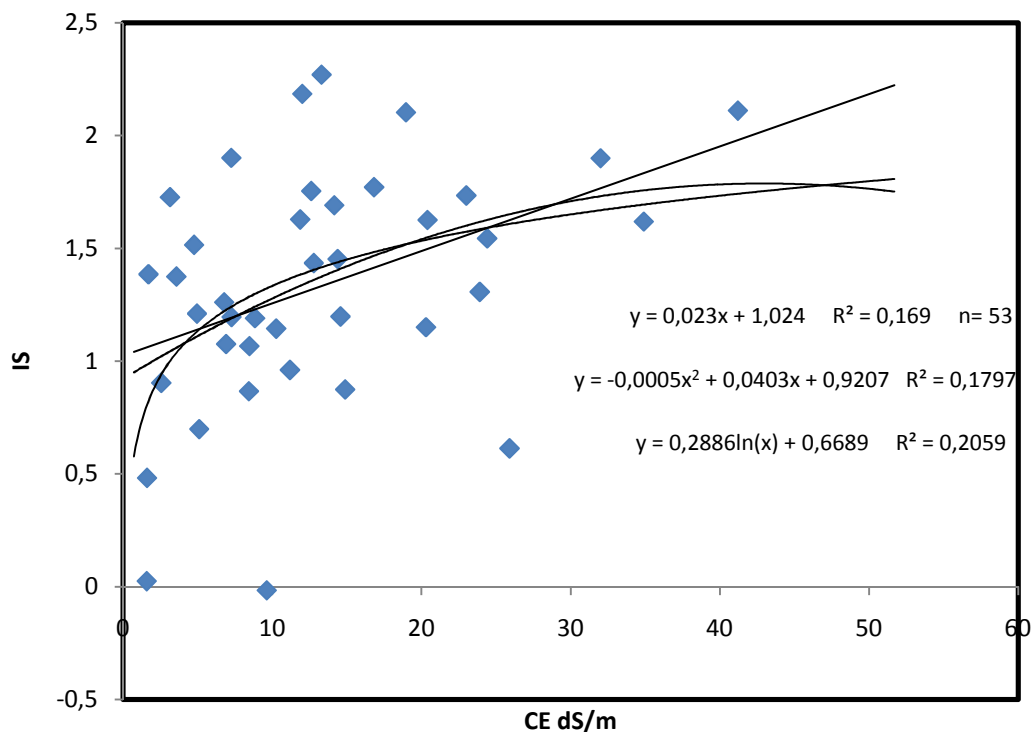


Figure 35. Variation de l'indice de saturation de la calcite par rapport à la conductivité électrique

4.2. Test de saturation vis-à-vis du gypse

La réaction de précipitation –dissolution du gypse s’écrit ainsi :



$$K_{ps} = (\text{Ca}^{++}) \cdot (\text{SO}_4^{--}) \cdot (\text{H}_2\text{O})^2 / (\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}) = 10^{-4,85}$$

$(\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}) =$ activité du solide = 1 (Droubi *et al.*, 1976).

L’activité de l’eau est considérée égale à 1 : $K_{ps} = (\text{Ca}^{++}) \cdot (\text{SO}_4^{--}) = 10^{-4,85}$

Les résultats du test de saturation vis-à-vis du gypse montrent que $IS < 0$ (tableau XV). Toutes les solutions sont donc sous-saturées par rapport au gypse.

La variation de l’indice de saturation du gypse par rapport à la CE a été étudiée selon les modèles mathématiques suivants ($y = IS$, $x = CE$) (figure 36) :

-Le modèle linéaire : $y = 0,012x - 0,757$ $R^2 = 0,160$ et $n = 53$

La corrélation est significative ($r(\text{observé}) = 0,4$; $r(\text{critique}) = 0,27$ pour $ddl = 51$ et $\alpha = 0,05$).

-Le modèle polynomiale : $y = -0,001x^2 + 0,063x - 1,062$ $R^2 = 0,436$ et $n = 53$

La corrélation est significative ($r(\text{observé}) = 0,66$; $r(\text{critique}) = 0,27$ pour $ddl = 51$ et $\alpha = 0,05$).

-Le modèle logarithmique : $y = 0,220 \ln(x) - 1,095$ $R^2 = 0,38$ et $n = 53$

La corrélation est significative ($r(\text{observé}) = 0,61$; $r(\text{critique}) = 0,27$ pour $ddl = 51$ et $\alpha = 0,05$).

Le modèle polynomiale du second degré aboutit au meilleur ajustement entre l’indice de saturation vis-à-vis du gypse et la conductivité électrique.

