

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE
EL-HARRACH - ALGER
المدرسة الوطنية العليا للفلاحة
الحراش - الجزائر

THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat
en Sciences Agronomiques

Spécialité : Science du sol

THEME

**CONTRIBUTION DE LA LOGIQUE FLOUE À LA CLASSIFICATION
DES SOLONCHAKS DU NORD DE L'ALGÉRIE.
APPORT DU SYSTÈME D'INFÉRENCE DE MAMDANI**

Présentée par : HADJ MILOUD Samir

Devant le jury:

Président du jury :	M. DAOUD Y.	Professeur
Directeur de thèse :	M. DJILI K.	Professeur
Examineurs :	M. DJAMAI R.	Professeur
	M. BENSLAMA M.	Professeur

Le/...../2019

Année Universitaire 2018-2019

Dédicaces

A la mémoire de mon père Djilali

A ma mère

A ma femme

A mes enfants

A mes frères et sœurs.

A toute ma famille.

A tous mes amis.

A tous ceux qui m'ont aidé à élaborer
ce travail.

Je dédie ce modeste travail
Samir

Remerciements

Je remercie Dieu de m'avoir donné la force et la patience pour la réalisation de cette thèse.

Avant d'exposer ce travail, je tiens à remercier toute personne qui de près ou de loin a contribué à la réalisation de ce mémoire et en particulier :

M. DAUD Y., professeur au département de science du sol à l'ENSA d'El – Harrach, qui m'a fait l'honneur de présider ce jury. Aussi, je lui suis très reconnaissant pour l'aide précieuse qu'il m'a prodiguée tout au long de ce travail. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

M. DJILI K., professeur au département science du sol à l'ENSA d'El – Harrach, à qui j'adresse mes vifs remerciements, pour avoir accepté de diriger cette thèse, pour son aide, sa disponibilité, ses conseils très utiles, sa patience et ses directives qui m'ont permis de mener à terme ce travail.

M. DJAMAI R. et BENSLAMA M. professeurs à l'université de Annaba, je les remercie pour avoir accepté de juger ce travail ainsi que pour leurs critiques constructives, à plus d'un titre.

je n'oublierai jamais mon père (Rabi yarmouk) pour son aide et ses conseils très utiles, pour la réalisation de ce travail.

Mes plus profonds remerciements vont également à :

A l'ensemble des enseignants (es) du département de science du sol, qui ont contribué à ma formation.

Sans oublier tous les techniciens du département (Redouane, Amar, Ahmed et Abdelrahim).

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à mes amis Louadj, Djemel, Iddir et Benidir qui m'ont aidé dans la traduction du texte.

Résumé

La classification et la cartographie des sols sont au cœur de l'enjeu pour la gestion durable des sols et l'agriculture de précision. L'utilisation des systèmes experts basés sur la logique floue constitue une avancée notable dans ce domaine. Cette recherche a été conduite afin de mieux cerner les liens taxonomiques des sols affectés simultanément par la salinité, le calcaire et le gypse comme c'est souvent le cas des Solonchaks d'Algérie. L'expérimentation, basée sur le système flou de Mamdani (MFIS), a été menée sur 194 Solonchaks références d'Algérie pour déterminer leur degré d'appartenance aux Calcisols et aux Gypsisols selon les critères définis par WRB. La salinité des sols étant un paramètre fluctuant dans le temps, MFIS a été appliqué également à 4 Solonchaks situés dans la région de Rélizane pour cerner leurs éventuelles variations taxonomiques saisonnières. Les résultats obtenus, basés sur la détermination des Indices Solonchaks (Is), Calcisols (Ic) et Gypsisols (Ig), ont montré que les 194 Solonchaks références se subdivisent en Solonchaks (61 %), Calcisols (1 %), Gypsisols (0,5 %), intergrades Solonchaks-Calcisols (29 %), intergrades Solonchaks-Gypsisols (5 %) et en intergrades Solonchaks-Calcisols-Gypsisols (2 %). Les statistiques ont mis en évidence des relations significatives entre Is, Ic et Ig pris séparément et les critères diagnostiques de WRB (sauf pour l'épaisseur des horizons). Les relations statistiques entre Is, Ic et Ig pris deux à deux sont également significatives. Ces résultats mettent en évidence que MFIS est analogue à WRB mais, qu'en plus, il quantifie le degré d'appartenance entre les groupes de sols et leurs intergrades. Le suivi saisonnier des 4 Solonchaks de Rélizane a mis en évidence que, aussi bien en fin de saison humide ou en fin de saison sèche, la salinité des sols (CE) est toujours forte, le complexe adsorbant est dominé par Na et le faciès chimique de la solution du sol est toujours de type chloruré-sodique. Toutefois, CE et ESP sont moins forts en période humide ($6,55 \text{ dS/m} < \text{CE} < 64,1 \text{ dS/m}$; $9,5 \% < \text{ESP} < 39 \%$) qu'en période sèche ($9,24 \text{ dS/m} < \text{CE} < 164,8 \text{ dS/m}$; $15,56 \% < \text{ESP} < 47,37 \%$). L'application de MFIS a montré que la classification de ces sols est en faveur des Solonchaks quelle que soit la saison considérée ($I_s > I_c > I_g$) avec des valeurs de Is plus fortes en période sèche ($0,49 < I_s < 0,83$) qu'en période humide ($0,27 < I_s < 0,50$). Les indices Ic et Ig étant relativement faibles et constants quelle que soit la période considérée ($0,18 < I_c < 0,25$; $0,15 < I_g < 0,17$), MFIS rapproche les Solonchaks des Calcisols et des Gypsisols en période humide et il les en éloigne en période sèche. En conclusion, MFIS s'est avéré un outil efficace pour déterminer et quantifier avec précision les groupes taxonomiques des Solonchaks références d'Algérie. Il mérite d'être appliqué à d'autres sols considérés individuellement ou simultanément. Au plan pratique, MFIS peut contribuer à mieux classer les sols d'Algérie et donc à mieux les cartographier pour les besoins d'une agriculture de précision performante.

Mots clés : logique floue, MFIS, WRB (2014), Solonchak, Calcisol, Gypsol, salinité, critères diagnostiques, classification.

يعتبر كلا من تصنيف وإنشاء خرائط الترب كعاملين أساسيين في التسيير الدائم للترب والزراعة الدقيقة. يعد استعمال الأنظمة الخبيرة والتي تعتمد على الم منطق الغامض في هذا الميدان بمثابة تقدم كبير. لقد تم إجراء هذا البحث لغرض فهم الروابط التصنيفية للترب المتأثرة بالملوحة والمصحوبة عادة بتواجد كلا من الكلس والجبس، كما هو الحال عادة بالنسبة للترب المالحة الجزائرية. تعتمد تجربتنا على نظام فلو لاماداني، أين قمنا بإجرائها على 194 تربة مالحة مرجعية في الجزائر وذلك لتحديد درجات الانتماء للترب الكلسية والجبسية وذلك حسب المعايير المحددة من تصنيف الترب التابع لمنظمة الأغذية والزراعة (WRB). باعتبار أن ملوحة التربة من الخواص المتغيرة مع الزمن، فقد قمنا بتطبيق اسد تدلال الغامض MFIS كذلك على 4 ترب مالحة متواجدة في منطقة غليزان وذلك لتحديد التغيرات التصنيفية الموسمية. بينت النتائج المتحصل عليها، والتي تعتمد على تحديد مؤشرات الترب المالحة (Is) و الترب الكلسية (Ic) و الترب الجبسية (Ig)، أنه يمكن توزيع التربة مالحة المرجعية والتي تبلغ 194 تربة إلى: 61 % ترب مالحة، 1% ترب كلسية، 0.5% ترب جبسية، 29 % بينية مالحة-كلسية، 0.5% بينية مالحة-جبسية و 2 % مالحة-كلسية-جبسية. كما بينت النتائج الإحصائية أنه يوجد علاقات لها دلالة بين مختلف مؤشرات الترب المالحة (Is, Ic, Ig) وكذا بين هذه المؤشرات والمعايير التشخيصية للتصنيف الترب المستعمل (WRB) (يستثنى من ذلك سمك الأفق). مكننا النتائج المتحصل عليها من الاستدلال بأن MFIS مكافئة لل WRB، زيادة على ذلك فهي تمكننا من حساب درجات الانتماء بين المجموعات وبيئاتها. بينت المتابعة الموسمية للترب المالحة التابعة لغليزان أن ملوحة التربة تكون دائما مرتفعة، كما أن معقد الادمصاص يغلب عليه عنصر الصوديوم، بينما تكون الخصائص الكيميائية لمحلول التربة من النوع كلوري-صودي وذلك سواء في نهاية الفترة الرطبة أو الجافة. من جهة أخرى فإن الناقلية الكهربائية ونسبة الصوديوم المتبادل يكونان أقل ارتفاعا في الفترة الرطبة منه في الفترة الجافة ($9,24 \text{ dS/m} < \text{CE} < 164,8 \text{ dS/m}$; $15,56 \% < \text{ESP} < 47,37 \%$). إن تطبيق نظام MFIS يبين أن تصنيف الترب يكون في صالح الترب المالحة ($I_s > I_c > I_g$) وذلك في كلتا الفترتين الجافة أو الرطبة، غير أن قيم I_s تكون أكثر ارتفاعا في الفترة الجافة ($0,49 < I_s < 0,83$) منه في الفترة الرطبة ($0,27 < I_s < 0,50$). من جهة أخرى فقد بينت النتائج أن قيم مؤشري الترب المالحة I_c و I_g تكون نسبيا ضعيفة وثابتة وذلك في الفترة الجافة والرطبة ($0,17 < I_g < 0,15$; $0,25 < I_c < 0,18$)، حيث أن MFIS يقرب الترب المالحة إلى الترب الكلسية والترب الجبسية في الفترة الجافة ويباعدها منها في الفترة الرطبة. يمكن أن نستنتج أن MFIS يعتبر أداة فعالة تمكننا من تحديد وحساب بدقة المجموعات التصنيفية للترب المالحة المرجعية في الجزائر، كما يجدر بنا استعمال هاته التقنية على ترب أخرى بشكل فردي أو متعدد. من الجانب التطبيقي، فإن نظام MFIS يساهم في تحسين تصنيف الترب في الجزائر وبالتالي يسهل عملية إنشاء الخرائط الخاصة بها وذلك لتلبية حاجيات الزراعة الدقيقة الفعالة.

الكلمات المفتاحية: الم منطق الغامض, WRB (2014), MFIS, المعايير التشخيصية, ملوحة, الترب المالحة, الترب الكلسية, الترب الجبسية, ص د ي ف

Abstract

Soil classification and Soil mapping is essential tool in the sustainable soil management and precision farming. Decision support systems based upon fuzzy logic constitute a major advancement in this field of research. The aim of this research is to better understand the taxonomic links of soils affected simultaneously by salinity, calcium carbonate and gypsum as is often the case in the Solonchaks of Algeria. The experimentation, has been conducted on 194 reference Solonchak of Algeria using Mamdani-type fuzzy inference system (MFIS) in order to determine their degree of membership to Calcisols , Gypsisols according to diagnostic criteria of WRB. Because soil salinity vary strongly between season, MFIS has been applied to four Solonchak in Relizane region (West of Algeria) to identify possible seasonal taxonomic variation. based on the determination of Solonchak (Is), Calcisol (Ic) and Gypsisol (Ig) indices, the results obtained show that 194 Solonchaks are subdivided on Solonchaks (61 %), Calcisols (1 %), Gypsisols (0,5 %), intergraded Solonchaks-Calcisols (29 %), intergraded Solonchaks-Gypsisols (5 %) and intergraded Solonchaks-Calcisols-Gypsisols (2 %). The results show on one hand a significant correlation between Is, Ic, and Ig taken separately and diagnostic criteria of WRB (except for the thickness of the horizons), and in the other hand a significant correlation between Is, Ic and Ig taken in pairs. These results show that MFIS is analogous to WRB and it also quantifies the degree of membership between the soil group and their intergrades. The seasonal monitoring the soil salinity has shown that, both at the end humid season and at the end of dry season, the soil salinity expressed as EC of saturated paste is always high, the adsorbent complex is dominated by Na (ESP High), and the chemical facies of the soil solution is always sodium chloride type. However, the EC and ESP of soil are less pronounced in humid season ($6,55 \text{ dS/m} < \text{EC} < 64,1 \text{ dS/m}$; $9,5 \% < \text{ESP} < 39 \%$) than in dry season ($9,24 \text{ dS/m} < \text{CE} < 164,8 \text{ dS/m}$; $15,56 \% < \text{ESP} < 47,37 \%$). The application of MFIS has shown that the classification of these soils is in favor of Solonchaks whatever the season ($\text{Is} > \text{Ic} > \text{Ig}$) with higher values of Is in the dry season ($0,49 < \text{Is} < 0,83$) than in humid season ($0,27 < \text{Is} < 0,50$). The Ic and Ig indices are relatively weak and constant whatever the season ($0,18 < \text{Ic} < 0,25$; $0,15 < \text{Ig} < 0,17$), MFIS brings Solonchaks closer to Calcisols and Gypsisol in humid season and separate them away in dry season. In conclusion, MFIS has proven to be an effective tool for accurately identifying and quantifying the taxonomic groups of the reference Solonchak in Algeria. It deserves to be applied to other soils an to help in the

improvement of soil classification in Algeria and thus better map them for the need of precision farming.

Keywords: Fuzzy logic, MFIS, WRB (2014), Solonchak, Calcisol, Gypsisol, salinity, diagnostic criteria, classification

Liste des figures

Figure 1. Carte de localisation des Solonchaks (extrait de la carte 1/500 000 (Hadj Miloud, 2010))	8
Figure 2. Fonction d'appartenance d'un ensemble non-flou et fonction d'appartenance d'un ensemble flou	17
Figure 3. Fonction de type sigmoïdale	18
Figure 4. Fonction de type triangulaire	19
Figure 5. Fonction de type trapézoïdale	19
Figure 6. Opérateur NON	20
Figure 7. Opérateur ET	20
Figure 8. Opérateur OU	21
Figure 9. Schéma de base du raisonnement par la logique floue	21
Figure 10. La méthodologie de l'inférence floue	22
Figure 11. Principe de l'inférence par la méthode min-max	23
Figure 12. Exemple d'inférence max-min de Mamdani	24
Figure 13. Méthode du centre de gravité	26
Figure 14. Diagramme des fonctions d'appartenance de 4 variables linguistiques : densité, résistance à la pénétration, capacité d'air et la conductivité hydraulique	28
Figure 15. Répartition latérale d'une valeur optimale liée à la distribution dans le paysage de deux types de sols de couleurs différentes, raisonnement par la logique booléenne	30
Figure 16. Répartition latérale d'une valeur optimale liée à la distribution dans le paysage de deux types de sols de couleurs différentes, raisonnement par la logique floue	30
Figure 17. Modèle flou pour la détermination des sols salés	32
Figure 18. Fonction d'appartenance d'un ensemble flou pour un pH alcalin et un pH non-neutre	33
Figure 19. Carte de localisation des Solonchaks étudiés	35
Figure 20. Schéma de base du raisonnement par MFIS	37
Figure 21. Fonction d'appartenance des variables d'entrée	39
Figure 22. Fonction d'appartenance des variables de sortie	40
Figure 23. Exemple de règles d'inférence	42
Figure 24. Exemple d'application de l'inférence par la méthode min-max	43
Figure 25. Exemple de la méthode du centre de gravité	43
Figure 26. Carte de situation des périmètres irrigués de la région de Rèlizane	45
Figure 27. Localisation des profils	48
Figure 28. Diagramme ombrothermique de la station de Rèlizane (1988-2007)	47
Figure 29. Histogramme des fréquences des indices	53
Figure 30. Classification des sols par MFIS	54
Figure 31. Histogramme des fréquences des groupes d'indices	55
Figure 32. Répartition Fréquentiels des groupes de sols et leurs intergrades	56
Figure 33. Histogramme des fréquences des groupes de sols et leurs intergrades	57
Figure 34. Relation entre la conductivité électrique et I_s	59
Figure 35. Relation entre I_g et la teneur en gypse	59

Figure 36. Relation entre Ic et la teneur en CaO3 total	60
Figure 37. Relation entre Is et Ic	61
Figure 38. Relation entre Is et Ig	62
Figure 39. Relation entre Ig et Ic	63
Figure 40. Profils salins (1^{er} campagne)	70
Figure 41. Répartition des cations dans la solution du sol (1^{er} campagne)	71
Figure 42. Répartition des anions dans la solution du sol (1^{er} campagne)	72
Figure 43. Faciès chimiques des solutions du sol (1^{er} campagne)	73
Figure 44. ACP effectuée sur neuf variables (1^{er} campagne)	74
Figure 45. Profil salin des quatre profils (2^{eme} campagne)	80
Figure 46. Répartition des cations dans la solution du sol (2^{eme} campagne)	81
Figure 47. Répartition des anions dans la solution du sol (2^{eme} campagne)	82
Figure 48. Faciès chimique des solutions du sol (2^{eme} campagne)	83
Figure 49. ACP effectuée sur neuf variables (2^{eme} campagne)	84
Figure 50. Profil salin des quatre profils (3^{eme} campagne)	89
Figure 51. Répartition des cations dans la solution (3^{eme} campagne)	90
Figure 52. Répartition des anions dans la solution du sol (3^{eme} campagne)	91
Figure 53. Faciès chimiques des solutions du sol (3^{eme} campagne)	92
Figure 54. ACP effectuée sur neuf variables (3^{eme} campagne)	93
Figure 55. Profil salin des quatre profils (4^{eme} campagne)	98
Figure 56. Répartition des cations dans la solution du sol (4^{eme} campagne)	97
Figure 57. Répartition des anions dans la solution du sol de la (4^{eme} campagne)	98
Figure 58. Faciès chimiques des solutions du sol (4^{eme} campagne)	99
Figure 59. ACP effectuée sur neuf variables (4^{eme} campagne)	100
Figure 60. Relation entre CE et Na⁺	106
Figure 61. Relation entre CE et Mg⁺⁺	107
Figure 62. Relation entre CE et Ca⁺⁺	108
Figure 63. Relation entre CE et Cl⁻	108
Figure 64. Relation entre CE et SO₄⁻	109
Figure 65. Relation entre CE et pH	110
Figure 66. Relation entre CE et l'ESP	111
Figure 67. Relation entre l'ESP et le SAR	112
Figure 68. Profils salins des saisons sèche et humide (2012)	116
Figure 69. Profils salins des saisons sèche et humide (2013)	118
Figure 70. Profils salins des saisons humides 2012 et 2013	119
Figure 71. Profils salins des saisons sèches 2012 et 2013	121
Figure 72. Classification des profils par MFIS	126

Liste des tableaux

Tableau I : Classification et répartition des Solonchaks par région	7
Tableau II : Statistiques descriptives des critères diagnostique	9
Tableau III : Caractéristiques des horizons diagnostiques des Solonchaks étudiés	36
Tableau IV : Grandeurs physiques utilisées pour les trois groupes de sols	37
Tableau V : Caractéristiques des horizons diagnostiques des solonchaks étudiés	38
Tableau VI : Grandeurs physiques	39
Tableau V : Précipitations moyennes mensuelles et annuelles de la station de Rèlizane pour la période (1988 – 2006)	36
Tableau VI : Moyennes mensuelles des températures (°C) de la station de Rèlizane pour la période (1988 – 2006)	36
Tableau VII : Evapotranspiration potentielle moyenne en mm, établie selon la formule PENMAN (18 ans) (Station ONM de Rèlizane pour la période (1988-2006))	47
Tableau IX : Paramètres statistiques des indices des trois sols	52
Tableau X : Corrélations entre Is, Ic, Ig et les critères diagnostiques	58
Tableau XI : Relations entre Is, Ic et Ig	67
Tableau XII : Résultats analytiques des constituants des sols (1^{er} campagne)	67
Tableau XIII : Garniture cationique du complexe adsorbant (1^{er} campagne)	68
Tableau XIV: Résultats analytiques et statistiques de la solution des sols (1^{er} campagne)	69
Tableau XV: Corrélations entre les différents paramètres chimiques et les facteurs (1^{er} campagne)	75
Tableau XVI: Contribution des différents paramètres chimiques dans la formation des facteurs (1^{er} campagne)	75
Tableau XVII : Matrice de corrélation entre les différents paramètres chimiques (1^{er} campagne)	76
Tableau XVIII : Garniture cationique du complexe adsorbant (2^{eme} campagne)	78
Tableau XIX: Résultats analytiques et statistiques de la solution des sols (2^{eme} campagne)	79
Tableau XX: Corrélations entre les différents paramètres chimiques et les facteurs (2^{eme} campagne)	84
Tableau XXI: Contribution des différents paramètres chimiques dans la formation des facteurs (2^{eme} campagne)	85
Tableau XXII : Garniture cationique du complexe adsorbant (3^{em} campagne)	87
Tableau XXIII: Résultats analytiques et statistiques de la solution des sols (3^{em} campagne)	88
Tableau XXIV : Corrélations entre les différents paramètres chimiques et les facteurs (3^{em} campagne)	92
Tableau XXV : Contribution des différents paramètres chimiques dans la formation des facteurs (3^{em} campagne)	93
Tableau XXVI : Matrice de corrélation entre les différents paramètres chimiques (3^{em} campagne)	94
Tableau XXVII : Garniture cationique du complexe adsorbant (4^{eme} campagne)	96
Tableau XXVIII: Résultats analytiques et statistiques de la solution des sols (4^{eme} campagne)	97
Tableau XXIX : Corrélations entre les différents paramètres chimiques et les facteurs (4^{eme} campagne)	102
Tableau XXX : Contribution des différents paramètres chimiques dans la formation des facteurs (4^{eme} campagne)	103
Tableau XXXI : Matrice de corrélation entre les différents paramètres chimiques (4^{eme} campagne)	103
Tableau XXXII. Corrélations entre CE et les différents paramètres chimiques	105
Tableau XXXIII : L'écart et vitesse de salinisation moyenne des profils entre la saison humide et la saison sèche de la période 2012	117