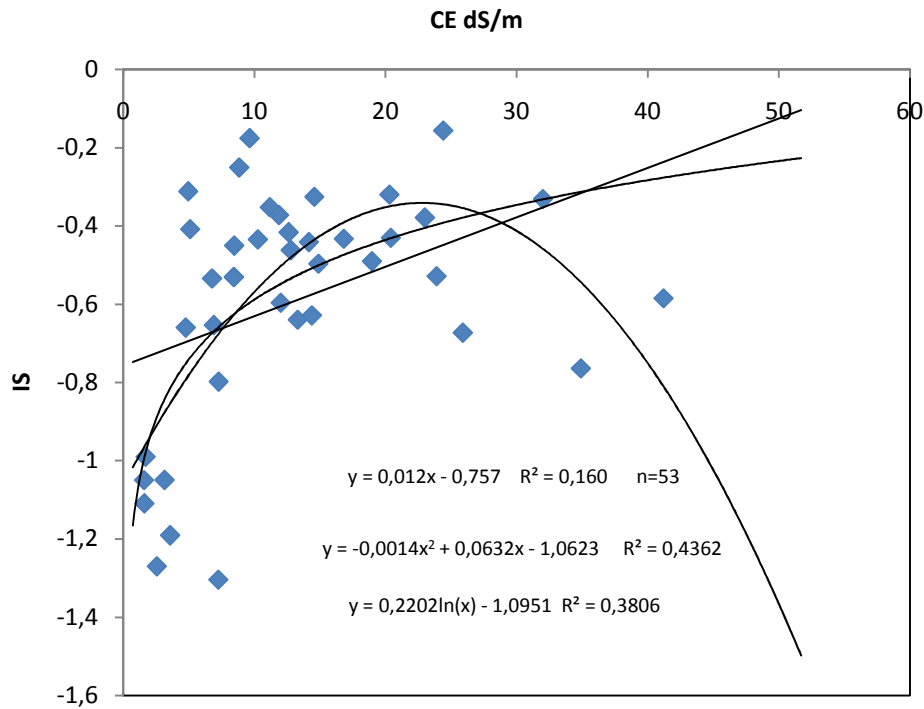


Figure 36. Variation de l'indice de saturation du gypse par rapport à la conductivité électrique

4.3. Synthèse et discussion

Les tests de saturation montrent que les solutions des sols sont généralement saturées vis-à-vis de la calcite, et elles sont sous-saturées vis-à-vis du gypse.

La saturation vis-à-vis du gypse n'est pas encore atteinte en raison de la valeur relativement plus élevée de la constante d'équilibre du gypse ($10^{-4.58}$) par rapport à celle de la calcite ($10^{-8.37}$) (Fehdriet *al.*, 2009).

La corrélation entre l'indice de saturation de la calcite et la conductivité électrique est hautement significative selon les modèles linéaire et polynomiale ($r(\text{critique}) = 0,36$, ddl = 51 et $\alpha = 0,01$), elle est très hautement significative selon le modèle logarithmique ($r(\text{critique}) = 0,45$, ddl = 51 et $\alpha = 0,001$).

Tableau XV. Représentation des tests de saturation vis-à-vis de la calcite et le gypse

Profils	Horizons	pCO ₂	Force ionique	Q		IS=log (Q/Kps)	
				CaCO ₃	CaSO ₄ 2H ₂ O	CaCO ₃	CaSO ₄ 2H ₂ O
A 495	H1	1,00E-03	7,06E-02	6,92E-08	6,89E-06	1,21	-0,31
	H2	2,58E-02	1,34E-01	3,89E-08	6,27E-06	0,96	-0,35
	H3	-	-	-	-	-	-
	H4	1,64E-02	3,54E-01	3,38E-07	6,58E-06	1,90	-0,33
	H5	-	-	-	-	-	-
A503	H1	-	-	-	-	-	-
	H2	4,46E-03	2,02E-01	2,52E-07	5,21E-06	1,77	-0,43
	H3	-	-	-	-	-	-
	H4	7,24E-04	2,87E-01	1,75E-08	3,00E-06	0,61	-0,67
	H5	2,78E-03	2,95E-01	1,49E-07	9,85E-06	1,54	-0,16
	H6	4,72E-03	2,69E-01	2,31E-07	5,90E-06	1,73	-0,38
A507	H1	4,39E-04	2,12E-02	1,29E-08	1,10E-06	0,48	-1,11
	H2	-	-	-	-	-	-
	H3	4,03E-02	1,93E-01	6,72E-08	6,67E-06	1,20	-0,33
	H4	-	-	-	-	-	-
A557	H1	2,35E-03	2,83E-02	1,03E-07	1,45E-06	1,38	-0,99
	H2	1,60E-02	3,55E-02	3,41E-08	7,58E-07	0,90	-1,27
	H3	1,25E-02	8,74E-02	5,07E-08	3,14E-06	1,08	-0,65
	H4	2,19E-03	1,08E-01	4,97E-08	5,01E-06	1,07	-0,45
	H5	2,48E-03	1,19E-01	6,60E-08	7,93E-06	1,19	-0,25
A567	H1	-	-	-	-	-	-
	H2	8,44E-03	8,98E-02	6,68E-08	2,25E-06	1,19	-0,80
	H3	6,19E-03	2,44E-01	6,02E-08	6,76E-06	1,15	-0,32
	H4	-	-	-	-	-	-
	H5	-	-	-	-	-	-
A570	H1	3,17E-03	4,77E-02	2,27E-07	1,26E-06	1,73	-1,05
	H2	7,56E-02	2,04E-01	1,21E-07	3,32E-06	1,45	-0,63
	H3	-	-	-	-	-	-
	H4	-	-	-	-	-	-
	H5	3,64E-03	2,77E-01	8,64E-08	4,18E-06	1,31	-0,53
A573	H1	-	-	-	-	-	-
	H2	2,30E-02	7,89E-02	1,40E-07	3,09E-06	1,51	-0,66
	H3	2,94E-01	1,90E-01	5,94E-08	5,19E-06	1,14	-0,43
	H4	2,20E-02	1,76E-01	1,81E-07	5,99E-06	1,63	-0,37
	H5	2,05E-02	1,70E-01	1,16E-07	4,87E-06	1,43	-0,46
	H6	6,55E-02	1,90E-01	3,19E-08	4,50E-06	0,87	-0,50
A922	H1	2,40E-04	6,84E-02	2,13E-08	5,51E-06	0,70	-0,41
	H2	1,96E-02	2,33E-01	7,93E-07	3,24E-06	2,27	-0,64
	H3	2,88E-02	2,73E-01	1,80E-07	5,24E-06	1,63	-0,43
	H4	1,22E-01	6,62E-01	5,50E-07	3,67E-06	2,11	-0,59
	H5	-	-	-	-	-	-
A923	H1	2,03E-02	1,55E-01	3,39E-07	7,01E-07	1,90	-1,30
	H2	1,36E-02	1,95E-01	6,52E-07	3,58E-06	2,18	-0,60
	H3	3,51E-02	2,85E-01	5,40E-07	4,56E-06	2,10	-0,49
	H4	1,13E-02	3,88E-01	1,77E-07	2,43E-06	1,62	-0,76
B163	H1	7,12E-04	2,39E-02	4,50E-09	1,26E-06	0,02	-1,05
	H2	6,73E-04	8,76E-02	7,77E-08	4,13E-06	1,26	-0,53
	H3	3,60E-02	2,05E-01	2,09E-07	5,11E-06	1,69	-0,44
	H4	6,53E-03	1,62E-01	2,42E-07	5,41E-06	1,75	-0,42
B217	H1	-	-	-	-	-	-
	H2	4,95E-03	4,91E-02	1,01E-07	9,10E-07	1,37	-1,19
	H3	1,08E-02	1,08E-01	3,13E-08	4,16E-06	0,87	-0,53
	H4	1,72E-03	1,24E-01	4,10E-09	9,42E-06	-0,02	-0,18