Tableau XXXIV : Ecart et vitesses de salinisation moyennes des profils entre la saison humide et la saison sèche de la période 2013	120
Tableau XXXV: L'écart et vitesse de salinisation moyenne des profils entre la saison humides 2012 et la saison humide 2013	120
Tableau XXXVI : Ecart et vitesses de salinisation moyennes des profils entre la saison sèche 2012 et la saison sèche 2013	122
Tableau XXXVII : Résultats obtenus par MFIS	126
Tableau XXXVIII : Paramètres statistiques des indices des trois sols références	126
Tableau XXXIX : Résultats du test statistique de Kruskal-Walis	127
Tableau I : Classification obtenue par MFIS	143
Tableau I. Ecart de la CE entre la saison sèche et humide (2012) du profil 1	145
Tableau II. Ecart de la CE entre la saison sèche et humide (2012) du profil 2	145
Tableau III. Ecart de la CE entre la saison sèche et humide (2012) du profil 3	145
Tableau IV. Ecart de la CE entre la saison sèche et humide (2012) du profil 4	145
Tableau V. Ecart de la CE entre la saison sèche et humide (2013) du profil 3	145
Tableau VI. Ecart de la CE entre les saisons humides (2012 et 2013) du profil 1	146
Tableau VII. Ecart de la CE entre les saisons humides (2012 et 2013) du profil 2	146
Tableau VIII. Ecart de la CE entre les saisons humides (2012 et 2013) du profil 3	146
Tableau IX. Ecart de la CE entre les saisons humides (2012 et 2013) du profil 4	146
Tableau X. Ecart de la CE entre les saisons sèches de 2012 et 2013 du profil 1	146
Tableau XI. Ecart de la CE entre les saisons sèches de 2012 et 2013 du profil 2	147
Tableau XII. Ecart de la CE entre les saisons sèches de 2012 et 2013 du profil 3	147
Tableau XIII. Ecart de la CE entre les saisons sèches de 2012 et 2013 du profil 4	147

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
------------------------------	---

PARTIE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : 1. Les Solonchaks du nord de l'Algérie

Introduction	6
1. Les Solonchaks du nord de l'Algérie	6
2. Les Gypsisols de l'Algérie	9
3. Les Calcisols de l'Algérie	10
4. Les Solonchaks de Rélizane	12

CHAPITRE II : Principe et application de la logique floue

1. La logique floue	16
2. Les systèmes experts à base de logique floue	26
3. Utilisation de la logique floue en science du sol	26
4. Les limites de la logique floue	33

PARTIE II : MATERIEL ET METHODE

CHAPITRE I : Application de MFIS aux Solonchaks du nord de l'Algérie

1. Matériels et méthodes	35
1.1. Matériel	35
1.2. Méthodologie	36
2.1. La prise de décisions	37
1.3. Interprétation des indices	44

CHAPITRE II : Application de MFIS sur la Variation taxonomique temporelle des Solonchaks de Rélizane

1.2. Présentation de la région d'étude	45
2. Méthodologie	48
2.1. Les méthodes d'analyse au laboratoire	49
2.3. Application de MFIS	50

PARTIE III : RESULTATS ET DISCUSSION

CHAPITRE I : Classification des Solonchaks du nord de l'Algérie par MFIS

1. Analyse des résultats	52
1.2. Degré d'appartenance entre les sols étudiés	54
2. Relations entre les indices des sols obtenus par MFIS et les critères diagnostiques de WRB	58
3. Discussion	63

CHAPITRE II : Classification temporelle des Solonchaks de Rélizane par MFIS

1. Les Solonchaks de Rélizane	66
1.1. Première campagne	66
1.2. Deuxième campagne	77
1.3. Troisième campagne	86
1.4. Quatrième campagne	96
2. Relations entre CE et les paramètres chimiques des Solonchaks étudiés	105
2.1. Relation entre CE et les cations de la solution du sol	105
2.2. Relation CE et les anions de la solution du sol	108
2.3. Relation pH-CE	110
2.4. Relations CE-ESP	110
2.5. Relation entre SAR et ESP	111
3. Discussion des résultats	112
4. Evolution saisonnière de la salinité	114
4.1. Les profils salins de la même année	114
4.2. Comparaison des profils salins entre les saisons humides 2012 et 2013	119
4.3. Comparaison des profils salins entre les saisons sèches 2012 et 2013	121
5. Discussion	122
6. Classification des profils par MFIS	125

6.1. Classification saisonnière des profils	127
CONCLUSION GENERALE	130
Bibliographique	133
Annexe 1	143
Annexe 2	145

Introduction Générale

Introduction générale

La classification des sols est un moyen commode de communication des résultats de recherche sur les sols aux niveaux national et international (Shi et al., 2010 ; Zádorová et Penížek, 2011). Cependant, les techniques d'organisation hétérogènes des systèmes de classifications, le choix du système de classification utilisé et le nombre restreint de travaux publiés sur la question rendent difficile le transfert de l'information des données et des résultats (Hartemink, 2015). Cette difficulté est accentuée par le fait que les classifications hiérarchisées se basent souvent sur des critères différents pour classer les sols d'où l'apparition d'une pléiade de classifications nationales des sols comme les classifications australienne (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, 2015), canadienne (Soil Classification Working Group, 1998) ou française (CPCS, 1967) entre autres. En revanche, les référentiels pédologiques (Baize et Girard, 1995 ; Baize et Girard, 2008, Iuss Working Group WRB, 2014), du fait qu'ils réduisent le nombre de niveaux hiérarchiques, atténuent ces difficultés et représentent une amélioration importante par rapport aux classifications hiérarchisées (Duchaufour, 1998). Ces deux types de classification sont les plus utilisés. Cependant, du fait que le sol s'insère dans un continuum écologique, les classifications conventionnelles se heurtent à des difficultés majeures qui nécessitent un choix, souvent contestable (Duchaufour, 1998), entre les caractères de base et leur importance relative à la hiérarchie des unités taxonomiques.

Actuellement, l'union internationale de la science du sol promeut le développement d'une classification universelle (FAO, 2017a) dans laquelle tous les sols du monde trouvent une place dans sa hiérarchisation. Les résultats préliminaires suggèrent que les approches objectives et pédométriques puissent soutenir le développement d'un tel système universel de classification des sols (Michéli et al., 2016). Les systèmes de classification numérique tels que le calcul de la distance taxonomique (Carré et Jacobson, 2009), le C-moyenne floue (fuzzy k-means) (McBratney et Degruijter, 1992 ; Heil et al., 2019 ; Zeraatpisheh et al., 2019), le réseau de neurone artificiel (Taborda Silveira, 2013), la logique floue (Ostovari et al., 2015) et l'association de ces dernières (Zare Abyaneh et al., 2016) tentent d'être des classifications objectives qui se basent sur les différences réelles entre les sols par des calculs mathématiques. L'approche numérique a été abordée par Rayner (1966) et Moore

(1972). Son objectif principal est de minimiser les variations intragroupes et de maximiser les variations intergroupes selon des critères objectifs (FAO, 2017b). Les approches numériques peuvent traiter simultanément un grand nombre de propriétés du sol (McBratney et al., 2002). Elles facilitent l'intégration des classes de sols aux technologies d'agriculture de précision.

La World Reference Base for Soil Resources (WRB), issue de la légende de la carte des sols du monde, a été privilégiée par l'union internationale de la science du sol et l'union européenne en tant que système de corrélation entre les sols (Jones et al., 2005). Elle définit les différents groupes de sols références en termes d'horizons, de propriétés et de matériaux diagnostiques, chaque critère étant quantitatif et bien différencié. Certaines études ont montré que WRB, comparativement à soil taxonomie (USDA, 1999), est mieux adaptée pour classer les sols calcaires (Esfandiarpour et al., 2013) et les sols gypseux (Toomanian et al., 2003 ; Mojiri et al., 2011). De même, le 16^{ème} Congrès Mondial de la science du sol (Jamagne, 1999), a recommandé de renforcer les méthodes classiques de cartographie (et donc de classification des sols) par d'autres méthodes, telles que la logique floue et l'intelligence artificielle pour évaluer les incertitudes inhérentes à l'utilisation des cartes.

La logique floue s'est largement répandue ces dernières années en s'introduisant dans beaucoup de domaines scientifiques, y compris celui de la science du sol. Elle a pour objectif de traiter l'incertitude due à l'imprécision (Zimmermann, 2001). Les systèmes flous appartiennent à la classe des systèmes à base de connaissance ou systèmes experts. Leur principal but consiste à implanter un savoir-faire humain, ou des règles linguistiques, par un programme informatique. La logique floue offre un formalisme mathématique à des concepts linguistiques incertains. Cette méthode mathématique, qui se base sur la théorie des ensembles, a été introduite par Zadeh (1965) dans le domaine des mathématiques. Depuis, de nombreux travaux ont utilisé la logique floue pour l'étude des sols (Vliet et al., 2013; Elaalem, 2013 ; Sharififar et al., 2016 ; Demirel et al., 2018) et leurs classifications (Hughes et al., 2017). Il s'est avéré que cette méthode permet de créer des classes continues non-hiérarchisées définies par leurs centres de gravité (McBratney et Degruijter, 1992). La notion de sols intergrades a été reconnue de façon formelle en utilisant le concept des ensembles flous (McBratney et Odeh, 1997). Les algorithmes à base de cette méthode

peuvent estimer le nombre des sols intergrades (Hughes et al., 2014). L'association de la logique floue à d'autres techniques tel que le réseau de neurones artificiels (neuro-fuzzy inference system) (Zare-Abyaneh et al., 2016) est actuellement utilisée dans l'élaboration des modèles de prédiction des propriétés du sol (Verma et al., 2009 ; Fajardo et al., 2015). De nombreux auteurs estiment que cette théorie a un grand potentiel en science du sol (McBratney et Odeh, 1997). L'utilisation de cette théorie permet de substituer la variable booléenne, qui est mal adaptée à la présentation de la plupart des phénomènes naturels, par des concepts linguistiques qui seront transformés en langage multi-valeurs (Ross, 1995 ; Mazaheri et al., 1997).

Les deux systèmes d'inférence floue (Fuzzy Inférence Système) utilisés dans différentes applications sont ceux de Mamdani (1977) et de Takagi et Sugeno (1985). L'utilisation du système d'inférence floue de Mamdani (MFIS) est indiquée dans le domaine des sciences de l'environnement comme l'irrigation (Zhang et Guo, 2018), la pédologie (Ostovari et al., 2015) et l'écologie (Guoliang et al., 2017). Ce système est intuitif et son acceptation est très répandue. Il est bien adapté à la connaissance humaine (Mamdani, 1977 ; Ekkehard et Warner, 1999 ; Yuanyuan Chai et al., 2009). MFIS sera utilisé dans la présente recherche.

La salinité des sols présente une variabilité spatio-temporelle forte et une saisonnalité marquée (FAO, 2002). D'après USSL (1954), l'évolution de la salinité est influencée par le climat, la qualité des eaux d'irrigation, la déficience du drainage et le niveau piézométrique de la nappe. La salinité de la solution du sol augmente lorsque le sol se dessèche (FAO, 2002). La variation temporelle de la salinité pourrait provoquer un changement dans la taxonomie de ces sols, surtout s'ils renferment en plus d'autres sels comme le calcaire et le gypse. Dans les milieux arides et semi-arides de l'Afrique du Nord, les accumulations calcaires sont fréquemment associées à celles du gypse et des sels solubles (Djili, 2000). Dans de nombreux cas, les sols sont en même temps salés, calcaires et gypseux (Durand, 1954 ; Durand, 1963 ; Pouget, 1968 ; Ruellan, 1976 ; Mathieu et al., 1976 ; Halitim, 1985 ; Halitim, 1988 ; Djili, 2000 ; Hamdi-Aïssa, 2001). L'application de WRB aux sols d'Algérie a montré qu'elle rend parfois mal compte de la réalité du terrain, surtout lorsque la similitude entre deux groupes de sols est forte comme c'est le cas des Solonchaks et des Gypsisols étudiés par Rahmouni (2010). Dans les faits, ce chevauchement entre ces deux

groupes peut éventuellement constituer un sol intergrade. Le premier objectif de cette recherche consiste donc à utiliser MFIS pour déterminer le degré d'appartenance de 194 Solonchaks références du nord de l'Algérie aux Calcisols et aux Gypsisols en se basant sur les critères définis par WRB (2014).

A une échelle plus réduite, les études réalisées dans la région de Rélizane (Boulaine, 1956 ; Daoud, 1983 ; Daoud et al., 1993 ; Saidi, 2004 ; Douaoui, 2005 ; Hadj Miloud, 2010 ; Ait Mechedal, 2014 ; Saoud, 2014) ont montré que le niveau de la salinisation secondaire, qui est très hétérogène, contribue à l'extension spatio-temporelle de la salinité des sols. Néanmoins, la plupart de ces travaux ont relégué au second plan les aspects de classification de ces Solonchaks, leur degré d'appartenance aux autres types de sols, et leurs éventuelles variations taxonomiques saisonnières. Ainsi, le deuxième objectif de cette recherche est de combler ce déficit par l'application de MFIS aux Solonchaks de la région de Rélizane pour cerner leur éventuelle variation taxonomique saisonnière et pour calculer leur degré d'appartenance vis-à-vis des Calcisols et des Gypsisols selon les critères établis par WRB (2014).

Pour ce faire, ce document est structuré en trois parties :

- La première partie est une étude bibliographique constituée de deux chapitres :
 - Le chapitre I est une synthèse de différents travaux réalisés sur les Solonchaks du nord de l'Algérie et, avec plus de détails, ceux de Rélizane. L'état des connaissances sur les propriétés et la classification de ces sols est mis en évidence.
 - Le chapitre II est dédié au développement du raisonnement de base de la logique floue et son application en science du sol.
- La deuxième partie explicite la méthodologie adoptée pour la réalisation de ce travail. Cette partie est scindée en deux chapitres :
 - Le chapitre I explicite la méthodologie adoptée et le matériel utilisé pour l'application du système expert MFIS sur les Solonchaks du nord de l'Algérie.
 - Le chapitre II est réservé à la présentation de la région de Rélizane et la méthodologie utilisée pour l'étude de la variation taxonomique temporelle de ses Solonchaks.

- La troisième partie est consacrée à la présentation et à la discussion des résultats obtenus, elle comprend également deux chapitres :
 - Le chapitre I est une analyse et discussion des résultats obtenus par MFIS sur les Solonchaks du nord de l'Algérie.
 - Le chapitre II, quant à lui, est une analyse et discussion des résultats obtenus sur l'évolution saisonnière de la salinité et l'application de MFIS sur les Solonchaks de Rélizane.

Ce document se termine par une conclusion qui reprend les principaux résultats et les suites à donner à cette recherche.

Première partie

Synthèse bibliographique

Chapitre I : Les Solonchaks du nord de l'Algérie

Introduction

Les superficies de terres affectées par la salinisation dans le monde sont estimées à environ 400 millions d'hectares (Bot et al., 2000). La salinisation des sols, qui est un problème agricole et environnemental, a des conséquences parfois irréversibles sur les propriétés physico-chimiques des sols. Elle affecte essentiellement la dégradation de la structure du sol. L'altération de ces propriétés limitent la croissance et la productivité des plantes (Allakhverdiev et al., 2000). En Algérie, sur les six millions et demi d'hectares cartographiés, un million d'hectares environ est constitué de sols salés (Chabane et Benreda, 1997). L'analyse statistique de 2172 horizons de sols situés dans le nord de l'Algérie (Touaf, 2002) a montré qu'environ 25 % des horizons sont salés à excessivement salés et que 28 % sont sodiques à excessivement sodiques ($ESP \geq 15 \%$). Il ressort de cette étude que la salinité et la sodicité sont des phénomènes fréquents dans les sols du nord de l'Algérie.

Les sols salés appartiennent dans leur grande majorité au groupe des Solonchaks selon les critères diagnostiques de WRB. En Algérie, ce type de sols se localise surtout dans les régions arides et semi-arides (Hadj Miloud, 2010), mais peut être rencontré partout où les conditions de la station permettent une accumulation des sels dans le sol.

Dans le cadre de cette étude, nous présentons d'abord une synthèse générale des travaux réalisés sur les Solonchaks du nord de l'Algérie et, ensuite, nous aborderons en détail les Solonchaks de Rélizane.

1. Les Solonchaks du nord de l'Algérie

Dans une précédente recherche (Hadj Miloud, 2010), nous avons compilé dans une base de donnée les données morphologiques et analytiques de 750 profils de sols du nord de l'Algérie pour en extraire ceux qui répondent à la définition des Solonchaks selon les critères de WRB (voir chapitre I, deuxième partie). Les résultats obtenus ont révélé que 89 profils remplissent les conditions exigées par WRB pour être classés comme Solonchaks. Ces 89 Solonchaks ont été par la suite regroupés en 19 références.

1.1. Les Solonchaks références du nord de l'Algérie

Les adjectifs "Calcic" et "Gypsic" affectés aux 19 références de Solonchaks recensées (tableau I) signifient que la salinité de ces sols est souvent associée au calcaire et au gypse. Ainsi, le

tableau I montre que 86 % de ces références sont particulièrement marqués par le calcaire et que 16 % le sont par le gypse. Il révèle aussi que 12 % des références contiennent simultanément du calcaire et du gypse.

Tableau I. Classification et répartition des Solonchaks par région

Solonchaks références	Classification (WRB)	(%)	Régions
Réf 1	Calcic Solonchak (Clayic)	18	BATNA, M'SILA, MEDEA,
Réf 2	Calcic Solonchak (Clayic, Sodique)	13	OUM EL BOUAGHI, M'SILA, DJELFA, EI BAYADH, BISKRA, BATNA
Réf 3	Calcic Solonchak	10	TIARET, M'SILA, DJELFA, RELIZANE, EL BAYADH
Réf 4	Hypersalic Calcic Solonchak (Clayic)	10	BORDJ BOUARRERIDJ, BISKRA, RELIZANE, MOSTAGANEM, AIN-TEMOU, MASCARA, SETIF
Réf 5	Hypersalic Calcic Solonchak (Sodique)	10	BISKRA, ANNABA, MOSTAGANEM
Réf 6	Hypersalic Calcic Solonchak	7	GUELMA, KHENCHELA, BISKRA, M'SILA, SIDI BEL ABES, AIN-TEMOU
Réf 7	Hypersalic Calcic Gypsic Solonchak	6	TIARET, M'SILA, DJELFA, EL BAYADH
Réf 8	Hypersalic Calcic Gypsic Solonchak (Sodique)	4	OUM EL BOUAGHI, BISKRA, BATNA
Réf 9	Calcic Solonchak (Sodique)	4	BISKRA
Réf 10	Solonchak (Clayic)	4	EL BAYADH
Réf 11	Solonchak	3	CHLEF, TIARET
Réf 12	Hypersalic Calcic Solonchak (Clayic, Sodique)	2	BISKRA
Réf 13	Gypsic Solonchak	2	BISKRA, DJELFA
Réf 14	Hypersalic Solonchak	2	MASCARA
Réf 15	Gypsic Solonchak (Sodique)	1	BISKRA
Réf 16	Calcic Gypsic Solonchak	1	TIARET
Réf 17	Calcic Gypsic Solonchak (Clayic)	1	DJELFA
Réf 18	Hypersalic Gypsic Solonchak	1	DJELFA
Réf 19	Solonchak (Clayic, sodique)	1	ANNABA,

1.2. Localisation des Solonchaks

Les Solonchaks reconnus se cantonnent essentiellement dans cinq principales zones comme indiqué dans le tableau I et illustré par la figure 1.