La corrélation entre l'indice de saturation du gypse et la conductivité électrique est hautement significative selon le modèle linéaire ($r(\text{critique}) = 0,36$, ddl = 51 et $\alpha = 0,01$), elle est très hautement significative selon les modèles polynomiale et logarithmique ($r(\text{critique}) = 0,45$, ddl = 51 et $\alpha = 0,001$).

La saturation de la solution du sol vis-à-vis de la calcite est atteinte dès le faible niveau de salinisation des sols. La saturation des solutions vis-à-vis du gypse n'est pas encore atteinte pour les niveaux de salinité observés dans ces sols (Laoufi, 2010).

5. L'ÉVOLUTION TEMPORELLE DE LA SALINITE

L'évolution temporelle de la salinité de la station de Hmadena est étudiée entre deux périodes 1956 et 2012. Il s'agit de comparer les profils salins des deux périodes.

5.1. Comparaison des profils salins entre les deux périodes

L'étude comparative des profils de distribution des sels entre les deux périodes a porté sur 5 profils (A503, A495, A567, B217, B163). Ces profils présentent des données complètes pour tous les horizons concernant la période de 1956. La comparaison des données de 1956 et celles de 2012 permettra de cerner l'évolution temporelle de la salinité durant une période de 57 ans. La comparaison des profils salins révèle la présence de trois situations :

-La salinité a augmenté dans tout le profil en 2012 par rapport à 1956 dans le profil A503 (figure 37).

-La salinité a diminué en surface et elle a augmenté en profondeur en 2012 par rapport à 1956 dans le profil A567 (figure 38).

-La salinité a diminué dans tout le profil en 2012 par rapport à 1956 dans les profils A495, B217 et B163 (figure 39).

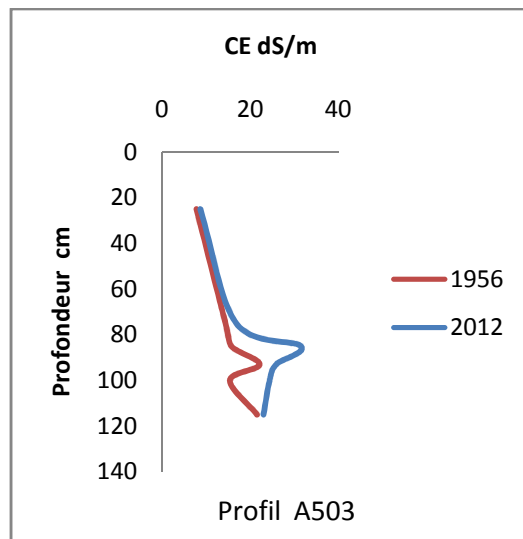


Figure 37. Profil salin du profil A503 pour les deux périodes (1956 et 2012)

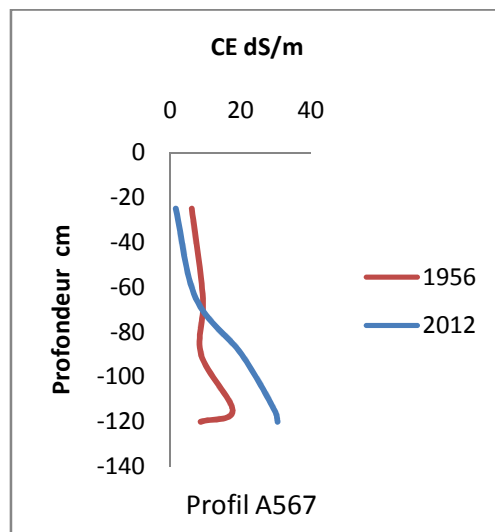


Figure 38. Profil salin de profil A567 pour les deux périodes (1956 et 2012)