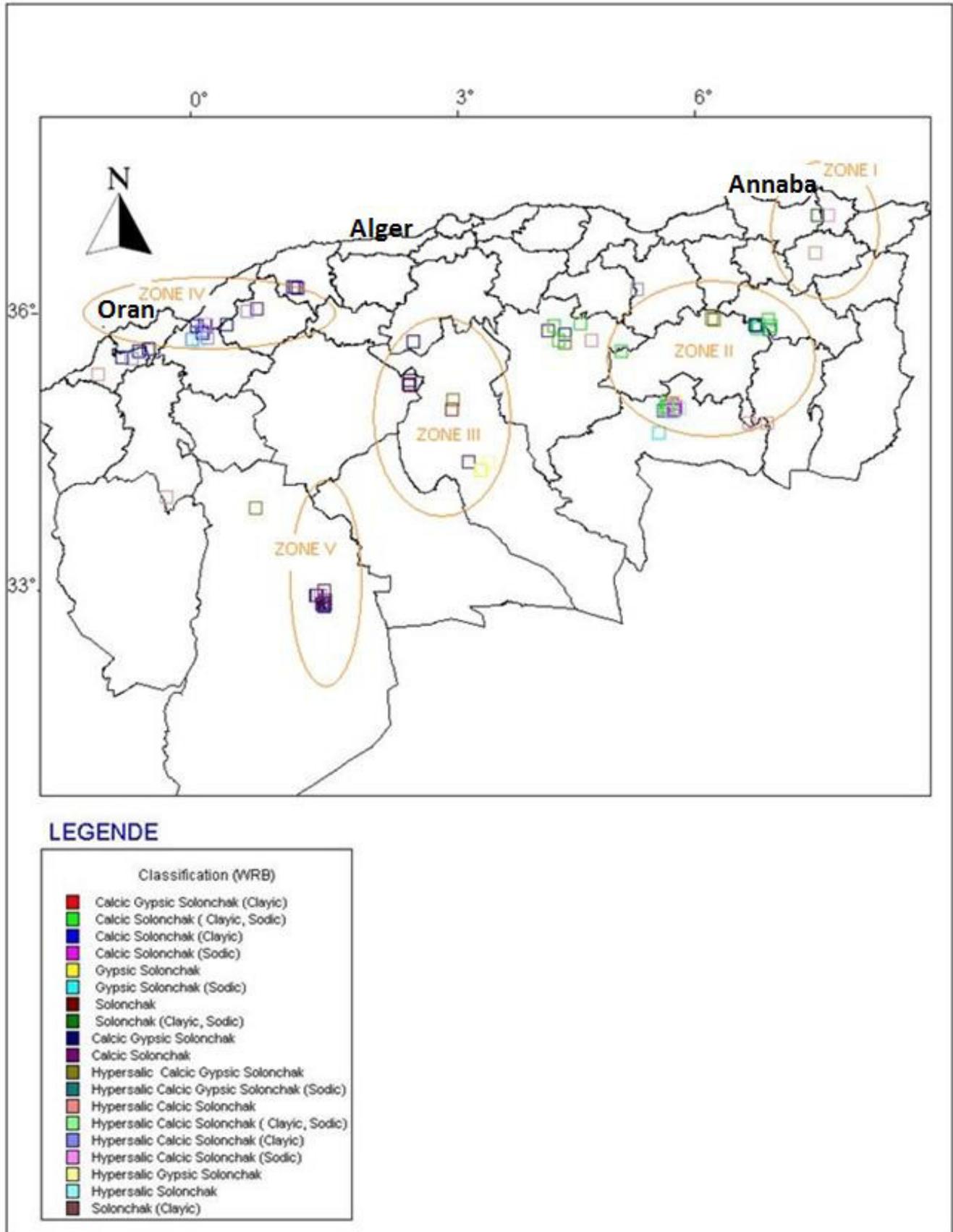


Figure 1. Carte de localisation des Solonchaks (extrait de la carte 1/500 000 (Hadj Miloud, 2010))

La figure 1 révèle que la localisation de ces Solonchaks dans le nord de l'Algérie ne semble pas être liée au climat. En effet, ils se situent aussi bien dans les régions humides (zone I) que dans les régions semi-arides (zone II, zone III et IV) ou dans les régions arides (zone V). Ceci démontre le caractère azonal de ce type de sols. Toutefois, cette figure révèle aussi une certaine tendance à la localisation dans les zones semi-arides et arides comme mentionné par de nombreux auteurs (Durand, 1983 ; Djili, 2000).

1.3. Caractéristiques des Solonchaks

Les Solonchaks étudiés (tableau II) se caractérisent par des épaisseurs de l'horizon diagnostique comprises entre 20 et 40 cm, des CE entre 16 et 70 dS/m et par des pH compris entre 7 et 8,9. Le produit $E \times CE$ est compris entre 697 et 7956. Ce résultat confirme que les sols étudiés sont effectivement des Solonchaks dans le sens de la définition WRB. Le tableau II montre que le coefficient de variation relatif à ces caractéristiques est élevé (C.V= 43 %), ce qui démontre une très forte variabilité des critères diagnostiques. Les teneurs en $CaCO_3$ sont très variables (C.V = 56 %) et se situent entre 1,2 % et 67,6 % (tableau II). Les teneurs en gypse sont particulièrement très variables (C.V = 115 %). Elles varient entre moins de 1 % et 73 %. Seul le pH des horizons diagnostiques est peu variable (C.V= 5 %).

Tableau II : Statistiques descriptives des critères diagnostique

Critères	E (cm)	CE (dS/m)	$E \times CE$	pH	$CaCO_3$ (%)	Gypse (%)
Maximum	200	70	7956	8,9	67,6	73
Minimum	41	16	697	7	1,2	0,07
Moyenne	103	33	3291	7,81	23,62	9,5
C.V(%)	43	48	56	5	56,05	115

Les tableaux I et II révèlent que les Solonchaks de l'Algérie sont parfois marqués par des teneurs assez élevées en calcaire et en gypse. Cette caractéristique suggère que les Solonchaks se rapprochent sur le plan taxonomique des Calcisols et des Gypsisols. De ce fait, il s'avère donc utile, dans le cadre de cette recherche, de présenter les principales caractéristiques pédologiques et taxonomiques des Gypsisols et des Calcisols d'Algérie.

2. Les Gypsisols de l'Algérie

En Algérie, les sols gypseux s'étalent sur environ 7966 km², soit sur 3,3 % de la superficie totale du pays, et ils représentent 12,2 % de la surface totale des sols gypseux du monde (FAO, 1990).

2.1. Caractéristiques des horizons diagnostiques des Gypsisols

Rahmouni (2010) a étudié 73 profils répondant aux critères de classification des Gypsisols selon WRB. Elle a révélé que 39,5 % des horizons diagnostiques sont des horizons Hypo-gypsiques du fait que leurs teneurs en gypse sont inférieures à 25 % et qu'ils se situent à moins de 100 cm de profondeur. L'épaisseur moyenne de ces horizons avoisine 33 cm. Toutefois, les résultats ont révélé une forte variabilité de ces deux paramètres en regard de leurs coefficients de variation qui sont de l'ordre de 68 % et 53 % respectivement pour les taux de gypse et l'épaisseur des horizons. CE des horizons diagnostiques des principaux Gypsisols références se situe entre 2,2 et 20 dS/m, et les teneurs en calcaire varient entre 6,2 et 35 %.

2.2. Les principaux Gypsisols références

Rahmouni (2010) a déterminé 47 Gypsisols références sur la base des 73 profils de Gypsisols. Les Gypsisols références les plus importants sont les Gypsic Salic [Endogleyic] Gypsisol (Sodic, Aridic, Arénic, Siltic) (36,17%), les Gypsic [Endogleyic] Salic Calcic Gypsisol (Sodic, Aridic, Siltic) (19,14 %), les Gypsic Salic [Endogleyic] Luvic Gypsisol (Sodic, Aridic, Siltic, Clayic) (10,63 %), les Gypsic Salic Calcic Luvic Gypsisol (Sodic, Aridic, Siltic, Clayic) (5 %), les Gypsic [Endogleyic] Gypsisol (Sodic, Aridic, Arénic, Siltic) (16,66 %), Gypsic [Endogleyic] Calcic Gypsisol (Sodic, Aridic, Siltic, Clayic) (12,40 %).

Les principaux qualificatifs retenus pour ces Gypsisols références sont les qualificatifs Salic (70,94 %) et Calcic (36,54%). De même, 24,14 % des Gypsisols comportent en même temps les qualificatifs Calcic et Salic. Ceci démontre clairement que ces Gypsisols sont parfois salés, parfois calcaires et parfois en même temps salés et calcaires. Ces caractéristiques rapprochent sur le plan taxonomique les Gypsisols étudiés des Solonchaks et des Calcisols.

3. Les Calcisols de l'Algérie

Les sols calcaires sont très fréquents en Algérie. Ils se localisent aussi bien dans les zones arides et semi arides (Halitim, 1988) que dans les zones humides et subhumides (Djili et al., 1999). Ils sont généralement classés comme sols peu évolués, calcimagnésiques et isohumiques par CPCS (1967), comme Inceptisols (Xerochrepts), Aridisols (Argids) ou encore Mollisols (Rendolls et Xerolls) par Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1967) et comme Calcisols par WRB mais avec des intergrades avec d'autres groupes (Préfixe Calcic).

3.1. Caractéristiques des horizons diagnostiques des Calcisols

Salah (2012), qui a étudié 243 horizons diagnostiques calciques issus de 165 Calcisols, a trouvé que les épaisseurs des horizons diagnostiques varient de 15 à 80 cm et les teneurs en CaCO_3 de 15 % à 89 %. Ce résultat signifie que les deux principales propriétés diagnostiques de l'horizon calcique (épaisseur et teneur en calcaire) sont très variables ($C.V > 40 \%$). De ce fait, les Calcisols étudiés sont très diversifiés, aussi bien sur le plan morphologique que sur le plan analytique.

3.2 Classification et répartition des Calcisols références

Selon Salah (2012), les Calcisols les plus répandus en Algérie sont les Hypocalcic Calcisols (Clayic) (22 %) suivis par les Hypocalcic Calcisol (17 %), les Calcic Calcisols (11 %), les Hypocalcic Calcisol (Sodic) (10 %) et les Calcisols (Clayic) (10 %). Tous les autres Calcisols références sont peu à très peu représentés (1 à 5 %). Toutefois, Salah (2012) a regroupé ces Calcisols en quatre grandes références :

- Les Hypocalcic Calcisols (horizon diagnostique : $\text{CaCO}_3 < 25 \%$ et commençant à moins de 100 cm de la surface du sol) sont les plus courants (58 %). Cette référence se localise essentiellement dans la partie la plus septentrionale de l'Algérie.
- Les Calcic Calcisols sont également assez fréquents (27 %), ils constituent presque un tiers des Calcisols. Cette référence peut se rencontrer aussi bien au nord qu'au sud du nord de l'Algérie.
- Les Hypercalcic Calcisols (horizon diagnostique : $\text{CaCO}_3 > 50 \%$ et commençant à moins de 100 cm de la surface du sol) sont assez fréquents (13 %), ils se localisent surtout dans les régions méridionales du nord de l'Algérie.
- Les Petrocalcic Calcisols (horizon diagnostique induré) sont très peu fréquents (3 %) et ils se localisent surtout dans les milieux arides et semi-arides.

Il ressort de l'étude de Salah (2012) que les Calcisols références étudiés ne semblent pas affectés ni par la salinité, ni par la présence du gypse. Ce résultat peut se justifier pour la majorité des Calcisols situés dans les zones humides et subhumides là où la lixiviation du gypse et des sels solubles est intense. Par contre, dans les autres zones climatiques, le climat sec et évaporant favoriserait l'accumulation du gypse et des sels solubles dans le profil en fonction des conditions locales de la pédogenèse. Ce phénomène ne ressort pas dans l'étude de Salah (2012) probablement à cause de la structure de sa base de données qui n'a considéré que les propriétés

diagnostiques des horizons calciques, reléguant au second plan les autres caractéristiques des sols étudiés.

Quoi qu'il en soit, il s'est avéré que les Solonchaks du nord de l'Algérie sont diversement pourvus en calcaire et en gypse. Ainsi, sur le plan taxonomique, ces Solonchaks pourraient se rapprocher des Calcisols ou des Gypsisols, éventuellement, se rapprocher simultanément des deux références.

4. Les Solonchaks de Rélizane

Les sols de la région de Rélizane sont fréquemment affectés par les sels solubles, surtout dans les zones les plus basses. Cette salinité est une salinité primaire due à la nature des alluvions qui sont initialement riches en sels solubles, ou éventuellement une salinité secondaire provoquée par la qualité médiocre des eaux d'irrigation et la faible profondeur de la nappe d'eau salée (INSID, 2006). La salinisation secondaire a provoqué une augmentation des superficies salines et une modification du profil salin selon les saisons.

4.1. Morphologie et constituants des sols

Dans une précédente étude, Hadj Miloud (2010) a montré que les Solonchaks de Rélizane sont des sols profonds de type A/B/C et qu'ils sont marqués par une structure très grossière et dégradée en profondeur. Ces sols sont souvent vertiques (larges fentes de retrait) et ils se caractérisent parfois par des accumulations salines sous forme de taches blanchâtres dans la partie médiane du profil et par de nombreuses taches d'oxydoréduction surtout à la base du sol. Cependant, les teneurs en gypse sont faibles et ses valeurs moyennes varient entre 1 et 2,6 % (Hadj Miloud, 2010). Elles oscillent entre 2,16 et 5,6 % au niveau de la partie Sud de la Mina (Gacem, 2014). Globalement, le gypse est très faiblement représenté dans cette région (Douaoui, 2005). La distribution du calcaire dans le profil est généralement homogène et ses teneurs moyennes varient entre 15 % et 17 % (Hadj Miloud, 2010 ; Gacem, 2014). D'une manière générale, ces sols se caractérisent par une stabilité structurale moyenne à médiocre (Haddaj, 1970 ; Derdour, 1981 ; Daoud, 1983 ; Saidi, 1992 ; Saidi, 2004 ; Hadj Miloud, 2010).

La texture de ces sols est variée mais elle est dominée principalement par la classe limono-argileuse et secondairement par la classe argilo-limoneuse (Durand, 1954 ; Halitim, 1973 ; Daoud et al., 1993 ; Saidi 2004 ; Douaoui, 2005). Ceci signifie que la texture est souvent fine ce qui intensifie (Mouhouche et Boulassel, 1999) et accélère (Masmoudi, 2003) la salinisation des sols lors de l'irrigation par des eaux de mauvaises qualités. Daoud et Halitim (1994) rapportent que de

sévères problèmes peuvent être causés aux plantes à cause de la salinité, surtout dans les sols à texture fine.

4.2. Le complexe adsorbant

La CEC varie entre 7 et 24 cmol(+)/kg avec une moyenne de 16 cmol(+)/kg (Hadj Miloud, 2010). Le même auteur a révélé que Ca^{++} est le cation dominant sur le complexe adsorbant, il varie entre 8 et 56 %. Il est suivi par Mg^{++} (38 %) et Na^+ (65 %). K^+ se situe en dernière position (< 7 %). La configuration du complexe adsorbant est de type $\text{Ca}^{++} > \text{Mg}^{++} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ ou de type $\text{Ca}^{++} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{++} > \text{K}^+$. Cette configuration est en relation avec la composition ionique de la solution du sol qui serait assez riche en Na^+ .

4.3. La solution du sol

Les travaux réalisés dans la région (Daoud, 1993 ; Saidi 2004 ; Douaoui, 2005 ; Hadj Miloud 2010 ; Ait Mechedal 2014) ont montré aussi que Na^+ (27 à 56 %) et Ca^{++} (20 et 60 %) sont toujours les cations les plus abondants dans la solution du sol. Mg^{++} est relativement abondant (16 % en moyenne) et K^+ est le moins bien représenté (6 % en moyenne). Ces mêmes travaux ont montré que la composition anionique de la solution du sol est dominée par Cl^- (56 %) et SO_4^{--} (36 %) et que les bicarbonates sont très peu représentés (9 % en moyenne).

Le faciès chimique dominant est de type chloruré sodique. Ces sols évoluent donc selon la voie saline neutre à dominante chlorurée (Marlet et Job, 2006). Les autres faciès chimiques présents dans la région sont de type chloruré calcique, chloruré magnésien et chloruré sans dominance de l'un des cations.

4.4. Situation actuelle de la salinité dans la région de Rélizane

Le niveau de la salinité dans cette région est très hétérogène, il varie en fonction de plusieurs paramètres tels que les caractéristiques des sols, les pratiques culturales, la qualité des eaux d'irrigation, l'état des drains et la profondeur de la nappe salée.

D'après Hadj Miloud (2010), les niveaux de salinité des Solonchaks les plus salés de la région sont de l'ordre de :

- 44 à 86 dS/m dans le périmètre de la Mina ;
- 32 à 143 dS/m à El Gaâ ;
- 3,6 à 50 dS/m à Hmadna.

Les fortes concentrations de sodium dans la solution du sol ($\text{Na}^+ > 20 \text{ meq/l}$) ont fortement impacté les valeurs de l'ESP ($8 \% < \text{ESP} < 56 \%$).

Saoud (2014) a montré que les sols d'El Hmadna sont marqués par une forte salinité, surtout en profondeur (7 à 56 dS/m) avec un pourcentage de 3 % pour la classe très salin, et 97 % pour la classe extrêmement salin. Il a montré aussi que le niveau de salinité est nettement plus hétérogène en surface par rapport aux couches profondes du sol.

4.5. Evolution temporelle de la salinité dans la région de Rélizane

D'après Ait Mechedal (2014), l'évolution temporelle de la salinité des sols entre 1956 et 2012 est variable selon les profils et les horizons considérés. La comparaison des profils salins dans le Bas-Cheliff a révélé trois situations :

- La salinité a augmenté dans la plupart des sols étudiés 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 certains sols ;
- La salinité a diminué en 2012, dans une partie restreinte des sols étudiés, comparativement à 1956.

L'évolution de la salinité des sols sur un épisode de 57 ans a mis en évidence l'importance de l'efficience du réseau de drainage dans le déterminisme du sens de variation du niveau de salinité des sols du Bas-Cheliff. Par ailleurs, cette étude a conclu que la salinisation des sols du Bas-Cheliff est relativement hétérogène, elle peut atteindre des niveaux de salinité très élevés variant de 0,72 à 51,7 dS/m, 85 % des échantillons étudiés ayant une CE > 4 dS/m.

D'après Gacem (2015), le suivi de l'évolution temporelle de la salinité des sols dans la Mina, à travers une cartographie répétée à deux périodes de l'année, fin de l'hiver (Juin) et fin de l'été (Novembre), a montré que la moyenne de CE du profil salin est passée de 18,4 dS/m au mois de Juin à 21,2 dS/m au mois de Novembre, soit une augmentation de l'ordre de 15,21 %.

Le suivi de la salinité réalisé par Saidi (2004), pendant plusieurs campagnes de mesures au niveau de la rive droite de l'oued Mina, a montré que sur une période de 15 ans, la classe de salinité 7-16 dS/m qui représentait 29 % de la superficie étudiée en 1985 est passée à 42 % et que la classe de salinité 0-4 dS/m est passée de 9 % à 3 %. La classe de salinité supérieure à 16 dS/m a augmenté d'une manière remarquable, surtout vers le Nord Est.

4.6. Classification des Solonchaks

L'étude des Solonchaks références dans les zones les plus salées de la région de Rélizane (Hadj Miloud, 2010) a révélé l'existence de deux références de Solonchaks.

- Le premier Solonchak référence est un Hypersalic Solonchak (Sodic, Chloridic, Gleyic, Clayic).
- Le deuxième Solonchak référence est un Hypersalic Vertic Solonchak (Sodic, Chloridic, Gleyic, Clayic).

Selon la carte pédologique réalisée par Boulaine (1957), les sols salés de la région sont dénommés :

- Solontchaks inertes avec accumulation des sels en surface ou en profondeur ;
- Solontchaks vifs (horizon de surface à structure micropolyédrique en pseudo-sables durant l'été pouvant être parfois hydromorphes) ;
- Solontchaks vifs défloculés (dispersés en surface) ;
- les Hyposolonchaks et les Eosolonetz des lunettes érodées.

D'une manière générale, les sols salins à complexe sodique (CPCS, 1967) sont très fréquents dans la région (Durand, 1956 ; Mc Donald et BNEDER, 1990 ; Douaoui, 2004 ; Saidi, 2004).

Conclusion

La synthèse des différents travaux permet de conclure que les Solonchaks, Calcisols et Gypsisols sont très diversifiés. Ceci est démontré par le nombre important de suffixes et préfixes retenus pour ces sols. De même, il existe plusieurs qualificatifs communs (Salic, Gypsic et Calcic) entre ces sols. De ce fait, il s'avère que les Solonchaks, les Calcisols et les Gypsisols de l'Algérie présentent un certain degré de similitude entre eux et par conséquent, ils peuvent se rapprocher ou même interférer sur le plan taxonomique.

D'autres travaux ont mis en évidence que la salinité des sols dans la région de Rélizane ne cesse de progresser. De ce fait, l'augmentation des teneurs en sels dans ces sols provoque une dégradation des propriétés physiques et chimiques des sols. Les conséquences de cette dégradation est la diminution de la fertilité des sols qui entraîne une réduction des rendements des cultures.

En générale, les Solonchaks de l'Algérie sont diversement pourvus en calcaire et en gypse. De même, la variation saisonnière affecte le niveau de salinité de ces sols. De ce fait, la variation de la salinité dans le temps, ainsi que la richesse de ces sols en gypse et en calcaire pourraient avoir des répercussions sur la taxonomie de ces Solonchaks.

Chapitre II : Principe et application de la logique floue

Introduction

La logique floue suscite un intérêt grandissant auprès des chercheurs et des industriels pour formaliser des méthodes empiriques, généraliser des modes de raisonnements naturels, et construire des systèmes artificiels effectuant des tâches habituellement prises en charge par l'Homme. En effet, la logique floue a été introduite dans différents domaines pour approcher le raisonnement humain à l'aide d'une représentation adéquate des connaissances (Liliana, 2002). Son intérêt réside dans la capacité de l'Homme à décider d'agir de façon pertinente malgré le flou des connaissances disponibles (Zadeh, 1965 ; Sugeno et al., 1988).

Aujourd'hui, les outils d'analyses utilisés en science du sol sont complétés par une nouvelle technologie (Hartemink et al., 2013). Ainsi, d'autres méthodes mathématiques s'ajoutent à ces outils tels que le réseau de neurones artificiel, les algorithmes génétiques et la logique floue (McBratney et al., 2003). C'est cette dernière que nous présentons en détail dans ce chapitre.

1. La logique floue

L'utilisation de la logique floue (fuzzy logic) s'est largement répandue ces vingt dernières années en s'introduisant dans beaucoup de domaines scientifiques tels que la robotique (Tamakawa, 1986), l'irrigation (Rajaprakash et al., 2017) et la science du sol (McBratney et Odeh, 1997 ; Triantafilis et al., 2001 ; McBratney et al., 2002). La logique floue s'appuie sur le fait qu'il existe des phénomènes non mesurables ou non quantifiables d'où le problème de leur quantification.

Les systèmes flous appartiennent à la classe des systèmes à base de connaissances ou systèmes experts. Leur but principal consiste à implanter un savoir-faire humain par le biais des règles linguistiques dans un programme informatique. La logique floue offre un formalisme mathématique à des concepts linguistiques incertains (Liliana, 2002).

1.1. Principe de la logique floue

Cette méthode mathématique, qui se base sur la théorie des ensembles, a été introduite par Zadeh (1965). Le concept de la logique floue vient du constat que la variable booléenne, qui ne peut prendre que deux valeurs (vrai ou faux) est mal adaptée à la représentation de la plupart des phénomènes courants. Tandis que la logique classique considère qu'une proposition est soit vraie, soit fausse, la logique floue distingue une

infinité de valeurs de vérité (entre 0 et 1) (figure 2). Il s'agit donc d'une généralisation de la logique binaire à une logique multivaluée (Godjevac, 1999). L'idée de cette technique consiste à traiter l'incertitude due à l'imprécision (Zimmermann, 2001).

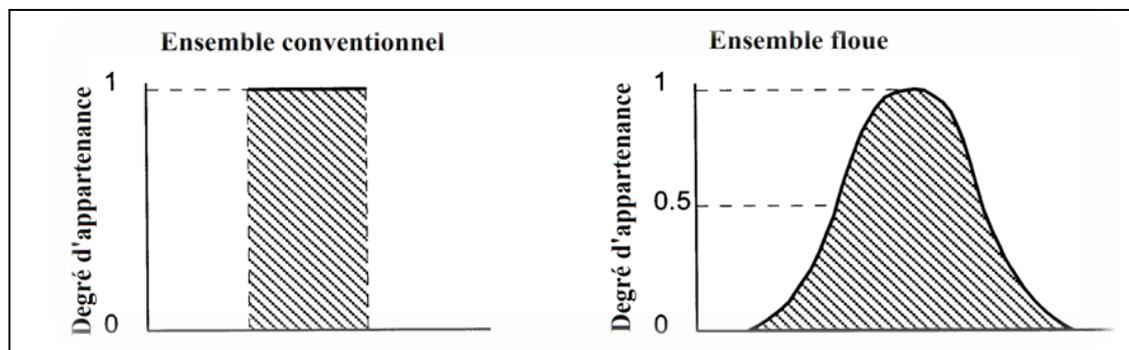


Figure 2. Fonction d'appartenance d'un ensemble non-flou et fonction d'appartenance d'un ensemble flou

1.2. Raisonnement en logique floue

Le raisonnement en logique floue a été consigné dans divers travaux (Zadah, 1965 ; Zadeh, 1978 ; Kaufmann et Gupta, 1991 ; McBratney et Odeh, 1997 ; McBratney et al., 2002 ; Zare Abyaneh et al., 2016 ; Guoliang et al., 2017 ; Zhang et Guo, 2018). C'est à partir de la synthèse de ces travaux que nous abordons ce raisonnement.

1.2.1. Ensemble flou et sous ensemble flou

Un ensemble est défini comme étant la collection d'éléments en relation avec un contexte donné. Un ensemble flou est la collection d'éléments telle que l'appartenance d'un élément quelconque à cet ensemble qui peut prendre des valeurs comprises entre 0 et 1. Un ensemble flou peut être subdivisé en sous-ensembles appelés sous-ensembles flous (Zadeh, 1965).

- **Nombre flou** : Un nombre flou Q est un sous-ensemble flou défini sur l'ensemble des nombres réels R . Il possède deux propriétés, il est normalisé et convexe.

Nous considérons un intervalle flou comme étant un nombre flou qui correspond à un intervalle dont les bornes sont connues de façon imprécise (Mokeddem, 2010).

- **Variable floue (variable linguistique)** : Si on considère une grandeur physique x , dire que x appartient à un certain ensemble flou revient à lui attribuer une propriété de définition imprécise linguistique : x est grand, petit, voisin de zéro, etc. La frontière d'un

tel ensemble est mal définie, si bien qu'un élément peut appartenir à la fois à un ensemble et à son complémentaire.

- **La fonction d'appartenance** : Elle décrit le degré d'appartenance d'une variable floue X à un sous ensemble flou A , elle est notée $\mu_A(X)$:

- Pour les ensembles classiques : $\mu_A(X) = 1$ si $X \in A$ et $\mu_A(X) = 0$ si $X \notin A$
- Pour un ensemble floue : $\mu_A(X) \in [0, 1]$ si $X \in A$ et $\mu_A(X) = 0$ si $X \notin A$

La fonction d'appartenance d'une variable linguistique peut être définie par différents types de fonctions mathématiques, comme les fonctions sigmoïdale (figure 3), triangulaire (figure 4) et trapézoïdale (figure 5). D'autres méthodes sont utilisées pour la dérivation des fonctions d'appartenances (Dubois et Prade, 1980).

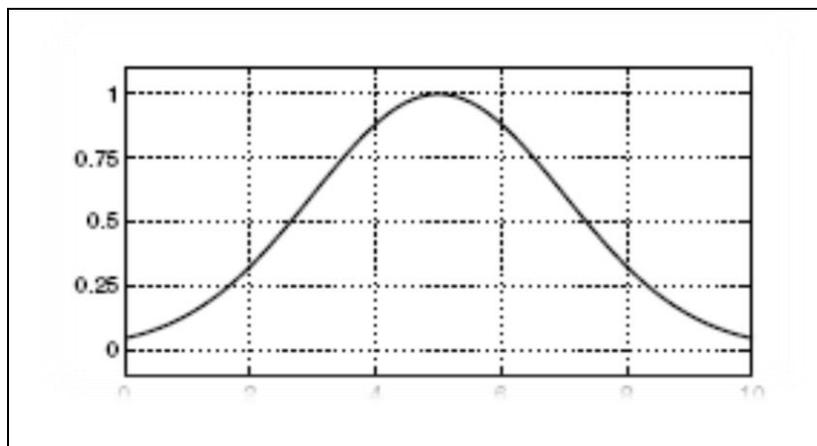


Figure 3. Fonction de type sigmoïdale

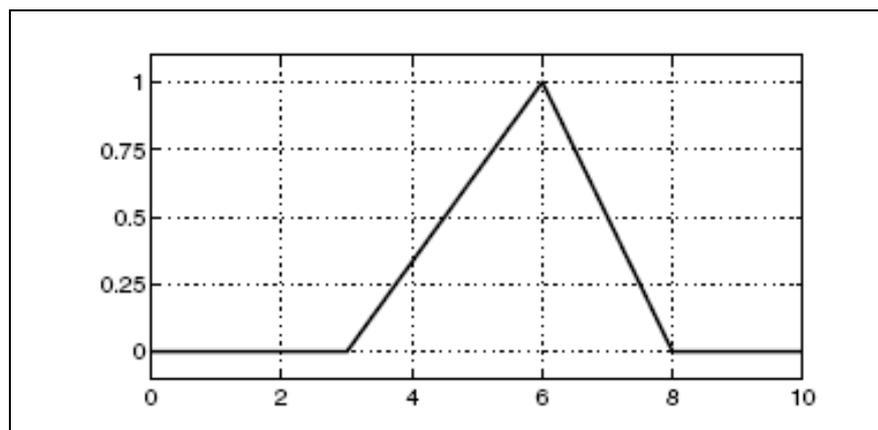


Figure 4. Fonction de type triangulaire

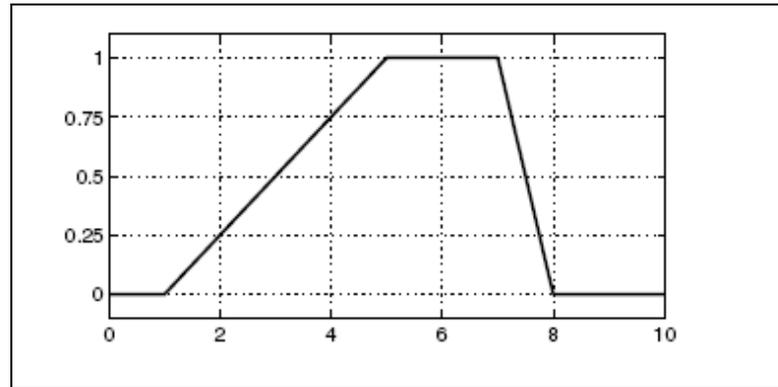


Figure 5. Fonction de type trapézoïdale

1.2.2. Les opérateurs de la logique floue

Les opérateurs de la logique floue (NON, ET et OU) sont appelés également opérateurs Zadah (Mokeddem, 2010). Ces opérateurs ont été abordés par Negoita (1985) et Klir et Folger (1988). Nous considérons que x , y et z sont des variables linguistiques et $\mu_A(x)$, $\mu_B(y)$ et $\mu_C(z)$ leurs fonctions d'appartenance associées respectivement aux ensembles A , B et C .

- **Opérateur NON** (figure 6) : l'opérateur NON est appelé également complément ou négation ou inverse. C'est le complément mathématique : $\mu_C(z) = \text{non}(\mu_A(x))$

$$\mu_C(z) = 1 - \mu_A(x)$$

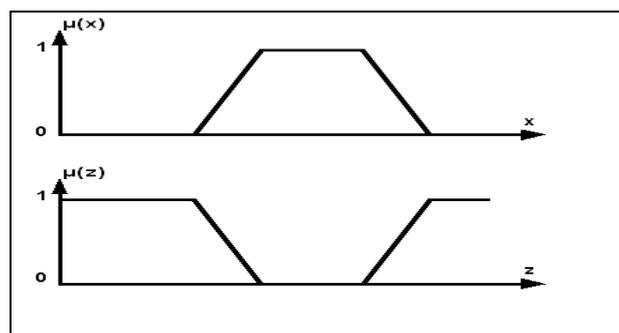


Figure 6. Opérateur NON

- **Opérateur ET** (figure 7) : La solution la plus simple et la plus utilisée pour caractériser la satisfaction simultanée de deux propriétés est de poser :

$$\mu_C(z) = \mu_A(x) \text{ ET } \mu_B(y) = \min \{ \mu_A(x), \mu_B(y) \}$$

Ainsi, nous parlons d'opérateur minimum (min), appelé aussi intersection (figure 7). Nous pouvons facilement vérifier que l'opérateur minimum est commutatif,

c'est à dire qu'il est possible d'invertir $\mu_A(x)$ et $\mu_B(x)$ sans que le résultat ne change. Cet opérateur peut être appliqué à plus de deux ensembles. Dans ce cas s'applique le théorème d'associativité.

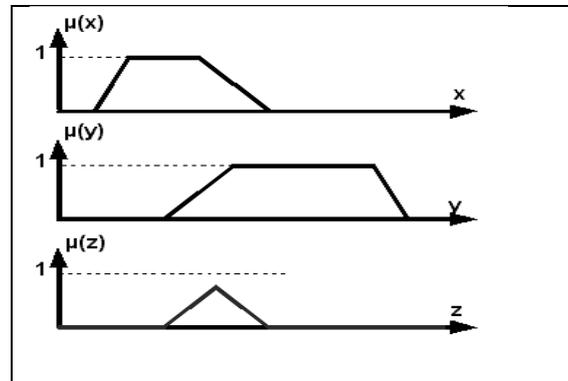


Figure 7. Opérateur ET

- **Opérateur OU** (figure 8) : La réalisation de l'opérateur OU au niveau de la logique floue se fait en général par la formation du maximum (max) appliquée aux fonctions d'appartenance $\mu_A(x)$ et $\mu_B(y)$ des deux ensembles A et B. Il s'agit donc de l'opérateur maximum (figure 8).

$$\mu_C(z) = \mu_A(x) \text{ OU } \mu_B(y) = \max \{ \mu_A(x), \mu_B(y) \}$$

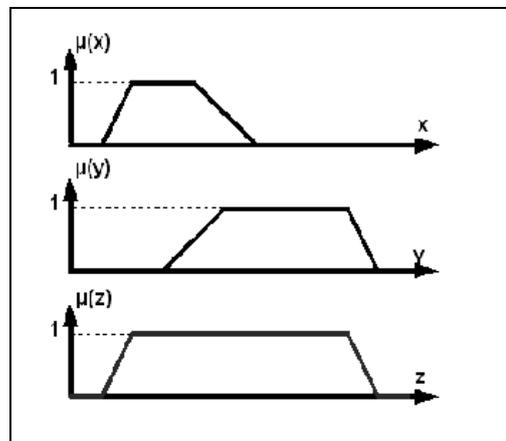


Figure 8. Opérateur OU

1.3. Processus de prise de décisions par la logique floue

Le raisonnement à base de logique floue se déroule en trois étapes, la fuzzification, l'inférence et la défuzzification comme illustré par la figure 9.

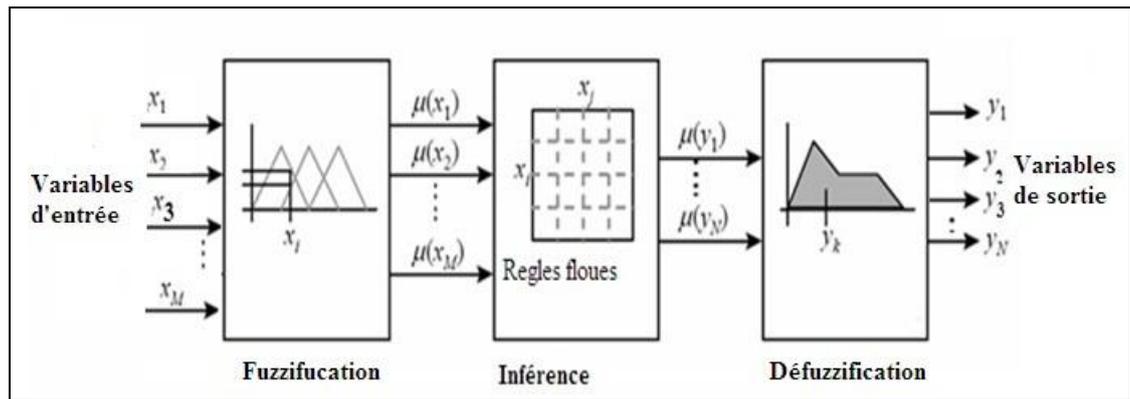


Figure 9. Schéma de base du raisonnement par la logique floue

1.3.1. La fuzzification

Dans le premier compartiment de la fuzzification, la procédure est la suivante :

- Définition des fonctions d'appartenance de toutes les variables : il faut choisir entre les fonctions sigmoïdale, triangulaire ou trapézoïdale. Cependant, le choix se fait selon le jugement de l'expert du domaine, si non, il faut procéder par tâtonnement. Par exemple, la forme rectangulaire est sélectionnée quand deux limites sont disponibles comme c'est le cas de l'étude de la conductivité hydraulique (Verma et al., 2009).
- Passage des grandeurs physiques (variables d'entrée) vers des variables linguistiques, par exemple « petite », « moyenne » ou « grande ».

Toutefois, l'utilisation des données non-floues et de l'hypothèse restrictive n'est pas nécessaire (Mamdani, 1977 ; Uyumaz et al., 2006 ; Ozger, 2009 ; Abraham et al., 2015) d'où des avantages majeurs de cette technique.

1.3.2. L'inférence floue (Base des règles)

Ce deuxième compartiment exprime la relation entre les variables d'entrée (exprimées comme variables linguistiques) et les variables de sortie (également exprimées comme variables linguistiques) par l'intermédiaire de règles. Les règles sont des conditions linguistiques prenant en compte l'expérience ou le savoir-faire acquis par une expertise, ou simplement des remarques de bon sens.

Les règles s'expriment sous forme de conditions (SI) combinées (ET, OU) (figure 10) pour aboutir à un résultat linguistique. Chaque règle a deux parties, une partie

antécédente (condition), exprimée par SI, et une partie conséquente (conclusion), exprimée par ALORS.

Exemple : SI conductivité électrique grande ET épaisseur de l'horizon salique grande ALORS Solonchak grand. Toutefois, il est possible de combiner plusieurs règles par l'opérateur OU ;

SI... ALORS OU SI... ALORS...

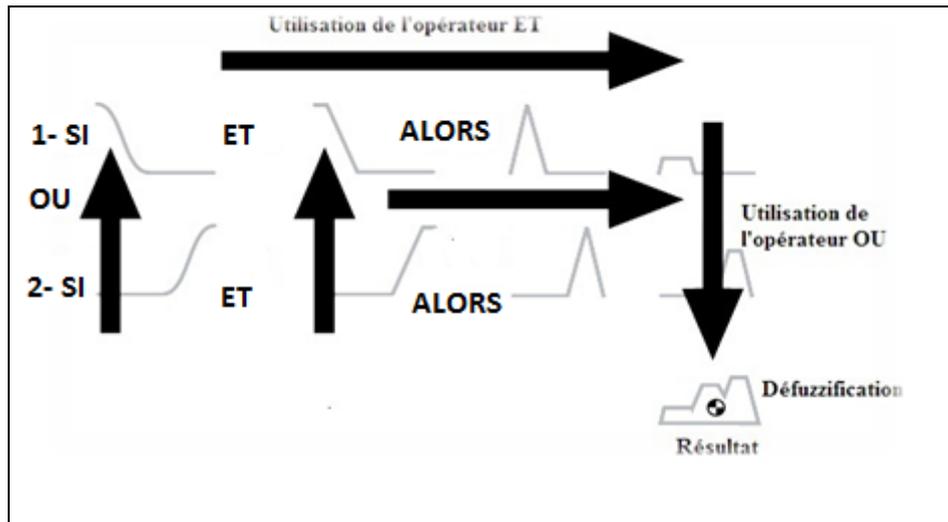


Figure 10. Méthodologie de l'inférence floue

Le résultat de l'inférence floue se calcule par plusieurs méthodes, la plus utilisée étant celle du min-max (Zadeh, 1965; Negoita, 1985; Klir et Folger, 1988). Dans cette méthode, un coefficient de pondération W_i (figure 11) qui dépend de la structure de la règle (combinaison entre OU, ET) est affecté à chaque règle d'inférence. Pour l'opération ET, nous utiliserons l'opérateur **min** et pour l'opération OU on utilise l'opérateur **max**. Ce coefficient est utilisé comme constante d'écrêtage de la fonction d'appartenance de la sortie.

Le résultat final est une union de la règle 1 avec la règle 2 et l'intersection des variables de chaque règle, comme explicité par la figure 11.

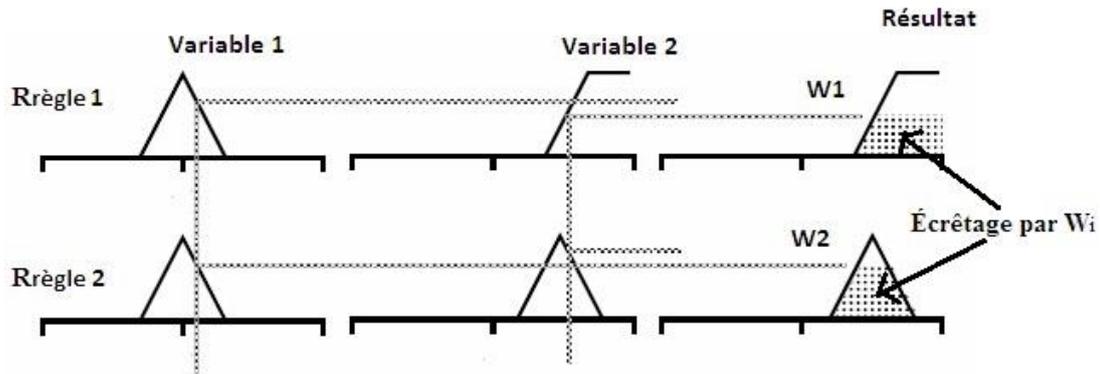


Figure 11. Principe de l'inférence par la méthode min-max

1.3.3. Les systèmes d'inférences

L'inférence floue n'est qu'une relation floue définie entre deux sous-ensembles. La définition de la relation peut théoriquement faire intervenir n'importe quel opérateur de combinaison. Les inférences floues définies par Mamdani (1975) et parfois par Sugeno et Kang (1988) sont les plus utilisées. Toutefois, la plus commune est celle du système d'inférence Mamdani (1975). Les conséquences des lois floues n'étant pas les mêmes dans chaque algorithme flou, les procédures de défuzzification seront par conséquent différentes (Gokceoglu, 2002 ; Sonmez et al., 2003 ; Abraham et al., 2015).

- **L'inférence floue de Mamdani :** Supposons que la base de connaissances est constituée de n règles d'inférence contenant chacune des prémisses et une conclusion. Le fait est également constitué de propositions floues. Le processus d'inférence peut être décrit de la manière suivante :

Règle 1 SI (X_1 est A_{11}) et ... et (X_m est A_{1m}) ; ALORS (Y est B_1)

Règle 2: SI (X_1 est A_{21}) et ... et (X_m est A_{2m}) ; ALORS (Y est B_2)

Règle n : SI (X_1 est A_{n1}) et ... et (X_m est A_{nm}) ; ALORS (Y est B_n)

Fait : (X_1 est A'_1) et ... et (X_m est A'_m)

Conclusion : (Y est B)

Une simplification de cet exemple est illustrée par la figure 12. Au niveau des conditions, les opérateurs logiques standard «ET» et «OU» sont remplacés respectivement par les opérateurs de minimum et de maximum. La conclusion de chaque règle, introduite par «ALORS» est également calculée par l'opérateur minimum. C'est pourquoi on appelle également l'inférence de Mamdani inférence max-min.