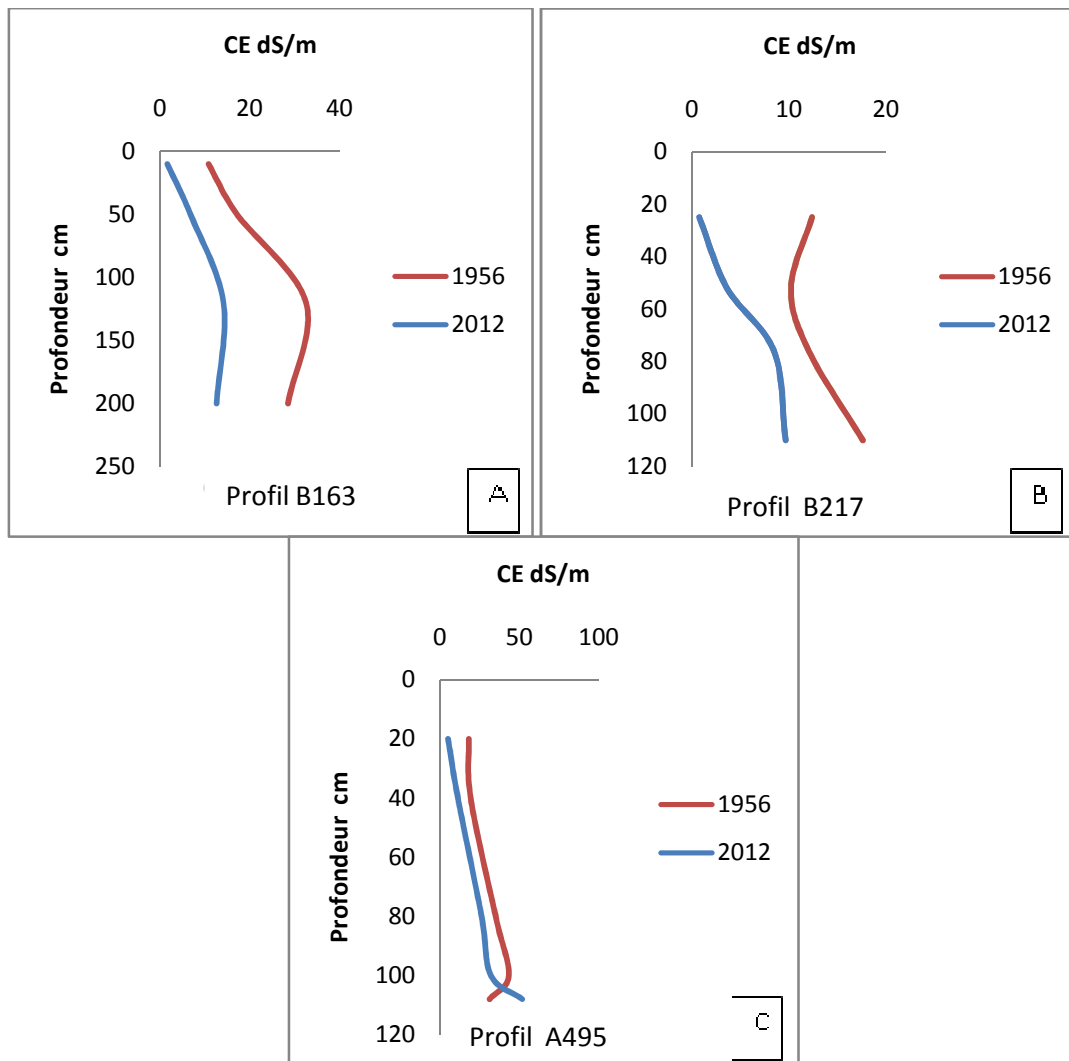


Figure 39. Profil salin des profils B163, B217 et A495 pour les deux périodes (1956 et 2012)

5.2. Le gradient d'évolution de la salinité

La comparaison des niveaux de salinité entre les deux périodes permettra de cerner le sens d'évolution de la salinité de chaque horizon du sol.

5.2.1. Le gradient d'évolution de la salinité par profil

Les valeurs de la CE du tableau XVI représentent la CE moyenne pour chaque profil étudié. La valeur moyenne de la CE pour chaque profil est calculée à partir des valeurs de la CE de chaque horizon pondérée par leur épaisseur (CE de chaque horizon x l'épaisseur de l'horizon, la somme obtenue pour tous les horizons est divisée par l'épaisseur du profil).

Ce calcul porte sur les deux périodes comparées. L'écart de la salinité moyenne des profils entre les deux périodes est obtenu par différence entre les valeurs de la CE de 2012 et celles de la CE de 1956. La vitesse de salinisation est obtenue par une division de l'écart par le temps (57 ans).

Le tableau XVI montre que les profils A495, B163, B217 présentent une désalinisation entre 1956 et 2012. Cette désalinisation se produit à une vitesse comprise entre 0,13 et 0,27 dS/m par année. Les profils A567 et A503 ont enregistré une salinisation entre 1956 et 2012. Cette augmentation de la salinité s'est produite à une vitesse de 0,06 dS/m par année.

Tableau XVI. L'écart et la vitesse de salinisation moyenne entre 1956 et 2012 des profils B163, A495, B217, A567, A503.

Profils	La CE moyenne du profil (dS/m) (1956)	La CE moyenne du profil (dS/m) (2012)	L'écart de la CE entre les deux périodes CE (dS/m)	Vitesse de salinisation (dS/m/année)
B163	26,75	11,43	-15,32	-0,27
A495	30,10	20,07	-10,04	-0,18
B217	13,35	5,86	-7,49	-0,13
A567	10,30	13,74	3,44	0,06
A503	13,46	16,99	3,53	0,06

5.2.2. Le gradient d'évolution de la salinité par horizon

L'écart de la salinité entre les deux périodes est obtenu par une soustraction des valeurs de la CE de 2012 des valeurs de la CE de 1956 (CE (2012) – CE (1956)). La vitesse de salinisation est obtenue par une division de l'écart par le temps (57ans). Les résultats sont présentés pour chaque horizon. Les profils B163 et B217 présentent 4 horizons, les profils A495 et A567 présentent 5 horizons et le profil A503 présente 6 horizons. L'étude est limitée à 4 horizons seulement pour permettre d'avoir une comparaison de la salinisation par horizon pour tous les profils.

Le tableau XVII montre que l'horizon de surface (H1) présente une désalinisation avec une vitesse comprise entre 0,08 et 0,23 dS/m par année pour les profils A495, A567, B163, B217. En revanche, le profil A503 présente une salinisation avec une vitesse de 0,01dS/m par année.