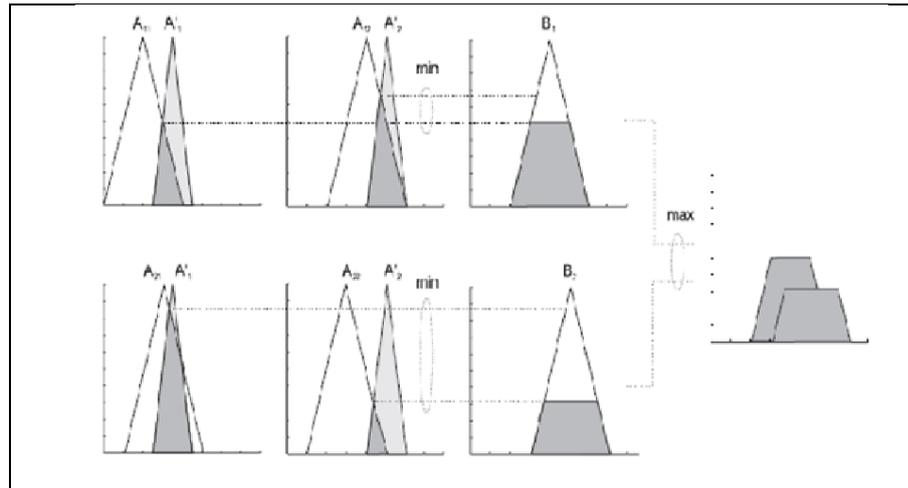


Figure 12. Exemple d'inférence max-min de Mamdani (Mokeddem, 2010)

- **l'inférence floue de Sugeno et Takagi** : Sugeno et Takagi (1985) ont proposé une méthode d'inférence floue qui garantit la continuité de la sortie. Cette méthode d'inférence s'avère très efficace dans des applications faisant intervenir à la fois des techniques linéaires, d'optimisation et adaptatives (Sugeno et Kang, 1988). Dans l'inférence de Sugeno et Takagi (1985), les règles floues sont exprimées de la façon suivante :

Règle i : Si $(x_1 \text{ est } A_{i1}) \text{ et } \dots \text{ et } (x_m \text{ est } A_{im})$; ALORS $y = f_i(x_1, \dots, x_m)$ dans laquelle x_1, \dots, x_m et y sont des éléments des univers du discours X_1, \dots, X_m et A_{i1}, \dots, A_{im} sont des termes linguistiques sur ces mêmes univers du discours. y est une fonction de x_1, \dots, x_m .

Le problème consiste à déterminer les paramètres de la fonction, ce qui est possible en utilisant une méthode d'optimisation (Sugeno et Kang, 1988). Une méthode utilisant un réseau de neurones comme système d'optimisation a été décrite par Jang et Anfis (1993).

- **Méthode d'inférence max produit (méthode de Larsen (1980))** : La méthode d'inférence max-produit réalise, au niveau de la condition, l'opérateur "ET" par la formulation du produit. La conclusion dans chaque règle, introduite par "ALORS", est réalisée par la formation du produit. L'opérateur "OU", qui lie les différentes règles est réalisé par la formation du maximum.

Cependant, par rapport à l'inférence de Sugeno et Takagi, l'inférence de Mamdani est plus intuitive, plus générale et elle s'adapte particulièrement bien à l'utilisation de connaissances issues d'une expertise (Mokeddem, 2010).

1.3.4. La défuzzification

Les méthodes d'inférence fournissent une fonction d'appartenance résultante $\mu_{res}(y)$ pour la variable de sortie y . Il s'agit donc d'une information floue qu'il faut transformer en grandeur physique. Il faut donc prévoir une transformation de cette information floue en une information mesurée. Cette transformation est appelée défuzzification. Plusieurs méthodes sont utilisées par la défuzzification, la plus utilisée étant celle du calcul du centre de gravité (Mazaheri et al., 1997) (figure 13). La défuzzification par centre de gravité (Z) consiste à calculer l'abscisse du centre de gravité de la fonction d'appartenance.

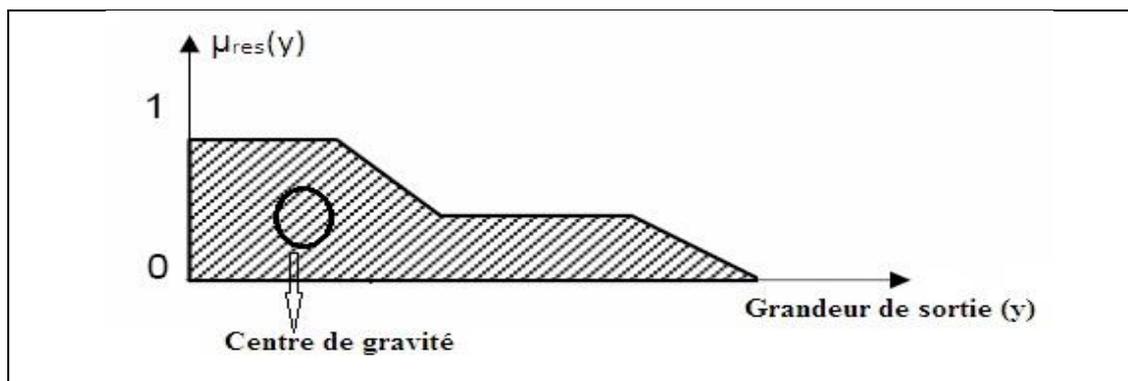


Figure 13. Méthode du centre de gravité

L'expression de Z est donnée par la formule suivante :

$$y_{cg} = \frac{\int y \cdot \mu_{B_{res}}(y) dy}{\int \mu_{B_{res}}(y) dy} \text{ avec } y: \text{ grandeur de sortie}$$

En pratique, on estime le centre de gravité (cg) en calculant la moyenne d'un certain nombre de points échantillonnés sur la fonction :

$$y_{cg} = \frac{\sum y_i \cdot \mu_{B_{res}}(y_i)}{\sum \mu_{B_{res}}(y_i)}$$

Cette étape permet de convertir une grandeur linguistique en une valeur numérique Z exploitable par des algorithmes numériques.

2. Les systèmes experts à base de logique floue

Des systèmes experts à base de logique floue, également nommés des systèmes d'inférence floue, ont été présentés par Mamdani (1975) pour le contrôle des systèmes techniques. L'inférence floue est le processus qui permet d'établir des relations entre les données d'entrée dans un système et celles de la sortie en utilisant la logique floue.

Les systèmes experts à base de logique floue simulent le raisonnement humain. Ceci consiste en l'application d'un ensemble de règles heuristiques formulées par un expert humain (Mamdani, 1975).

Un système expert se constitue des composants suivants :

- L'interface de fuzzification : c'est la conversion des valeurs mesurées en variables linguistiques
- La base de règle : le système d'inférence réalise des combinaisons entre les différents termes linguistiques.
- L'interface de défuzzification : consiste à transformer les données floues en des données non floues (numériques).

3. Utilisation de la logique floue en science du sol

La logique floue, qui est l'extension de la logique conventionnelle, apporte une amélioration significative en science du sol. Les mathématiques produites par cette théorie sont cohérentes. La théorie des ensembles floue peut être vue comme une généralisation de la théorie des ensembles classiques (Zadah, 1965). Cependant, la logique floue en science du sol a été appliquée pour la classification (Bhargavi, 2010), la cartographie (Minasny et McBratney, 2006 ; Shi, et al., 2013) , la classification de l'aptitude des terres (McBratney et Degrujter, 1992), la modélisation et la simulation des processus physiques du sol (Kaufmann et al., 2009) entre autres. L'association de la classification floue à d'autres techniques est actuellement utilisée dans l'élaboration des modèles pour la prédiction des propriétés du sol (Verma et al., 2009 ; Fajardo et al., 2015). Ainsi, de nombreux concepts de sol peuvent être modélés et simulés. La logique floue permet d'utiliser une connaissance issue d'une expertise humaine (Kaufmann et al., 2015 ; McBratney et Odeh, 1997). De même, à l'issue du 16^e Congrès Mondial de l'IUSS (Jamagne, 1999), il a été recommandé de renforcer les méthodes classiques

d'étude des sols par d'autres méthodes, telles que l'application de la logique floue et de l'intelligence artificielle, pour évaluer les incertitudes inhérentes à l'utilisation des cartes.

3.1. La qualité physique du sol

Kaufmann et al. (2009) ont mis au point un système expert à base de logique floue pour évaluer la qualité physique du sol après sa restauration. Les résultats obtenus sont très plausibles pour l'évaluation de la qualité physique des sols étudiés du fait qu'ils peuvent intégrer plusieurs paramètres du sol (densité, résistance à la pénétration, aération, conductivité hydraulique saturée) à l'aide des fonctions d'appartenance (figure 14). Cette approche a permis d'intégrer les déclarations des experts dans une base de règles d'inférences très cohérente. Ainsi, s'est avéré que l'approche de logique floue est un outil très approprié pour la modélisation des paramètres de physique du sol.

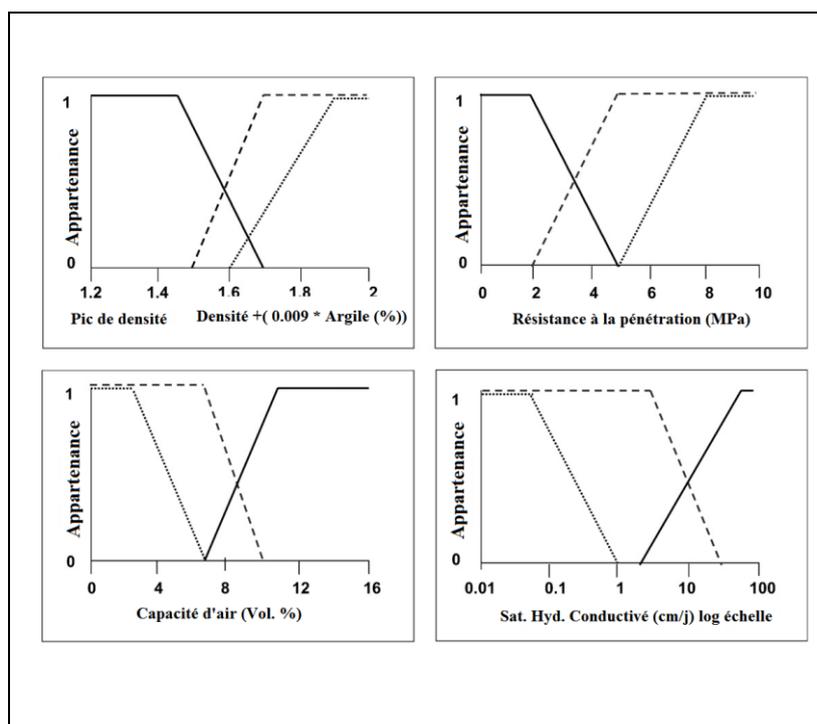


Figure 14. Diagramme des fonctions d'appartenance de 4 variables linguistiques (densité, résistance à la pénétration, capacité d'air et la conductivité hydraulique)

3.2. L'érosion du sol

Jing-Cheng Han et al. (2013) ont réalisé une programmation à deux volets par l'utilisation des paramètres à intervalle flou et une approche stochastique pour étudier la

gestion optimale de l'utilisation des terres. Cette programmation a abouti à un modèle pour le contrôle de l'érosion des sols. Ce modèle permet d'utiliser des variables floues et des fonctions d'appartenance floues dans l'équation du transport de l'eau. Ainsi, le système de partage des eaux devait être maximisé, et plusieurs incertitudes de ce système ont été examinées par l'incorporation des intervalles flous.

Enfin, l'avantage de l'approche floue réside dans le fait de pouvoir utiliser simultanément des valeurs mesurées et des données basées sur le jugement de l'expert. Celles-ci peuvent être combinées pour exprimer la variabilité inhérente à une donnée utilisée.

3.3. La cartographie et la classification des sols

En science du sol, la théorie des ensembles flous est souvent utilisée pour la classification. Le but de la classification est de réduire un système complexe, représenté par quelques ensembles de données, dans des classes explicitement définies. En employant la théorie des ensembles flous, des observations sont groupées dans des classes continues, dans lesquelles sont assignées des valeurs continues d'appartenance au lieu de les classer dans des classes (dures) définies d'une manière exacte (McBratney et Odeh, 1997). Une valeur d'appartenance de 1 est assignée aux classes qui sont strictement définies. Ainsi, des valeurs d'appartenance selon leur degré de proximité sont attribuées aux autres classes. La détermination du degré d'appartenance se fait par le calcul du centre de gravité de la surface de la classe (McBratney et Odeh, 1997). L'objectif principal de la classification numérique est de minimiser les variations au sein du même groupe et de maximiser les variations entre les groupes selon des critères objectifs (FAO, 2017b).

Les classifications hiérarchisées sont très précises mais rendent mal compte de la réalité. Inversement, les systèmes flous sont plus proches des conditions réelles, mais ils sont difficiles à mettre en œuvre. Ils ont pour objectif d'éviter l'utilisation de valeurs-seuils abruptes en vue de définir les unités et de mettre en œuvre le principe de continuité qui confère à cette classification une grande souplesse d'utilisation (Duchaufour, 1998). Selon Mazaheri et al. (1997), le principe de continuité permet de définir avec précision, dans chaque classe, un concept central (profil de référence). Plus le degré de parenté d'un profil avec le profil de référence est élevé, plus la liaison est forte avec ce profil. La

classification floue peut être définie comme une méthode de calcul des degrés d'appartenance (Kaufmann et al., 2015).

La notion de sols intergrades a été reconnue de façon formelle en utilisant le concept des ensembles flous (McBratney et Odeh, 1997). Les algorithmes à base de logique floue peuvent estimer le nombre des intergrades de sols (Hughes et al., 2014). D'après Menezes et al. (2013), la relation sol-paysages est complexe. De ce fait, les changements dans les types de sols ou dans leurs propriétés sont souvent plus progressifs et en continu. Ainsi, la variation représentée par une carte contenant de simples polygones montre l'existence d'une incertitude dans l'allocation des limites (Legros, 2006). Cependant, le concept rigide subjectif imposé sur les deux types de sols (figure 15) correspond rarement d'une manière exacte, aux systèmes de classification aux quels ils sont affectés.

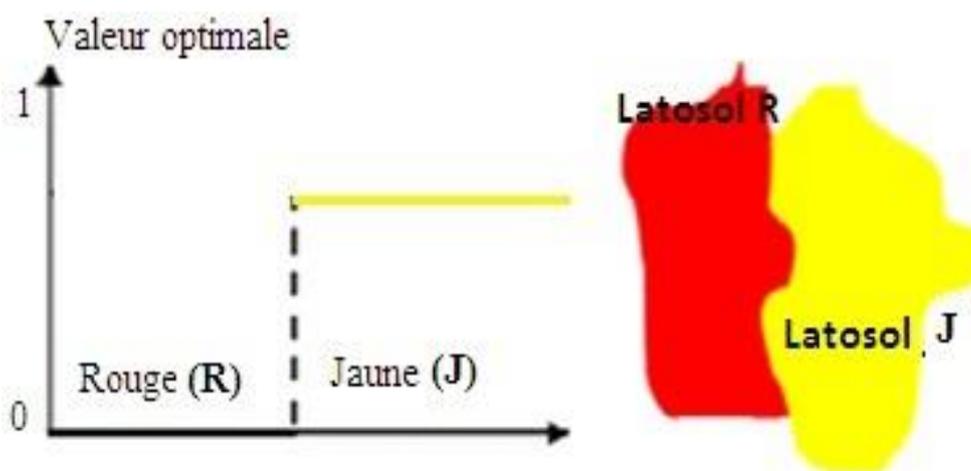


Figure 15. Répartition latérale d'une valeur optimale liée à la distribution dans le paysage de deux types de sols de couleurs différentes, obtenu par la logique booléenne (in Menezes et al., 2013)

Néanmoins, il y a une plage de valeurs optimales entre les classes, la notion d'appartenance à un ensemble a été modifiée pour inclure les degrés partiels de l'adhésion par le biais de la logique floue (figure 16).

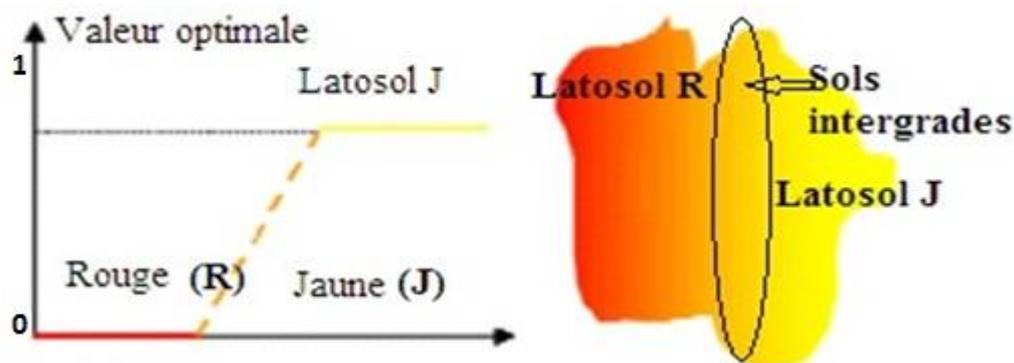


Figure 16. Répartition latérale d'une valeur optimale liée à la distribution dans le paysage de deux types de sols de couleurs différentes, obtenu par la logique floue (in Menezes et al., 2013)

Par ailleurs, l'adhésion maximale a toujours pour valeur 1. Elle représente le concept central ou modal, tandis que la valeur 0 exprime l'absence de toute forme d'adhésion. Les valeurs 0 et 1 expriment différents degrés de similitude d'où la notion de sols intergrades. Scull (2003) a cité deux approches différentes pour la prédiction des types de sols d'une manière continue. La première est basée sur le classificateur C-moyen floue (k-means fuzzy) qui réalise une répartition multi-variée des observations dans des classes naturelles. La deuxième est connue sous le modèle d'import sémantique. Celui-ci est utilisé dans des situations où les systèmes de classification et les limites cartographiques sont prédéfinis (classification supervisée). Par ailleurs, le modèle sémantique est communément utilisé en se basant sur les connaissances des experts. Il se réfère à une intégration de données par l'analyse et l'interprétation des données spatiales issues de plusieurs sources.

Dans l'analyse géographique, il est souvent nécessaire de procéder à l'intégration des données spatiales. Les sources de données utilisées sont multiple (comme les formats raster, vecteur ou cartes continues). Afin de répondre à des questions précises sur la répartition des données des phénomènes spatiaux (distribution des sols et leurs appartenances), Zhu et Band (1994) ont présenté la première approche qui a utilisé des données sémantiques combinées avec des techniques de systèmes experts basées sur la théorie des ensembles flous.

Cette méthodologie a connu un grand succès dans la mesure où elle a pu mettre au point une production scientifique assez importante. A titre d'exemples, nous pouvons citer la production de cartes numériques des sols (Mckay, 2010) et des cartes de prédiction des types de sols dans les endroits inaccessibles (zones montagneuses) (Menezes et al., 2013). Nous citons également l'établissement de formules de prédiction des propriétés des sols d'une manière continue (profondeur d'un horizon) (Quinn, et al., 2005 ; Libohova, 2010), des équations de détermination des classes de drainage (Mckaya, 2010) et de la texture des horizons (Qi, 2006).

La télédétection a été utilisée intensivement pour identifier les zones salées et les zones non-salées. La végétation est parmi les indicateurs qui sont utilisés pour distinguer les secteurs salés. En revanche, cette végétation cause la confusion spectrale et l'étiquetage incorrect entre la salinité et les classes d'alcalinité. Dans cette optique, une investigation a été entreprise par Metternicht (1998) où des ensembles flous ont été utilisés pour modeler les classes d'information à partir des images radar (figure 17).

Le modèle est mis en application pour classifier l'image radar. L'étude a révélé que la classification floue fournit une détection fiable avec une exactitude globale égale à 81 % des secteurs dégradés par la salinité-alcalinité. La logique floue a permis de diminuer l'interférence due à la rugosité du sol et à la rétrodiffusion de radar.

De plus, des fonctions d'appartenance pour les sols à $\text{pH} > 7$ ont été établies à partir d'un ensemble flou (figure 18). Ceci est important dans la détermination des domaines alcalins, non-alcalins et des zones non-affectées par la salinité.

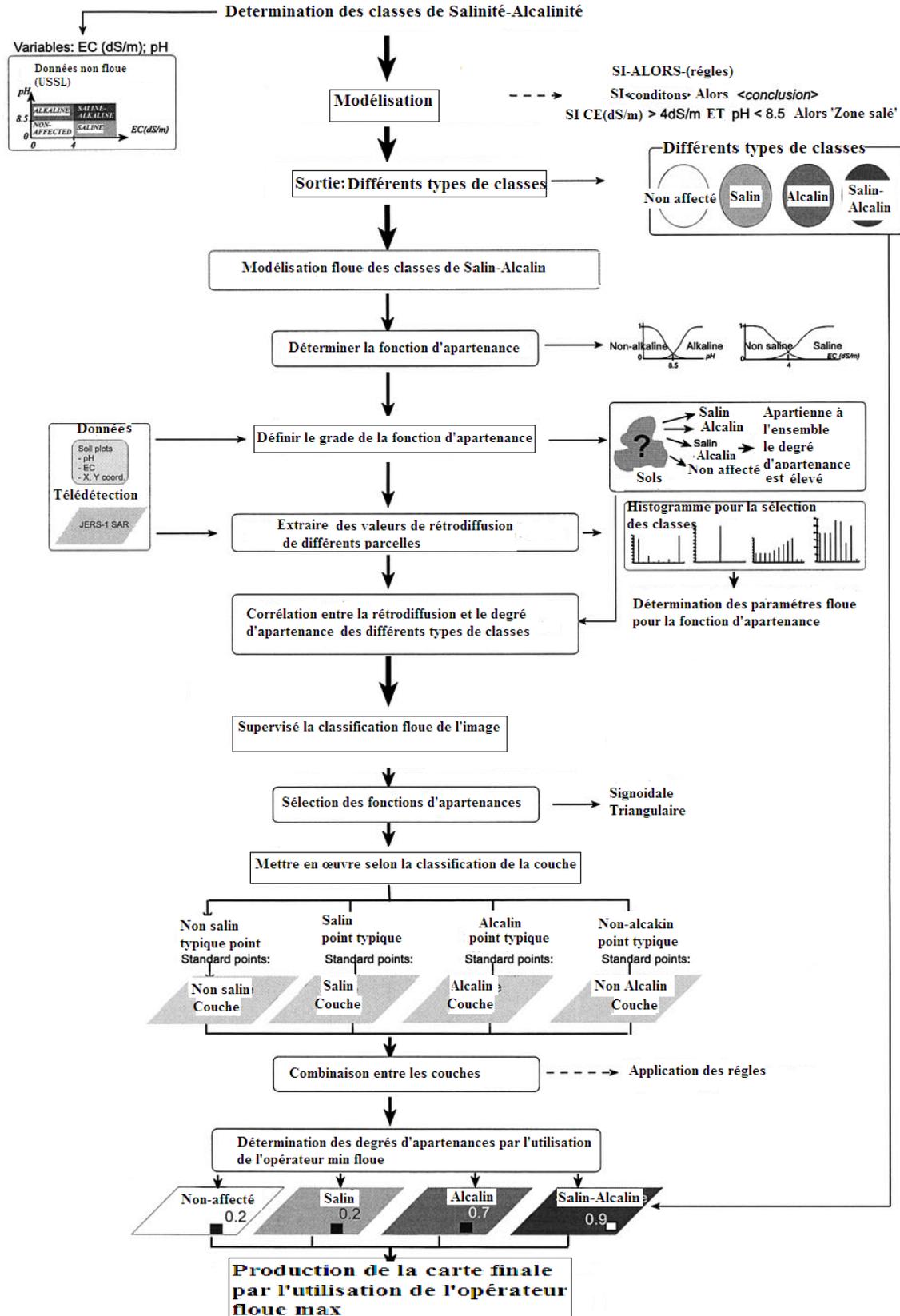


Figure 17. Modèle flou pour la détermination des sols salés (Metternicht, 1998)

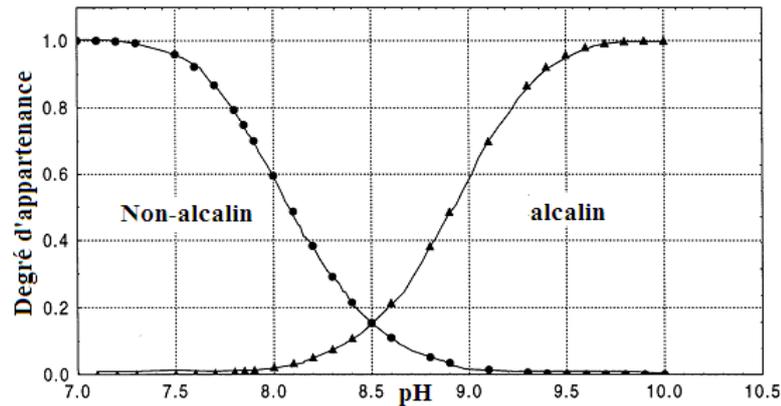


Figure 18. Fonction d'appartenance d'un ensemble flou pour un pH alcalin et un pH non-alcalin

En général, la classification floue des images satellites du radar s'avèrent un moyen très utile pour évaluer la performance de la cartographie des sols salés (Metternicht, 1998).

4. Les limites de la logique floue

D'après Ferdinand (2016), la logique floue présente divers inconvénients résumés comme suit :

- Le fait d'exprimer ses connaissances sous forme de règles en langage naturel (qualitatives) ne permet pas de prouver que le système aurait un comportement optimal.
- Les ajustements que le programmeur doit intégrer au système s'effectueront en fonction d'un objectif bien déterminé. Par conséquent, les résultats ne sont pas généralisables.
- Le système expert à base de logique floue ne peut pas garantir que le système soit optimal.
- Le système ne peut garantir que les règles d'inférence ne soient pas contradictoires.
- Les performances sont mesurées à posteriori et ne peuvent être calculées à priori.

Les systèmes de classification de type « fuzzy » sont plus proches des conditions réelles. En revanche, ils sont difficiles à mettre en œuvre dans la mesure où ils n'évitent pas les risques de confusion ; des compromis s'avèrent donc nécessaires (Duchaufour, 1998). Actuellement, la combinaison entre la logique floue et le réseau de neurones artificiels (neurone-floue) a permis d'avoir de meilleurs résultats (Macbratney et al., 2003 ;

Ambarish et al., 2016). Par ailleurs, le réseau de neurones artificiel est la meilleure méthode pour produire des cartes de prédictions de la teneur du sol en carbone organique, comparativement à la méthode neurone-floue (Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2016).

Conclusion

La théorie des ensembles flous a un grand potentiel en science du sol. En plus des différentes applications citées dans le présent chapitre, de nombreux autres concepts pédologiques peuvent être modélisés, simulés et même répliqués à l'aide de systèmes flous. L'avantage de la logique floue réside dans le fait qu'elle permet de raisonner sur des variables linguistiques. Le fait de raisonner sur ces variables linguistiques offre la possibilité de manipuler des connaissances en langage naturel par le biais d'un système d'inférence.

Le système d'inférence de Mamdani est intuitif, bien adapté à la connaissance humaine et s'adapte particulièrement bien à l'utilisation des connaissances issues d'une expertise.

Deuxième partie

Matériels et méthodes

Introduction

La présente recherche comporte deux volets :

- Le premier volet consiste en l'application de MFIS pour la détermination du degré d'appartenance des Solonchaks du nord de l'Algérie aux Calcisols et aux Gypsisols selon les critères définis par WRB. La méthodologie de ce volet de la recherche est présentée dans le chapitre I.
- Le deuxième volet est une application de MFIS sur les Solonchaks de la région de Rélizane mais en tenant compte de la variabilité saisonnière de leur salinité. Le suivi de la salinité a été réalisé en quatre campagnes de mesures en 2012 et 2013. La méthodologie est présentée dans le chapitre II.

Chapitre I : Application de MFIS aux Solonchaks du nord de l'Algérie

1. Matériels et méthodes

1.1. Matériel

Cette recherche a porté sur l'étude de 194 Solonchaks du nord de l'Algérie (figure 19).

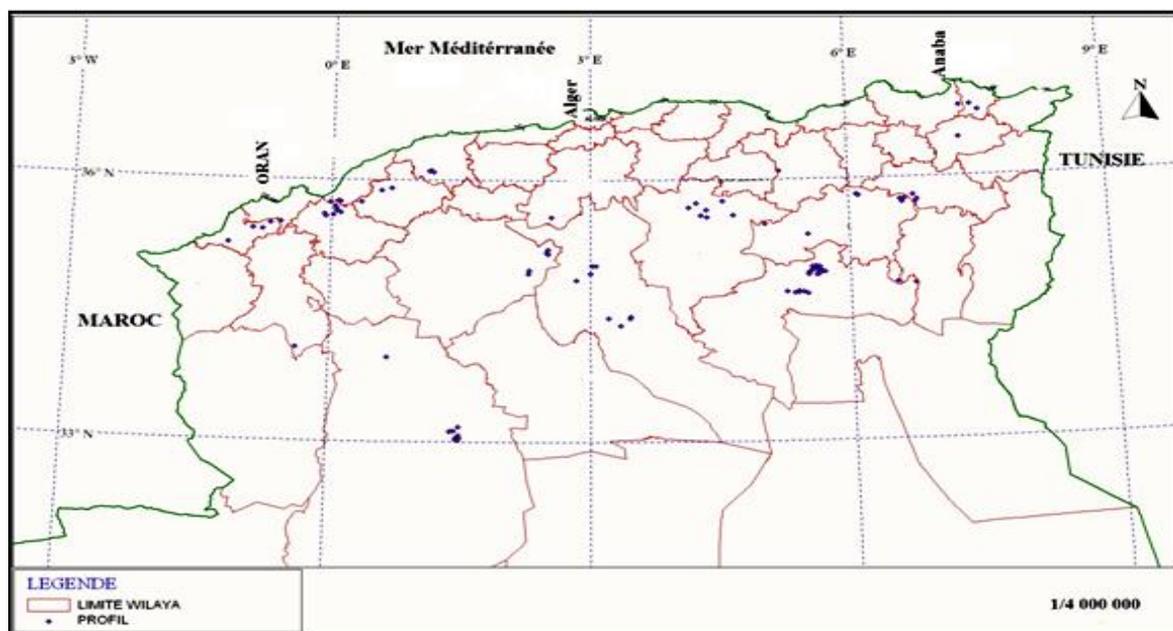


Figure 19. Carte de localisation des Solonchaks étudiés

Ces Solonchaks ont été identifiés selon les critères de WRB où seules les caractéristiques des horizons diagnostiques des Solonchaks sont prises en compte comme indiqué dans le tableau III.

Tableau III. Caractéristiques des horizons diagnostiques des Solonchaks étudiés

Paramètres	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	C.V (%)
pH	7	8,9	7,83	0,39	4,98
CE (dS/m)	15	96,5	30,27	17	56,18
Calcaire total (%)	1,2	67,6	23,62	13,24	56,05
Gypse (%)	0,07	73	9,5	10,97	115,42

Les principales caractéristiques de ces horizons se résument comme suit :

- La CE de l'extrait de pâte saturée varie entre 15 et 96,5 dS/m avec une moyenne de 30,27 dS/m. Ces Solonchaks sont donc marqués par une grande salinité (USSSL, 1954) qui varie fortement (C.V = 56 %) d'un sol à l'autre.
- Les teneurs en carbonate de calcium sont variables (C.V = 23 %) et se situent entre 1,2 % et 67,6 % avec une moyenne de 23,6 %. Ces Solonchaks peuvent donc être très peu calcaires, ou, au contraire, très fortement pourvus en calcaire.
- Les teneurs en gypse de ces Solonchaks sont également très variables (C.V = 115 %). Elles oscillent entre moins de 1 % et 73 % avec une moyenne de 9,5 %. De ce fait, les horizons diagnostiques de ces sols sont dans certains cas fortement gypseux.
- Le pH varie entre 7 et 8,9 avec une moyenne de 7,83 ce qui dénote une réaction du sol relativement alcaline.

Ces caractéristiques laissent penser que ces Solonchaks se rapprochent parfois aussi bien des Calcisols que des Gypsisols.

1.2. Méthodologie

Les variables ou grandeurs physiques utilisées pour les trois groupes de sols étudiés (Solonchaks, Calcisols, Gypsisols) sont présentées dans le tableau IV.

Tous les Solonchaks étudiés ont une CE ≥ 15 dS/m et par conséquent le pH n'est plus considéré comme critère diagnostique selon la classification WRB.

Tableau IV : Grandeurs physiques utilisées pour les trois groupes de sols

Groupes de sols (Variables de sortie)	Variables utilisées (IUSS Working Group WRB, 2014) (Variables d'entrée)
Solonchaks	<ul style="list-style-type: none"> - (CE) (dS/m) - Epaisseur de l'horizon diagnostique (E) (cm) - CE× épaisseur de l'horizon diagnostique (CE×E)
Calcisols	<ul style="list-style-type: none"> - Teneur en CaCO₃ total (%) - Epaisseur de l'horizon diagnostique (cm) - Carbonate secondaire (CS) (%) par volume
Gypsisols	<ul style="list-style-type: none"> - Teneur en gypse (%) - Epaisseur de l'horizon diagnostique (cm) - Epaisseur de l'horizon diagnostique × teneur en gypse (E×gypse)

1.2.1. La prise de décisions

Le raisonnement MFIS nécessite trois étapes, la fuzzification, l'inférence et la défuzzification comme schématisé par la figure 20.

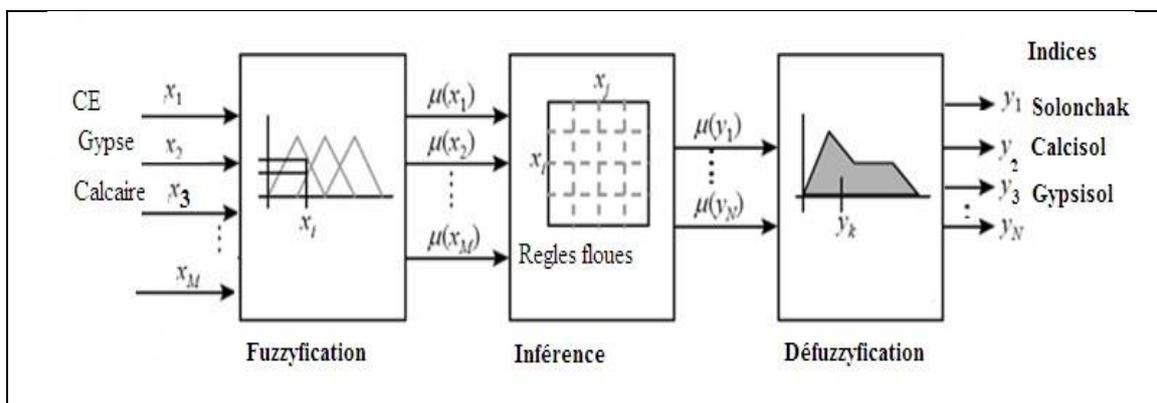


Figure 20. Schéma de base du raisonnement par MFIS

- La fuzzification

La fuzzification consiste à convertir les valeurs numériques (ou grandeurs physiques des critères diagnostiques) de chaque groupe de sol (tableau IV) en grandeurs floues. A ce niveau, l'utilisation des données numériques et de l'hypothèse restrictive n'est pas nécessaire (Mamdani 1977 ; Uyumaz et al. 2006 ; Ozger 2009 ; Ahumada et al. 2015) d'où des avantages majeurs de cette technique. Lors de cette étape, on définit d'abord les fonctions d'appartenance de toutes les variables et, ensuite, on procède au passage des grandeurs physiques vers des variables linguistiques.

Les fonctions d'appartenance décrivent le degré d'appartenance d'une variable floue (CE dans notre cas) à un sous ensemble flou A (valeur de CE petite, moyenne ou grande), elle est notée $\mu_A(x)$ avec :

$$\mu_A(x) = [0 \ 1] \text{ si } x \in A \text{ et } \mu_A(x) = 0 \text{ si } x \notin A$$

La fonction d'appartenance d'une variable linguistique peut être définie par différentes fonctions mathématiques de types gaussien, sigmoïdale, triangulaire ou trapézoïdale entre autres. La fuzzification de toutes les grandeurs physiques a été appliquée par utilisation de la fonction d'appartenance gaussienne et en subdivisant l'ensemble flou en trois sous-ensembles pour toutes les variables d'entrée et de sortie (tableau IV, figures 21 et 22). Pour ce faire, les grandeurs physiques ont été préalablement traduites en variables linguistiques :

- P : valeur petite.
- M : valeur moyenne.
- G : valeur grande.

Les fonctions d'appartenances des variables d'entrée sont explicitées par la figure 21.

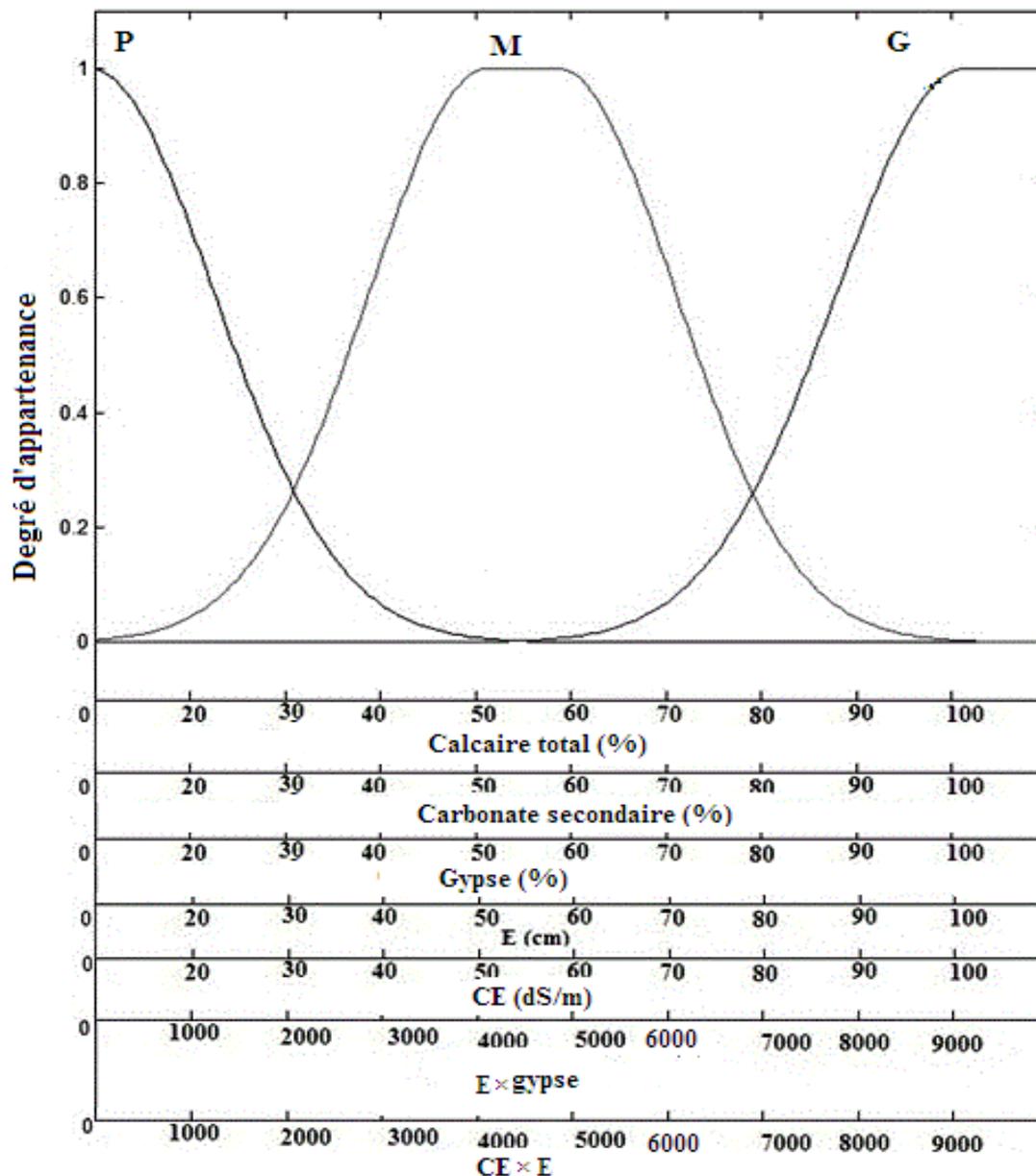


Figure 21. Fonction d'appartenance des variables d'entrée

La même démarche a été effectuée pour les grandeurs de sortie qui ont été traduites en indices des Solonchaks (Is), indices des Calcisols (Ic) et indices des Gypsisols (Ig) comme indiquée par la figure 22.

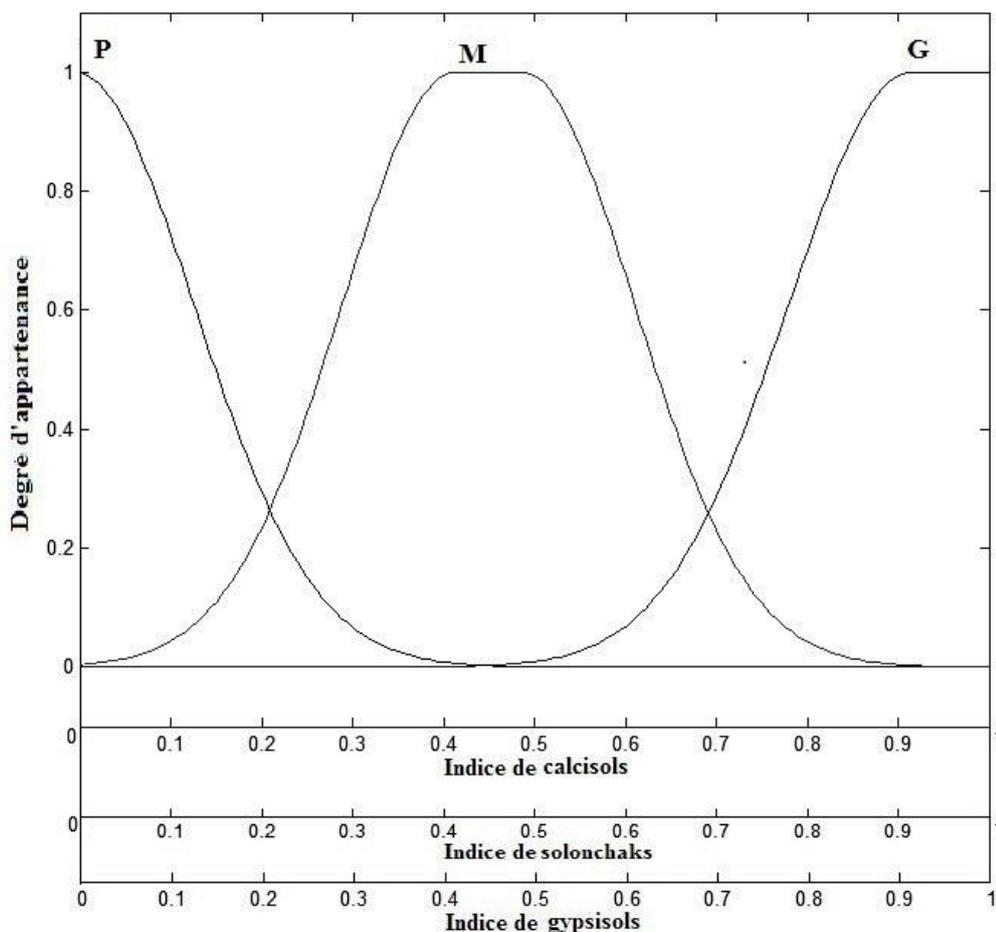


Figure 22. Fonction d'appartenance des variables de sortie

- Les règles d'inférence

Les règles d'inférence expriment la relation entre les variables linguistiques d'entrée (CE faible, teneur en calcaire total grande, teneur en gypse moyenne...) et la variable linguistique de sortie (Solonchak grand, Calcisol petit, Gypsisol moyen...). Elles prennent en compte l'expérience ou le savoir-faire de l'expert ou bien elles se basent simplement sur les remarques de bon sens. Ces règles s'expriment sous forme de conditions (SI) simples ou combinées à d'autres conditions (ET, OU) pour aboutir à un résultat linguistique. Chaque règle se compose d'une partie antécédente (condition) exprimée par SI, et d'une partie conséquente (conclusion) exprimée par ALORS. Dans le cas présent, l'une des règles peut être du type «SI CE G ET (CE×E) G ET E G ET teneur en calcaire totale P ET teneur carbonate secondaire (CS) P ET teneur en gypse moyenne ET (E×gypse) M (partie antécédente) ALORS Solonchak G, Calcisol P et Gypsisol M (partie conséquente)».