L'horizon de subsurface (H2) présente une désalinisation selon une vitesse variant entre 0,03 et 0,18 dS/m par année pour les profils A495, A567, B163, B217. Pour le profil A503, il présente une salinisation à une vitesse de 0,04 dS/m par année.

Les horizons de profondeur (H3 et H4) présentent une désalinisation selon une vitesse variant de 0,06 à 0,32dS/m par année pour les profils A495, B163, B217. En revanche, les profils A503 et A567 présentent une salinisation avec une vitesse variant de 0,07 à 0,28 dS/m par année.

Tableau XVII. L'écart et la vitesse de salinisation entre 1956 et 2012 par horizon des profils comparés.

Horizons	profils	CE dS/m (1956)	CE dS/m (2012)	CE (2012) – CE (1956) (dS/m)	Gradient de salinité en dS/m par année
H1	B163	10,83	1,59	-9,25	-0,16
	A495	18,00	4,95	-13,05	-0,23
	B217	12,33	0,73	-11,61	-0,20
	A567	6,08	1,55	-4,53	-0,08
	A503	7,83	8,66	0,83	0,01
H2	B163	17,17	6,77	-10,40	-0,18
	A495	19,17	11,18	-7,99	-0,14
	B217	10,17	3,57	-6,60	-0,12
	A567	9,25	7,27	-1,98	-0,03
	A503	14,42	16,82	2,40	0,04
H3	B163	32,50	14,15	-18,35	-0,32
	A495	35,00	26,10	-8,90	-0,16
	B217	12,00	8,43	-3,57	-0,06
	A567	8,75	20,30	11,55	0,20
	A503	15,75	31,50	15,75	0,28
H4	B163	28,50	12,61	-15,89	-0,28
	A495	43,35	32,00	-11,35	-0,20
	B217	17,58	9,63	-7,95	-0,14
	A567	17,75	29,70	11,95	0,21
	A503	22,17	25,90	3,73	0,07

5.3. La position topographique des profils

La figure 40 montre la localisation des profils comparés et le sens de circulation de l'eau selon Durand (1956). La topographie de la parcelle induirait un sens de circulation de l'eau de la zone où se trouvent les 3 profils A495, B163, B217 (altitude comprise entre 48 et 47 m), vers la zone où se trouvent les 2 profils A567 et A503 (altitude inférieure à 47 m). Il existe également un sens d'écoulement de l'eau qui irait du profil A567 vers le profil A503. Ce dernier profil (A503) est donc localisé dans une zone de collecte des eaux d'écoulement.

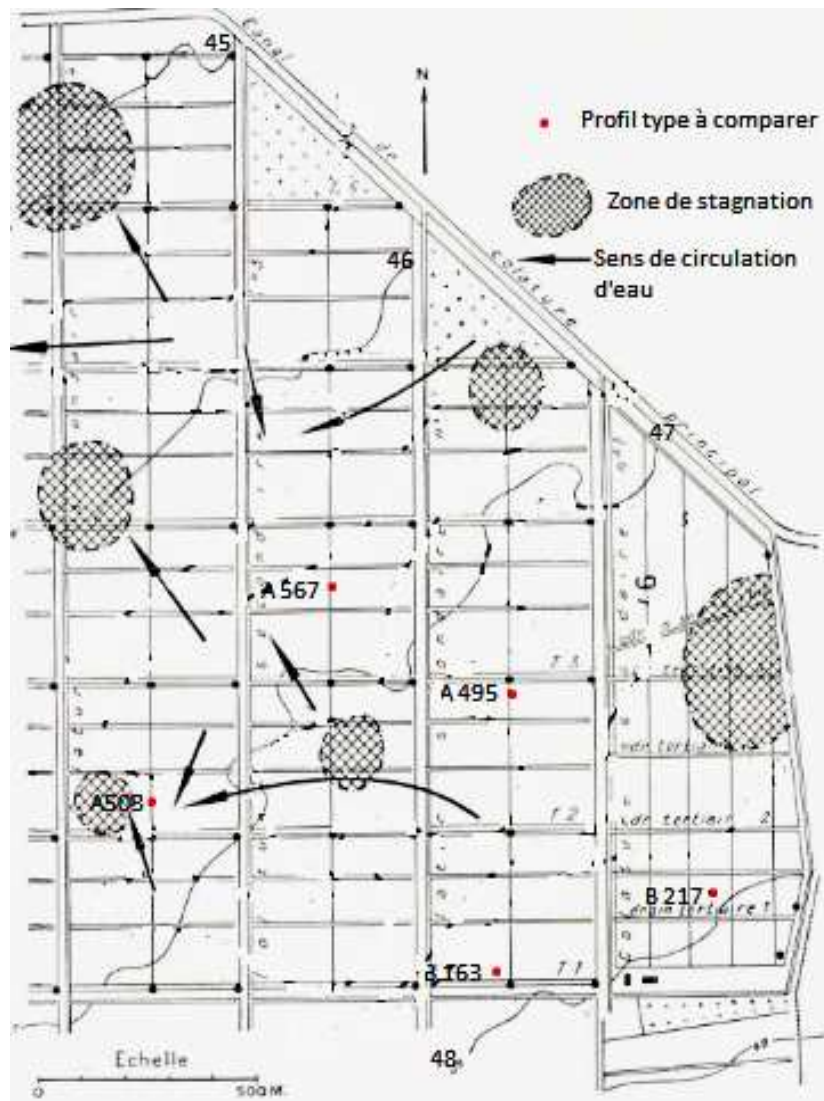


Figure 40. La localisation des profils comparés et le sens de circulation de l'eau (Durand, 1956)

5.4. Synthèse et discussion

L'observation des profils salins permet de mettre en évidence une évolution temporelle de la salinité spécifique à deux catégories de situations :

- les profils A495, B163, B217 enregistrent une désalinisation entre 1956 et 2012 à une vitesse de l'ordre de 0,13 à 0,27 dS/m par année,
- les profils A567 et A503 ont enregistré une salinisation entre 1956 et 2012 à une vitesse de 0,06 dS/m par année.