Dans cette recherche, le degré d'appartenance entre les sols étudiés a été mis en évidence par un modèle construit par 171 règles d'inférence qui font ressortir le maximum de combinaisons entre les trois sols étudiés (3 variables linguistiques et 9 variables physiques).

Les 171 règles d'inférence ont été calculées par la formule suivante :

$$((3 \times C_3^1 + 3 \times C_3^2 + C_3^3) \times 9) \text{ avec } C : \text{ combinaison.}$$

Sur les 171 règles d'inférence calculées, seules 21 règles ont été retenues. La sélection de ces 21 règles d'inférence est faite sur la base d'une corrélation significative ($P < 0,05$) entre les différents indices Solonchaks (Is), Calcisols (Ic), Gypsisols (Ig) et leurs critères diagnostiques correspondant sauf pour l'épaisseur de l'horizon diagnostique. Ceci est justifié par le fait que la corrélation entre l'épaisseur de l'horizon et les différents indices (Is, Ic et Ig) n'est pas significative ($P > 0,05$). Ces 21 règles clés sont indiquées par la figure 23.

Ces règles clés se présentent comme suit :

Règle 1 : SI CE G ET (CE×E) G ET E G ET calcaire total P ET CS P ET gypse P (E × gypse) P ALORS Solonchak G, Calcisol P, Gypsisol P.

OU

Règle 2 : SI CE P ET (CE×E) P ET E P ET calcaire total G ET SC G ET gypse P (E × gypse) P ALORS Solonchak P, Calcisol G, Gypsisol P.

OU

Règle 3 : SI CE M ET (CE×E) M ET E M ET calcaire total G ET SC G ET gypse P (E × gypse) P ALORS Solonchak M, Calcisol G, Gypsisol P.

OU

Règle 4 : SI CE P ET (CE×E) P ET E P ET calcaire total M ET SC M ET gypse P (E × gypse) P ALORS Solonchak P, Calcisol M, Gypsisol P.

OU

Règle 5 : SI CE P ET (CE×E) P ET E P ET calcaire total P ET SC P ET gypse G (E × gypse) G ALORS Solonchak P, Calcisol P, Gypsisol G.

Comme indiqué ci-dessus, la même procédure est utilisée pour le reste des règles.

```

1. If (CE is G) and (CE_X_E is P) and (Gypse is G) and (Gypse_X_E is G) and (Calcaire is M) and (E is G) and (E_calcaire is M) and (E_gypse is G) and (CS is M) then (Calcisol is M)(Solonchak is G)(Gypsisol is Gypsisol-G) (1)
2. If (CE is M) and (CE_X_E is M) and (Gypse is M) and (Gypse_X_E is M) and (Calcaire is G) and (E is M) and (E_calcaire is G) and (E_gypse is M) and (CS is G) then (Calcisol is G)(Solonchak is M)(Gypsisol is Gypsisol-M) (1)
3. If (CE is G) and (CE_X_E is P) and (Gypse is G) and (Gypse_X_E is G) and (Calcaire is G) and (E is G) and (E_calcaire is M) and (E_gypse is G) and (CS is G) then (Calcisol is M)(Solonchak is G)(Gypsisol is Gypsisol-G) (1)
4. If (CE is M) and (CE_X_E is M) and (Gypse is M) and (Gypse_X_E is M) and (Calcaire is G) and (E is M) and (E_calcaire is M) and (E_gypse is M) and (CS is G) then (Calcisol is G)(Solonchak is M)(Gypsisol is Gypsisol-M) (1)
5. If (CE is M) and (CE_X_E is M) and (Gypse is G) and (Gypse_X_E is G) and (Calcaire is M) and (E is M) and (E_calcaire is M) and (E_gypse is G) and (CS is M) then (Calcisol is M)(Solonchak is M)(Gypsisol is Gypsisol-G) (1)
6. If (CE is G) and (CE_X_E is P) and (Gypse is M) and (Gypse_X_E is M) and (Calcaire is M) and (E is M) and (E_calcaire is M) and (E_gypse is M) and (CS is M) then (Calcisol is M)(Solonchak is G)(Gypsisol is Gypsisol-M) (1)
7. If (CE is M) and (CE_X_E is M) and (Gypse is M) and (Gypse_X_E is M) and (Calcaire is M) and (E is M) and (E_calcaire is M) and (E_gypse is M) and (CS is M) then (Calcisol is M)(Solonchak is M)(Gypsisol is Gypsisol-M) (1)
8. If (CE is G) and (CE_X_E is P) and (Gypse is G) and (Gypse_X_E is G) and (Calcaire is G) and (E is G) and (E_calcaire is G) and (E_gypse is G) and (CS is G) then (Calcisol is G)(Solonchak is G)(Gypsisol is Gypsisol-G) (1)
9. If (CE is P) and (CE_X_E is G) and (Gypse is P) and (Gypse_X_E is P) and (Calcaire is M) and (E is P) and (E_calcaire is M) and (E_gypse is P) and (CS is M) then (Calcisol is M)(Solonchak is P)(Gypsisol is Gypsisol-P) (1) (1)
10. If (CE is M) and (CE_X_E is M) and (Gypse is M) and (Gypse_X_E is M) and (Calcaire is M) and (E is M) and (E_calcaire is P) and (E_gypse is M) and (CS is M) then (Calcisol is P)(Solonchak is M)(Gypsisol is Gypsisol-M) (1)
11. If (CE is P) and (CE_X_E is G) and (Gypse is G) and (Gypse_X_E is G) and (Calcaire is P) and (E is P) and (E_calcaire is M) and (E_gypse is G) and (CS is P) then (Calcisol is M)(Solonchak is P)(Gypsisol is Gypsisol-M) (1)
12. If (CE is M) and (CE_X_E is M) and (Gypse is M) and (Gypse_X_E is M) and (Calcaire is P) and (E is M) and (E_calcaire is M) and (E_gypse is M) and (CS is P) then (Calcisol is P)(Solonchak is M)(Gypsisol is Gypsisol-M) (1)
13. If (CE is M) and (CE_X_E is M) and (Gypse is P) and (Gypse_X_E is P) and (Calcaire is M) and (E is M) and (E_calcaire is M) and (E_gypse is P) and (CS is M) then (Calcisol is M)(Solonchak is M)(Gypsisol is Gypsisol-P) (1)
14. If (CE is P) and (CE_X_E is G) and (Gypse is M) and (Gypse_X_E is M) and (Calcaire is M) and (E is P) and (E_calcaire is M) and (E_gypse is M) and (CS is M) then (Calcisol is M)(Solonchak is P)(Gypsisol is Gypsisol-G) (1)
15. If (CE is P) and (CE_X_E is G) and (Gypse is P) and (Gypse_X_E is P) and (Calcaire is P) and (E is P) and (E_calcaire is P) and (E_gypse is P) and (CS is P) then (Calcisol is P)(Solonchak is P)(Gypsisol is Gypsisol-P) (1) (1)
16. If (CE is M) and (CE_X_E is M) and (Gypse is P) and (Gypse_X_E is P) and (Calcaire is G) and (E is M) and (E_calcaire is G) and (E_gypse is P) and (CS is G) then (Calcisol is G)(Solonchak is M)(Gypsisol is Gypsisol-P) (1)
17. If (CE is M) and (CE_X_E is M) and (Gypse is G) and (Gypse_X_E is G) and (Calcaire is P) and (E is M) and (E_calcaire is P) and (E_gypse is G) and (CS is P) then (Calcisol is P)(Solonchak is M)(Gypsisol is Gypsisol-G) (1)
18. If (CE is G) and (CE_X_E is P) and (Gypse is M) and (Gypse_X_E is M) and (Calcaire is P) and (E is G) and (E_calcaire is P) and (E_gypse is M) and (CS is P) then (Calcisol is P)(Solonchak is G)(Gypsisol is Gypsisol-M) (1)
19. If (CE is P) and (CE_X_E is G) and (Gypse is G) and (Gypse_X_E is G) and (Calcaire is M) and (E is P) and (E_calcaire is M) and (E_gypse is G) and (CS is M) then (Calcisol is M)(Solonchak is P)(Gypsisol is Gypsisol-G) (1)
20. If (CE is G) and (CE_X_E is P) and (Gypse is P) and (Gypse_X_E is P) and (Calcaire is M) and (E is G) and (E_calcaire is M) and (E_gypse is P) and (CS is M) then (Calcisol is M)(Solonchak is G)(Gypsisol is Gypsisol-P) (1)
21. If (CE is G) and (CE_X_E is P) and (Gypse is M) and (Gypse_X_E is M) and (Calcaire is M) and (E is G) and (E_calcaire is M) and (E_gypse is M) and (CS is M) then (Calcisol is M)(Solonchak is G)(Gypsisol is Gypsisol-M) (1)

```

Figure 23. Exemple de règles d'inférence (logiciel MATLAB version 7.1)

La méthode de min-max (Zadeh 1965; Negoita 1985; Klir et al. 1988) a été utilisée pour le calcul de l'inférence floue. Un coefficient de pondération W_i (weight i) est affecté à chaque règle d'inférence. Ce coefficient dépend de la structure de la règle, c'est-à-dire de la combinaison entre OU et ET. Le ET est utilisé pour l'opérateur **min** et le OU pour l'opérateur **max**. Le coefficient de pondération est utilisé comme constante d'écrêtage de la fonction d'appartenance de la sortie comme explicité par la figure 24.

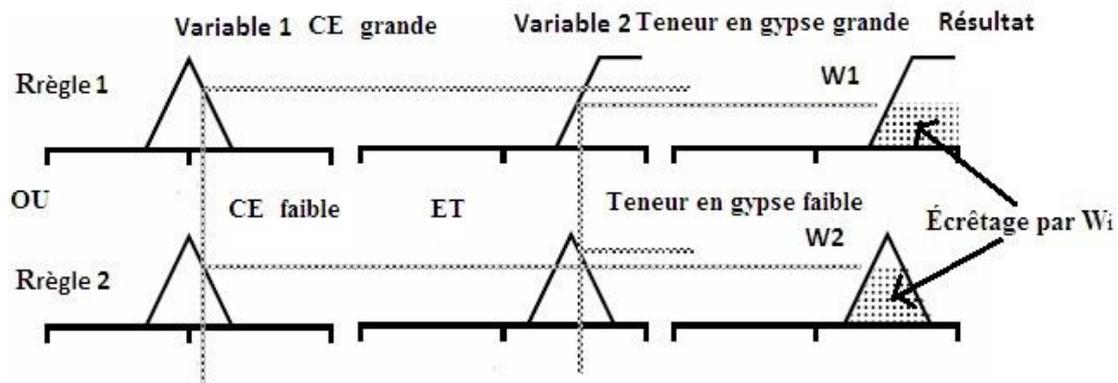


Figure 24. Exemple d'application de l'inférence par la méthode min-max

- Défuzzification

Les méthodes d'inférence fournissent une fonction d'appartenance résultante $\mu_{res}(y)$ pour la variable de sortie 'y' (Solonchak, Calcisol, Gypsisol). Il s'agit d'une information floue qui doit être transformée en grandeur physique (indice). La défuzzification consiste à transformer cette information floue en une information mesurée. Parmi les méthodes utilisées pour la défuzzification, nous avons utilisé celle du calcul du centre de gravité (Z) (Ross, 1995 ; Mazaheri et al., 1997) (figure 25).

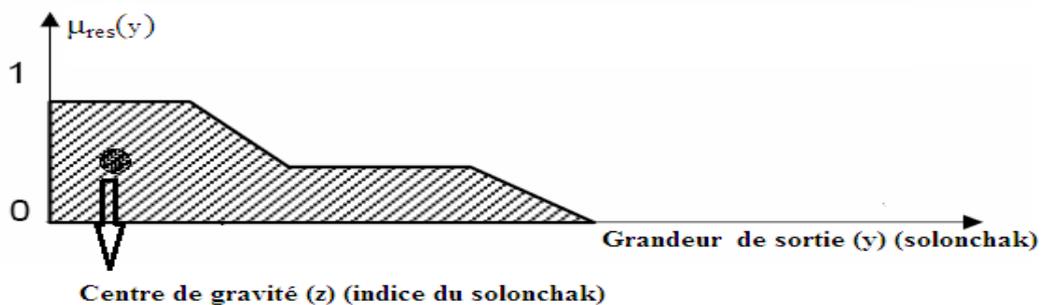


Figure 25. Exemple de la méthode du centre de gravité

L'expression de Z est donnée par la relation suivante :

$$Z = \frac{\int_D y \times \mu_{res}(y) \times dy}{\int_D \mu_{res}(y) \times dy}$$

Cette étape sert à convertir les grandeurs linguistiques en une valeur numérique Z exploitable par des algorithmes numériques. Dans la présente étude, Z représente I_s ou I_c ou I_g obtenus par le système expert. La conception du système a été réalisée par le logiciel MATLAB (version 7.0).

1.3. Interprétation des indices

La classification par MFIS est en faveur de l'indice le plus élevé. Cependant, lorsque les indices ont la même valeur, cela signifie que les sols ont le même degré d'appartenance. Par conséquent, le sol est considéré comme intergrade. Ainsi, nous pouvons interpréter les indices comme suit:

- Si $I_s > I_c$ et $I_s > I_g$, alors le sol est classé Solonchak.
- Si $I_c > I_s$ et $I_c > I_g$, alors le sol est classé Calcisol.
- Si $I_g > I_s$ et $I_g > I_c$, alors le sol est classé Gypsisol.
- Si $I_s = I_c = I_g$, alors le sol est classé intergrade Solonchak-Calcisol-Gypsisol.
- Si $I_s = I_c$ et $I_g < I_c$ et $I_g < I_s$, alors le sol est classé intergrade Solonchak-Calcisol.
- Si $I_s = I_g$ et $I_c < I_g$ et $I_c < I_s$, alors le sol est classé intergrade Solonchak-Gypsisol.
- Si $I_c = I_g$ et $I_s < I_c$ et $I_s < I_g$, alors le sol est classé intergrade Calcisol-Gypsisol.

En fin, lorsque les corrélations entre les indices des sols obtenus par MFIS et les paramètres pris en considération par WRB (CE, teneurs en calcaire total, teneurs en gypse et épaisseur des horizons) sont statistiquement significatives, il sera alors possible d'établir des équations de régression. Ceci permet la prédiction des indices des trois sols en question (I_s , I_g et I_c).

Chapitre II : Application de MFIS sur la variation taxonomique temporelle des Solonchaks de Rélizane

1. Présentation de la région d'étude

Les sols étudiés se situent dans la région de Rélizane à environ 300 km à l'ouest d'Alger. Cette région est connue par ses deux grands périmètres irrigués, le périmètre de la Mina et celui du Bas-Chéloff (figure 26).



**Figure 26. Carte de situation des périmètres irrigués de la région de Rélizane
(in Gacem, 2015)**

Ces deux plaines alluviales sont confrontées au problème de la salinisation secondaire en plus de la salinisation primaire (Boulaine, 1956). Cette salinisation secondaire est due à la mauvaise qualité de l'eau d'irrigation mais aussi à la remontée capillaire, le tout étant aggravé par un système de drainage défaillant (Daoud, 1993 ; Douaoui, 2005 ; INSID, 2006 ; Hadj Miloud, 2010).

- Le climat

Les données climatiques de la présente étude proviennent de la station météorologique de Rélizane et couvrent une période de 19 ans allant de 1988 à 2006.

D'après le tableau V, novembre est le mois le plus pluvieux (39,4 mm) et juillet est le mois le plus sec (1,5 mm). Le climat de la région de Hmadna est caractérisé par une faible pluviométrie annuelle (253,3 mm) irrégulièrement répartie durant l'année.

Tableau V : Précipitations moyennes mensuelles et annuelles de la station de Rélizane pour la période (1988 – 2006)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Année
Pluie (mm)	11,9	21,2	39,4	28,4	30,4	31,2	28,8	27,2	24,2	5,3	1,5	3,8	253,3

Les températures sont élevées en été et relativement basses en hiver. Les fortes températures mensuelles moyennes et maximales sont enregistrées en Juillet (29,6°C ; 34,7°C) et en août (29,3°C ; 38,9°C) (tableau VI) ce qui induit une forte évapotranspiration et une remontée capillaire de la nappe durant cette période. Les basses températures mensuelles moyennes et maximales se manifestent en janvier (11,6°C ; 6,1°C) et en février (12,2°C ; 6,4°C).

Tableau VI : Moyennes mensuelles des températures (°C) de la station de Rélizane pour la période (1988 – 2006)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Tmin.	17	14,5	9	7,7	6,1	6,4	9,4	11,6	15	17	21,1	20,8
Tmax.	32,5	27,1	23,1	19,3	17,2	18,9	23	24,2	24,2	30,1	34,7	38,9
Tmoy. (°C)	24,75	20,8	16,05	13,5	11,65	12,65	16,1	17,9	19,6	23,55	27,9	29,85

Ces caractéristiques climatiques traduisent une forte évapotranspiration en juillet (231 mm) et août (232 mm) correspondant aux mois les plus chauds et les plus secs (tableau VII). Par contre, l'évapotranspiration est faible en hiver.

Tableau VII. Evapotranspiration potentielle moyenne en mm, établie selon la formule PENMAN (Station ONM de Rélizane pour la période (1988 – 2006))

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Totale
ETP (mm)	44	60	99	137	174	198	231	232	153	98	55	39	1523

Le diagramme ombrothermique de Gaussen et Bagnouls révèle que la saison sèche s'étale d'avril à octobre, soit sur une période de 7 mois (figure 27).

Le climat de cette région est très rude et très contrasté. Les précipitations annuelles moyennes sont faibles (253 mm) et l'ETP annuelle (1523 mm/an) est très forte. Cette situation engendre un déficit hydrique annuel important, surtout lors des fortes températures estivales (38,5°C). Ces conditions favorisent la remontée capillaire de la nappe qui accentue la salinisation des sols. En fin, ce climat est classé comme étant un climat chaud semi-aride.

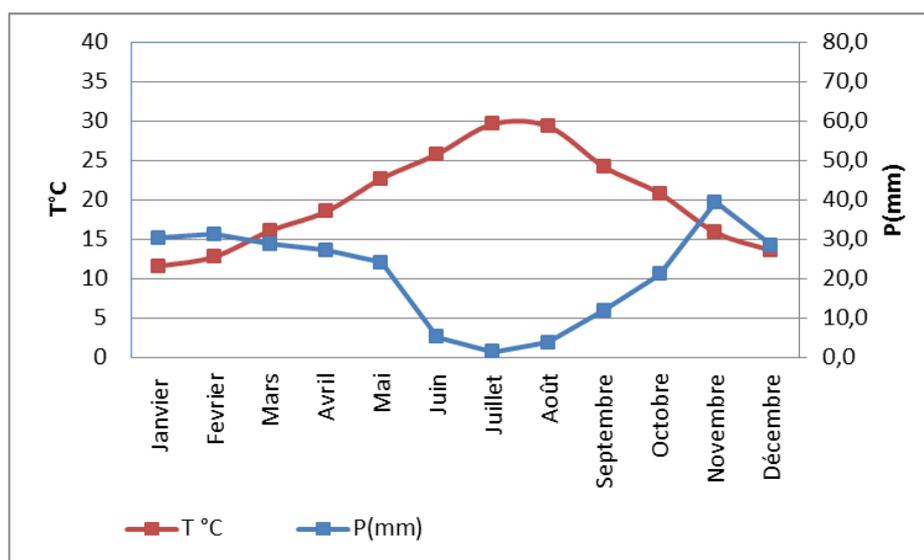


Figure 27. Diagramme ombrothermique de la station de Rélizane (1988-2006)

C'est dans ce contexte que nous avons étudié deux profils de sols (P1 et P2) dans le périmètre de la Mina et deux profils de sols (P3 et P4) dans le périmètre du Bas Chélif, plus précisément dans la station de recherche de l'INRA de Hmadna (figure 28).