L'observation des gradients de salinisation au niveau de chaque horizon pour les différents profils montre une variation hétérogène de la salinité entre 1956 et 2012. Cette observation révèle également la présence d'une salinisation relativement plus importante en profondeur pour les 2 profils A503 et A567, et une désalinisation relativement plus importante en profondeur pour les 3 profils A 495, B 163 et B 217 entre 1956 et 2012. Cette variation de la salinité serait aux caractéristiques morphologiques spécifiques de chaque horizon (Daoud, 1993).

La position topographique du profil jouerait un rôle déterminant dans son fonctionnement salin. C'est ainsi que les profils localisés dans la partie relativement plus élevée de la parcelle enregistrent une désalinisation entre 1956 et 2012. Les profils localisés à une moindre altitude (1 à 2 m de dénivelé) constitueraient des milieux d'accueil des sels solubles provenant des profils précédents. Ce fonctionnement salin du système est, bien entendu, induit par son fonctionnement hydrique (Majdoubet *al.*, 2012)

Le réseau de drainage existant dans la parcelle et autour de la parcelle ne semble pas suffisant pour permettre l'évacuation des sols de la parcelle comme le suggèrent les travaux de Hartaniet *al.* (2007), De Zhou *et al.* (2010), et pour permettre la réduction du niveau de la nappe (Ben Hassine, 2005).

Plus généralement il s'avère que l'évolution temporelle de la salinité dépend du micro-relief, et elle est peu affectée par le réseau de drainage qui serait peu efficient.

CONCLUSION

Le présent travail porte sur la caractérisation de l'état de salinité des sols du périmètre de Hmadena situé dans le Bas-Cheliff, et sur l'évaluation de l'évolution temporelle de l'état de salinité des sols entre 1956 et 2012. Il s'agit de caractériser la solution des sols, de définir les profils de distribution des sels dans les sols, de déterminer les faciès chimiques des solutions des sols, de tester l'état de saturation des solutions vis-à-vis des sels peu solubles, et de cerner l'évolution temporelle de la salinité entre 1956 et 2012 en comparant les profils salins pour déterminer le sens et l'intensité de la variation de l'état de salinité des sols.

Ce travail a porté sur l'analyse et l'exploitation des données obtenues sur la solution de 53 échantillons provenant de 11 profils.

Les principaux résultats obtenus montrent que la salinité des sols étudiés est variable. Elle couvre une large gamme de salinité variant entre 0,72 dS/m et 51,7 dS/m. Les échantillons salés ($CE > dS/m$) représentent 84,9% du total.

L'écart entre la somme des cations et la somme des anions varie entre -0,06 % et 96,12%, cet écart est d'autant plus important que le niveau de salinité est élevé. La somme des cations est égale à 9,63 fois la CE, et la somme des anions est égale à 10,51 fois la CE.

Le pH révèle une réaction relativement alcaline des sols. La variation du pH est indépendante de la variation de l'alcalinité totale représentée par le HCO_3^- .

L'évolution des concentrations ioniques est généralement proportionnelle à celle de la CE, à l'exception du potassium qui présente une évolution spécifique et indépendante de la salinité.

Les valeurs du SAR sont variables et comprises entre 0,98 et 154,62. Le SAR évolue proportionnellement avec l'augmentation de la CE. L'augmentation de la salinité s'accompagne d'une sodisation du complexe adsorbant. Les valeurs calculées de l'ESP à

partir du SAR couvrent une large gamme, avec 45 échantillons qui correspondent à des horizons sodiques (ESP > 15 %).

Le profil de distribution des sels révèle la présence de deux types de profils salins. Ces profils sont caractérisés par un gradient de salinité descendant, seule la localisation du niveau de salinité maximum diffère.

Le faciès chimique des solutions des sols est peu variable. Le faciès chloruré sodique est largement dominant puisqu'il caractérise 92 % des horizons. Le faciès de type chloruré magnésien concerne un seul échantillon, et le faciès chloruré sans dominance est rencontré dans 3 horizons.

Les tests de saturation montrent que les solutions des sols sont généralement saturées vis-à-vis de la calcite, et elles sont sous-saturées vis-à-vis du gypse.

L'évolution temporelle de la salinité des sols entre 1956 et 2012 est variable selon les profils et les horizons. La comparaison des profils salins révèle la présence de trois situations. La salinité a augmenté dans tout le profil A503 en 2012 par rapport à 1956. La salinité a diminué en surface et elle a augmenté en profondeur en 2012 par rapport à 1956 dans le profil A567. La salinité a diminué dans tout le profil en 2012 par rapport à 1956 dans les profils A495, B217 et B163.

Plus généralement ce travail montre que :

-la salinisation des sols du Bas-Cheliff est relativement hétérogène, elle peut atteindre des niveaux de salinité très élevés, elle présente un faciès chloruré sodique, la composition chimique des solutions des sols est toujours contrôlée par la précipitation de la calcite,

-l'évolution de la salinité des sols sur un épisode de 57 ans met en évidence l'importance de l'efficacité du réseau de drainage dans le déterminisme du sens de variation du niveau de salinité des sols du Bas-Cheliff.

Références bibliographiques

ABBOTT C. L., EL QUOSY D. E. D., 1996. Soil Salinity Processes under Drain water Reuse in the Nile Delta, Egypt. HR Wallingford, England, 93p.

AIT MECHEDAL M., 2011. Caractérisation du statut potassique des sols du Bas-Cheliff. Mémoire d'ingénieur, ENSA, EL Harrach (Alger), 45p.

ARSHAD M. A., 2008. Soil Salinity and Salinization: Encyclopedia of soil science. Ed. Springer Dordrecht, Berlin, 860p.

BEN AISSA I., BOUKSILA F., BAHRI A., BOUARFA S., CHAUMONT C., HICHRI W., 2004. Gestion de l'eau et des sels au sein d'une oasis du Sud tunisien. Actes du Séminaire Modernisation de l'Agriculture Irriguée, Rabat, 12p.

BEN HASSINE H., 2005. Effets de la nappe phréatique sur la salinisation des sols de cinq périmètres irrigués en Tunisie. Étude et Gestion des Sols, Vol.12, n°4, pp.281-300.

BOIVIN P., BRUNET D., JOB J.O., 1988. Conductivité électromagnétique et cartographie automatique des sols salés. Une méthode rapide et fiable. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XXIV, n° 1, pp. 39-48.

BOIVIN P., LE BRUSQ J. Y., 1985. Désertification et salinisation des terres au Sénégal, problèmes et remèdes. Séminaire national sur la désertification, Saint-Louis, ORSTOM, 6p.

BOUSSOUSSA Y., 2012. Evaluation du statut potassique des sols du Bas-Cheliff. Mémoire de magister, ENSA, EL Harrach (Alger), 60p.

BOTTRAUD J.C., BORNAND M., SERVAT E., 1985. Mesures de résistivité appliquées à la cartographie en pédologie. Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Sol, n° 4, pp.279-294.

BRADAI A., DOUAOUI A., MARLET S., HARTANI T., BOUARFA S., 2011. La reconversion à l'utilisation des eaux souterraines pour l'irrigation et ses risques dans la plaine du Bas-Cheliff (Nord –Ouest d'Algérie). HTE n° 148, pp. 43-44.

DAOUD Y., 1990. Evolution de la salinité d'un sol irrigué dans le périmètre du Haut-Cheliff. Annales de l'Institut National Agronomique El Harrach, Vol. 14, n°1-2, pp.45-57.

DAOUD Y., 1993. Contribution à l'étude des sols des plaines du Cheliff : le phénomène de salinisation, conséquences sur les propriétés physiques des sols argileux. Thèse de doctorat, I.N.A., EL Harrach (Alger), 227 p.

DE FORGES, 1972. Irrigation et salinité. CIHEAM - Options Méditerranéennes, n° 14, pp. 40-45.

DE ZHOU, LIMING LIU, YUANPEI ZHANG, 2010.The evolution of soil salinization in the Yellow River Irrigation District of Ningxia, China during the period of 1958 to 2007. World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World , Brisbane, Australia, pp. 213-217.

DOUAOUI A., GASCUEL-ODOUX C., WALTER C., 2004.Infiltrabilité et érodibilité de sols salinisés de la plaine du Bas Chélif (Algérie) Mesures au laboratoire sous simulation de pluie. Étude et Gestion des Sols, Vol. 11, n° 4, pp. 379-392.

DOUAOUI A., LEPINARD P., 2010. Télédétection et salinité ; Cartographie de la salinité des sols de la plaine algérienne du Bas-Chélif. Géomantique Expert - n°76, pp. 36-41.

DOUAOUI A., 2005.Variabilité spatiale de la salinité et relation avec certain caractéristiques des sols du plain du bas Chélif approche de la géostatistique et de la télédétection. Thèse de doctorat d'état en agronomie, INA, EL Harrach (Alger). 255p.

DROUBI A., FRITZ B., GAC J.Y., TARDY Y., 1980. Predictions of the chemical evolution of natural waters wring evaporation. Doc. ORSTOM, 10p.

DROUBI A., FRITZ B., TARDY Y., 1976. Equilibres entre minéraux et solutions. Programmes de calcul appliqués à la prédiction de la salure des sols et des doses optimales d'irrigation. Cahiers de l'ORSTOM, série pédologie, Vol.15, n°1, pp. 13-38.

DURAND J. H., 1956.Quelques aspects de la station d'étude des sols salins des HAMADENA et de ses activités. SESSH, Alger, 31p.

FAO, 1984.Prognosis of salinity and alkanity. FAO soils Bulletin 31, 268 p.

FAO. 2005.Utilisation des engrais par culture en Algérie. Doc. FAO Rome, 61 p.

FAO, 2006.Gestion des sols salinisés par l'irrigation. Doc. FAO Rome, 2p.

FEHDI CH., BOUDOUKHA A., ROUABHIA A., SALAMEH E., 2009. Caractérisation hydrogéochimique des eaux souterraines du complexe aquifère Morsott-Laouinet (Région Nord de Tébessa, Sud-Est algérien). Afrique SCIENCE, vol. 05, n°2, pp. 217 – 231.

GIRARD M.C., WALTER C., REMY J.C., BERTBEL J, MOREL J.L., 2005. Sols et environnements, cours, exercices et étude de cas. Ed. Dunod, Paris. 475p.

GOULET E., BARBEAU G., 2004. Apports des mesures de résistivité électrique du sol dans les études sur le fonctionnement de la vigne et dans la spatialisation parcellaire. Congrès « Viticultural Terroir Zoning », Cape Town (Afrique du Sud), 8p.

HACHICHA M., TRABELSI A., BRARI N., JELIDI B., 1995. Impacte du drainage et de l'irrigation sur la variabilité spatio-temporelle des caractéristiques de la nappe et de la salure des sols dans le périmètre irrigué de KALAAT LANDELOUS. Doc. Direction des sois, Tunisie, 63 p.

HADJ MILOUD S., 2010. Morphologie et propriétés des Solonchaks références de la Mina. Mémoire de Magister, ENSA, EL Harrach (Alger), 112p.

HALITIM A., 1988. Sols des régions arides d'Algérie. Ed. O.P.U., Alger, 384p.

HALITIM A., 2011.L'aridoculture et le développement durable. Algerian journal of arid environment, vol. 1, n° 1, pp. 3-9.

HARTANI T., DOUAOUI A., KUPER M., HASSANI F., 2007. Stratégies de gestion individuelle de la salinité dans le périmètre irrigué du Bas Cheliff cas du périmètre de Ouarizane. Actes du troisième atelier régional du projet Sirma, Nabeul, Tunisie. 16p.

HAZELTON P., MURPHY B., 2007. Interpreting soil test results. NSW Department of Natural Resources, Australia, 169p.

INRA, 2011. Aménagement des terres agricoles salines en Algérie, la région du Bas cheliff w. de Relizane. Projet de coopération Algéro-Chinoise, 22p.

INSID, 2008. Le point sur la salinité des sols dans les périmètres irrigués Risques et Recommandations. Cas du périmètre irrigué du Bas Cheliff. Doc. INSID, 16p.

JOB J.O., LOYER J.Y., AILOUL M., 1987. Utilisation de la conductivité électromagnétique pour la mesure directe de la salinité des sols. Cah. ORSTOM, ser. Pédol., vol. XXIII, n° 2, pp. 123-131.

LAHLOU M., BADRAOUI M., SOUDI B., 2000. Modélisation de l'évolution de la salinité et de l'alcalinité dans les sols irrigués. Séminaire sur l'Intensification agricole et qualité des sols et des eaux, Rabat, pp.135-151.

LAOUFI H., 2010. Les processus géochimiques de la salinisation des sols du Bas –Chéiff. Thèse Magistère, ENSA, EL Harrach (Alger), 99p.

MAJDOUB R., HACHICHA M., EL AMRI A., MELKI M., 2012. Etude de la dynamique de l'Eau et du Transfert des Sels dans un Sol Sablo-Limoneux du Sahel Tunisien. European Journal of Scientific Research, Vol.80, n°4, pp. 499-507.

MARLET S., JOB J.O., 2006. Processus et gestion de la salinité des sols : Tiercelin, J.R. Traité d'irrigation, seconde édition. Ed. Tec & Doc Lavoisier, 28p.

MATHIEU C. et PIELTAIN F., 2003. Analyse chimique des sols, méthodes choisies. Ed. Tec et DOC, Lavoisier, Paris. 387p.

MONTOROI J.P., 1997. Conductivité électrique de la solution du sol et de l'extrait aqueux de sol, application à un sol sulfaté acide salé de Basse-Casamance (Sénégal). Étude et Gestion des Sols, Vol. 4, n°4, pp.279-298.

MONTOROI J.P., 1996. Intérêts et limites des bilans salins pour estimer les transferts de solutés à différentes échelles spatiales et temporelles Application aux sols d'une vallée aménagée de Basse-Casamance (Sénégal). 5èmes Journées Nationales de l'Étude des Sols, pédogénèse et altération - Approches géochimiques, ORSTOM, pp. 215-217.

MONTOROI J.P., RIEU M., 1987. Calcul des activités dans une solution aqueuse. Programme « ACTIVE » pour IBM-PC et compatibles. Cahiers de l'ORSTOM, série pédologie, Vol.13, n°2, pp. 133-150.

MOUGENOT B., 1993. Effets des sels sur la réflectance et la télédétection des sols salés. Cah. ORSTOM, ser. Pédol., vol. VVIII, pp.45-54.

MUNNS R., 2002. Comparative physiology of salt and water stress. Plant, Cell and Environment, Vol.25, n°2, pp.239-250.

NEZLI I.E., ACHOUR S., DJABRI L., 2007. Approche géochimique des processus d'acquisition de la salinité des eaux de la nappe phréatique de la basse vallée de L' OuedMya (Ouargla). Larhyss/Journal, n° 06, pp. 121-134.

REFERENTIEL PEDOLOGIQUE, 2008. Association française pour l'étude du sol, Ed Quæ, France, 435p.

SAIDI D., LE BISSONNAIS Y., DUVAL O., DAOUD Y., HALITIM A., 2004. Effet du sodium échangeable et de la concentration saline sur les propriétés physiques des sols de la plaine du Cheliff (Algérie). Étude et Gestion des Sols, Vol.11, n°2, pp.81-92.

SALIM M., TESSIER D., 1998. Evolution des propriétés physiques et physico-chimiques de sols salés de la basse vallée de l'Euphrate (Syrie). Etudes et gestion des sols, n°3, pp. 277-288.

SERVANT J. M., 1976. Sur quelques aspects de la pédogénèse en milieu halomorphe : l'exemple des sols salés de la région méditerranéenne française. Annales de l'Institut National Agronomique, Vol. 6, n°1, pp. 225-245.

SHAH S., A., SHAH Z., 2011. Change in soil microbial characteristics with elevated salinity. Sarhad J. Agric. Vol.27, n°2, pp.233- 244.

SIMLER R., 2012. Manuel pour DIAGRAMMES. 40p.

SLAMA F., 2004. La salinité et la production végétale. Ed. Centre de publication universitaire, Tunis, 163p.

TOUAF L., 2002. Evaluation du niveau de salinité des sols du Nord de l'Algérie. Mémoire de magister, INA, EL Harrach (Alger), 71 p.

U.S. SALINITY LABORATORIE Staffe, 1954. Diagnostic and improvement of saline and alkali soils. U.S.D.A. Hardbook, n° 60, 160p.

WORLD REFERENCE BASE FOR SOIL RESOURCES, 2006. A framework for international classification, correlation and communication, 128p.

ZIZA F. Z., 2006. Evolution de la salinité des sols irrigués dans une région saharienne. Mémoire de magister, INA, EL Harrach (Alger), 105p.