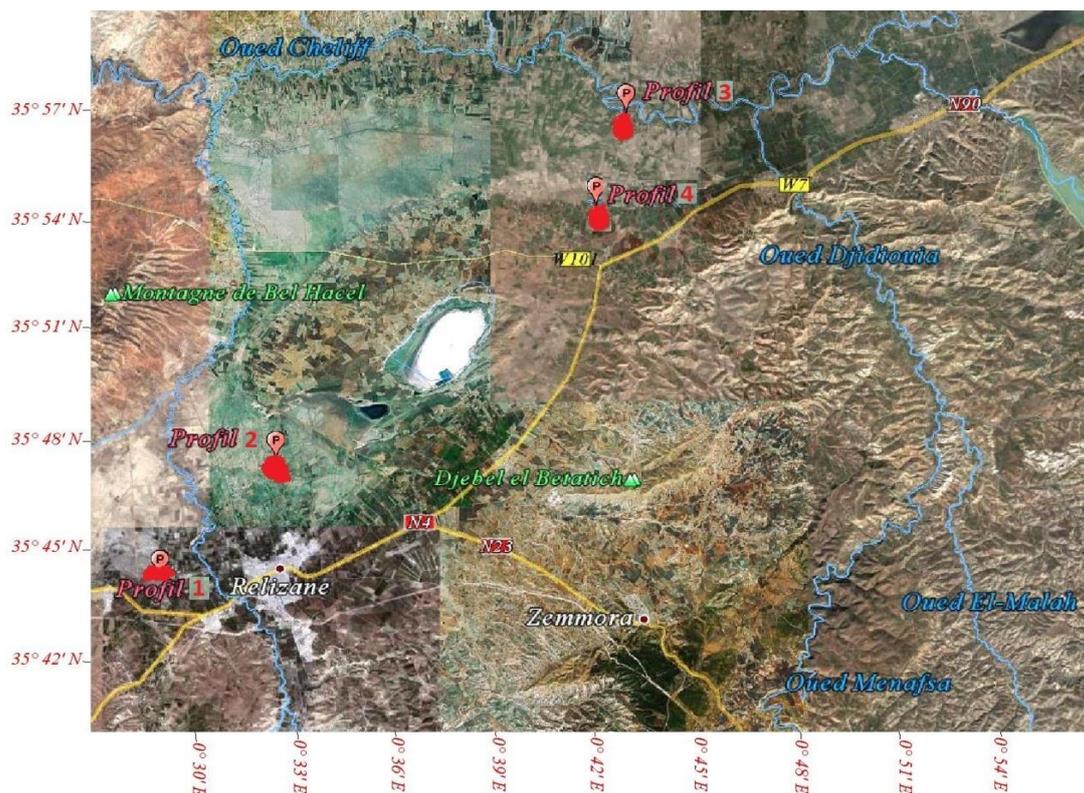


Figure 28. Localisation des profils étudiés (taches rouges)

- **Le profil P1** (Longitude $0^{\circ} 29' 31,2''$ E ; Latitude $35^{\circ} 44' 17,0''$ N) se trouve dans la plaine de la Mina qui constitue la limite ouest du Bas-Chéouli ;
- **Le profil P2** (Longitude $0^{\circ} 33' 22,0''$ E ; Latitude $35^{\circ} 47' 44,33''$ N) se situe dans Gaâ c'est une dépression fermée qui se trouve sur la rive droite de l'oued Mina ;
- **Les profils P3** (Longitude $0^{\circ} 44' 59,6''$ E ; Latitude $35^{\circ} 57' 47,5''$ N) et **P4** (Longitude $0^{\circ} 47' 50''$ E ; Latitude $35^{\circ} 52' 49''$ N) se trouvent dans la station de l'INRA de Hmadna dans la partie Est du Bas-Chéouli (figure 7).

2. Méthodologie

Il s'agit d'abord d'étudier l'évolution saisonnière de la salinité entre 2012 et 2013 dans les périmètres irrigués du Bas-Chéouli et de la Mina. Ce suivi est réalisé sur quatre profils références de Solonchaks identifiés par Hadj Miloud (2010). Ensuite, il s'agira de déterminer le degré d'appartenance dans le temps de ces Solonchaks aux Calcisols et Gypsisols en utilisant MFIS.

Quatre campagnes d'échantillonnage de sol ont été effectuées à la fin de la saison humide (janvier) et à la fin de la saison sèche (aout) de chaque année en se basant sur le diagramme ombrothermique. Les échantillons sont analysés pour cerner leur état de salinité par une caractérisation de CE et la composition chimique de la solution du sol. Ceci permet la détermination du faciès chimique de la solution du sol pour chaque époque de prélèvement. Le faciès chimique a été déterminé par le diagramme de Piper à l'aide du logiciel diagrammes (Simler, 2012).

2.1. Les méthodes d'analyse au laboratoire

Les échantillons de sol prélevés sont d'abord séchés à l'air libre, tamisés à 2 mm et analysés au laboratoire, avec deux à trois répétitions.

2.1.1. Analyses du sol

Pour le sol nous avons utilisé les méthodes suivantes :

a. Analyses physiques

- L'analyse granulométrique : méthode internationale à la pipette de Robinson.

b. Analyses chimiques

- CE de l'extrait de pâte saturée : méthode électrique.
- pH : le rapport (1/2,5) : méthode potentiométrique
- Calcaire total : méthode volumétrique au calcimètre de Bernard (Dupuis, 1969).
- Capacité d'échange cationique (CEC) : méthode Bower, saturation à l'acétate de sodium, pH= 8.2.
- Bases échangeables : déplacement des cations par une solution de chlorure de Baryum. Dosage des cations bivalents (Ca^{++} , Mg^{++}) par spectrophotométrie à absorption atomique et des cations monovalents (K^+ , Na^+) par spectrophotométrie à flamme.
- Gypse : méthode gravimétrique (Coutinet, 1965) : attaque du gypse par une solution de carbonate d'ammonium. Les sulfates qui en résultent sont précipités par une solution de chlorure de baryum sous forme de sulfate de baryum.

2.1.2. Analyses de la solution du sol

Nous avons utilisé l'extrait de pâte saturée correspondant à la méthode de référence préconisée par l'USSL (1954). La solution du sol extraite a été analysée en vue de déterminer les six paramètres suivants :

- CE : méthode électrique.
- Sulfates : méthode gravimétrique par précipitation par le chlorure de baryum.
- Carbonates et les bicarbonates : méthode volumétrique, dosage par une solution acide.
- Chlorures : méthode volumétrique au nitrate d'argent.
- Sodium et le potassium : par photométrie de flamme.
- Calcium et le magnésium : par photométrie d'absorption atomique.

2.2. L'analyse statistique des données

Les résultats obtenus ont subi analyses statistiques suivantes :

- Etude des corrélations entre CE et les différents paramètres chimiques (Na^+ , Mg^{++} , Ca^{++} , K^+ , SO_4^- , Cl^- , HCO_3^- , ESP, pH).
- Analyse en composantes principales (ACP) pour cerner les paramètres chimiques qui ont plus de poids sur la variation de CE. L'ACP a été réalisée par le logiciel SPAD.

2.3. Application de MFIS

Le deuxième objectif de cette recherche consiste à utiliser MFIS pour la classification des Solonchaks de Rélizane. Ce système permet également d'examiner la variation dans le temps des Is de la région d'étude pour chaque saison considérée.

Pour ce faire, le raisonnement basé sur MFIS nécessite trois étapes, la fuzzification, l'inférence et la défuzzification comme détaillé dans le chapitre II de la première partie et le chapitre I de la deuxième partie.

Les grandeurs physiques (variables d'entrée) utilisées dans le système MFIS sont les critères diagnostiques des Solonchaks, Calcisols et Gypsisols. Ces variables physiques ont été

fuzzifiées en grandeurs floues. Lors de cette étape, nous avons défini les fonctions d'appartenance de toutes les variables.

La même démarche a été effectuée pour les grandeurs de sortie qui ont été traduites en Is, Ic et Ig par le biais des règles d'inférence.

Le même système MFIS appliqué pour les Solonchaks du nord de l'Algérie a été appliqué pour les Solonchaks de Rélizane (voir chapitre I de la deuxième partie). De ce fait, aucun changement n'a été effectué au niveau des composantes (variables de sortie, variables d'entrée et règles d'inférence) du système MFIS.

Troisième partie

Résultats et discussions

Chapitre I : Classification des Solonchaks du nord de l'Algérie par MFIS

Ce chapitre est consacré à la présentation et la discussion des résultats obtenus par l'application de MFIS sur les Solonchaks du nord de l'Algérie pour déterminer leur lien taxonomique avec les Calcisols et les Gypsisols.

1. Analyse des résultats

Les indices obtenus par MFIS sont consignés dans l'annexe 1 et leurs statistiques descriptives sont présentées dans le tableau IX.

Tableau IX. Paramètres statistiques des indices des trois sols

Indices	Minimum	Maximum	Moyenne
Is	0,15	0,53	0,31
Ic	0,13	0,50	0,25
Ig	0,14	0,51	0,19

Le tableau IX montre que les valeurs extrêmes des indices Is, Ic et Ig sont proches les unes des autres. Ce résultat suggère une certaine similitude entre les sols étudiés. De ce fait, le système considère que certains Solonchak seraient en fait des Calcisols ou des Gypsisols ou, du moins, ces deux groupes de sols présentent une ressemblance aux Solonchaks. Les indices moyens sont de l'ordre de 0,31 pour les Solonchaks, 0,25 pour les Calcisols et 0,19 pour les Gypsisols. Du fait que la classification floue joue en faveur des sols qui ont l'indice le plus élevé, ce résultat signifie que les sols étudiés sont dominés par les Solonchaks.

La figure 29 indique que 41,6 % des indices sont affectés aux Solonchaks, 33,1 % aux Calcisols et 25,2 % aux Gypsisols. Ainsi, cette ordre de classement des fréquences d'indices ($I_s \% > I_c \% > I_g \%$) suggère que les sols étudiés sont prédominés par les Solonchaks.

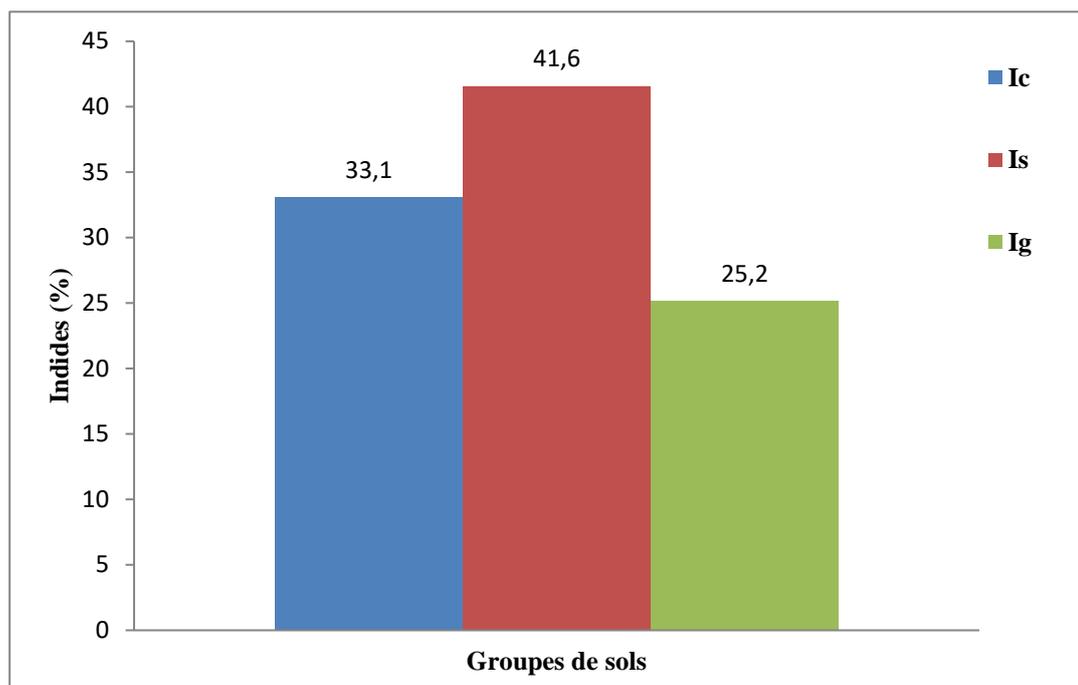


Figure 29. Histogramme de fréquences des indices

Les résultats illustrés par la figures 30 révèlent que :

- Les Solonchaks sont les plus dominants. Ils sont suivis par les Solonchaks qui présentent le même degré de similitude avec les Calcisols. Ceci est démontré par le rapprochement des deux courbes (courbe des Solonchaks et celle des Calcisols).
- Les sols 78 et 89 sont classés Gypsisol par MFIS, contrairement à WRB.
- Les sols 15, 107, 126 et 138 ont un degré de similitude plus élevé pour les Calcisols que pour les Solonchaks. De ce fait, ces sols sont classés par MFIS comme Calcisols et non comme Solonchaks.

Cette différence entre les deux systèmes de classification serait due au fait que MFIS ne prend pas en considération les valeurs seuils définies par WRB. De même, WRB classe les Solonchaks en priorité par rapport aux Calcisols et aux Gypsisols. MFIS se base sur des fonctions d'appartenances pour compenser l'incertitude.

D'après la tendance globale des trois courbes (figure 30), nous concluons que la majorité des Gypsisols est affectée par des indices inférieurs à 0,2. Les indices compris entre 0,2 et 0,4 affectent les sols qui ont pratiquement la même dominance entre Solonchaks et Calcisols. Ces derniers révèlent la présence d'un chevauchement dominant entre Solonchaks et Calcisols par rapport à celui de Solonchaks et Gypsisol. Les indices supérieurs à 0,4 représentent

essentiellement les Solonchaks. Seuls les sols 15, 107, 126 et 138 sont classés Calcisols. En revanche, les sols 78 et 89 sont classés Gypsisol.

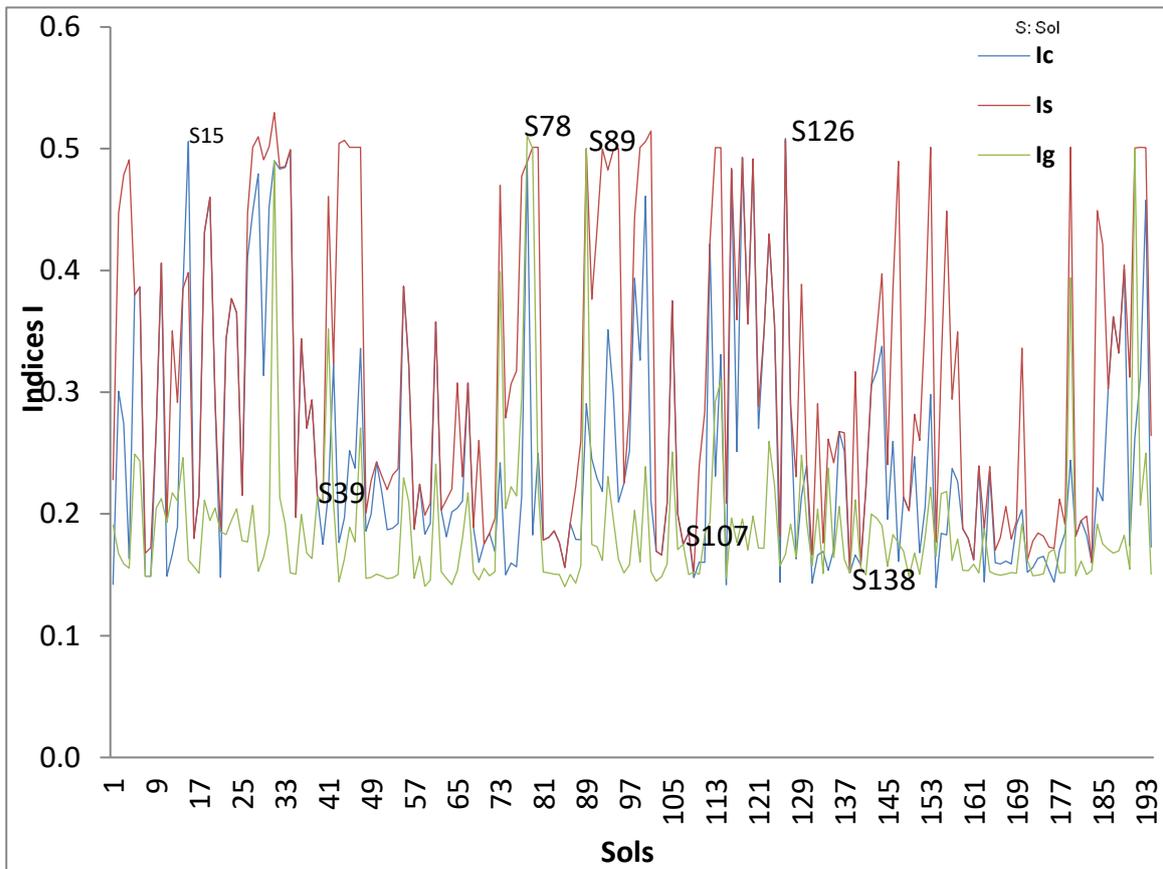


Figure 30. Classification des sols par MFIS

De ce fait, nous pouvons répartir les indices I obtenus par MFIS en trois groupes pour la détermination des fréquences du degré d'appartenance des sols étudiés au sein de chaque groupe:

- Groupe 1 (indices faibles): $I \leq 0,2$
- Groupe 2 (indices moyens) : $0,2 < I \leq 0,4$
- Groupe 3 (indices élevés): $I > 0,4$

1.2. Degré d'appartenance entre les sols étudiés

La figure 31 montre que 50 % des Gypsisols, 32 % des Calcisols et 19 % des Solonchaks se partagent le groupe des indices faibles ($I < 0,2$). Ce résultat signifie que dans ce groupe, les Solonchaks étudiés ont un grand degré d'appartenance avec les Gypsisols et un degré

d'appartenance relativement plus faible avec les Calcisols. De même, certains Solonchaks de ce groupe auraient simultanément un même degré d'appartenance avec les Calcisols et les Gypsisols.

Dans le groupe 2 ($0,2 < I \leq 0,4$), 43 % des indices moyens sont affectés aux Solonchaks contre 39 % aux Calcisols et 18 % aux Gypsisols. Ce résultat suggère que les Solonchaks, qui sont d'ailleurs légèrement dominants dans ce groupe, ont un degré d'appartenance plus grand avec les Calcisols qu'avec les Gypsisols.

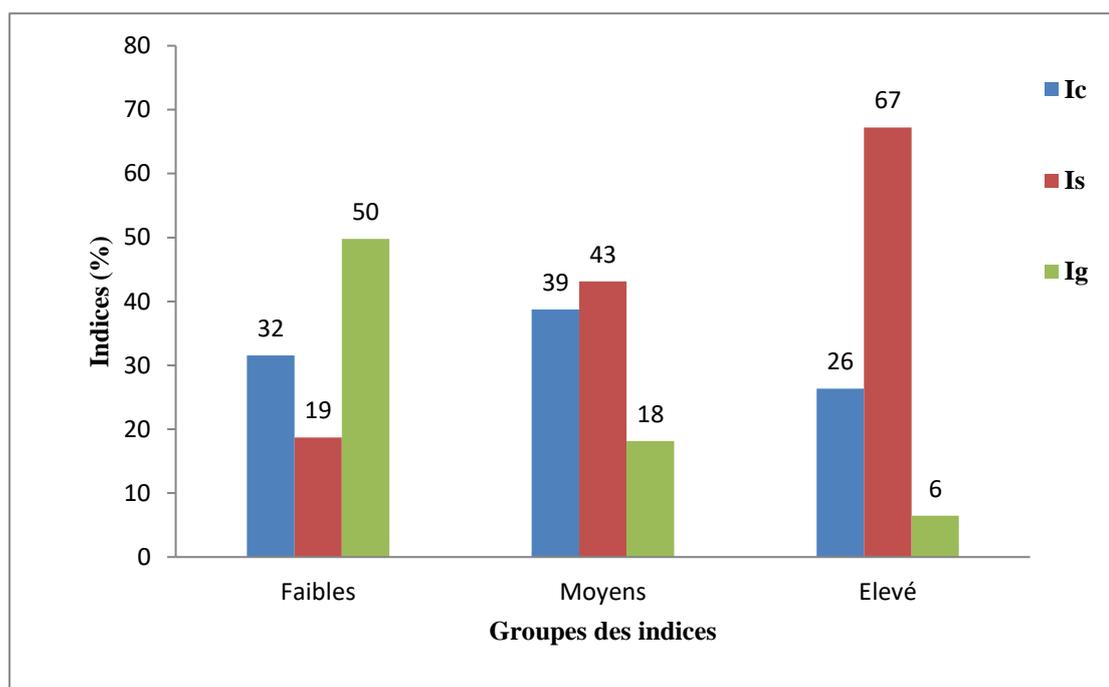


Figure 31. Histogramme des fréquences des groupes d'indices

Dans le groupe 3 ($I > 0,4$), 67 % des indices sont affectés aux Solonchaks contre 26 % et 6 % respectivement aux Calcisols et aux Gypsisols. Ce résultat signifie que les Solonchaks dominent nettement ce groupe. Il suggère aussi que, par rapport aux groupes 1 et 2, les degrés d'appartenance entre les sols du groupe 3 sont faibles et qu'il existe des Solonchaks qui ont une faible appartenance avec les Calcisols et les Gypsisols. Ceci est clairement illustré par la figure 30.

Au total, ces résultats révèlent que les sols étudiés sont fortement dominés par les Solonchaks. Le degré d'appartenance des Solonchaks aux Calcisols ou aux Gypsisols est différent selon le groupe considéré. D'une manière générale, le degré d'appartenance des Solonchaks aux Calcisols est plus fort que celui des Solonchaks aux Gypsisols.

L'analyse des données (tableau I, annexe n° 1) au sein d'un même groupe d'indices d'appartenance permet de déterminer les fréquences des Solonchaks, des Calcisols et des Gypsisols et de leurs éventuels intergrades. Ces résultats sont illustrés par la figure 32 qui révèle que les Solonchaks relativement purs passent de 39,22 % dans le groupe 1 à 64,77 % dans le groupe 2 et à 78,18 % dans le groupe 3. Les Calcisols et les Gypsisols relativement purs ne sont détectés que dans le groupe 3 dans lequel ils ne représentent respectivement que 3,64 % et moins de 2 %. Ainsi, les autres sols de chaque groupe qui ne sont ni Solonchaks purs, ni Calcisols purs et ni Gypsisols purs constitueront donc des sols intergrades avec les Solonchaks.

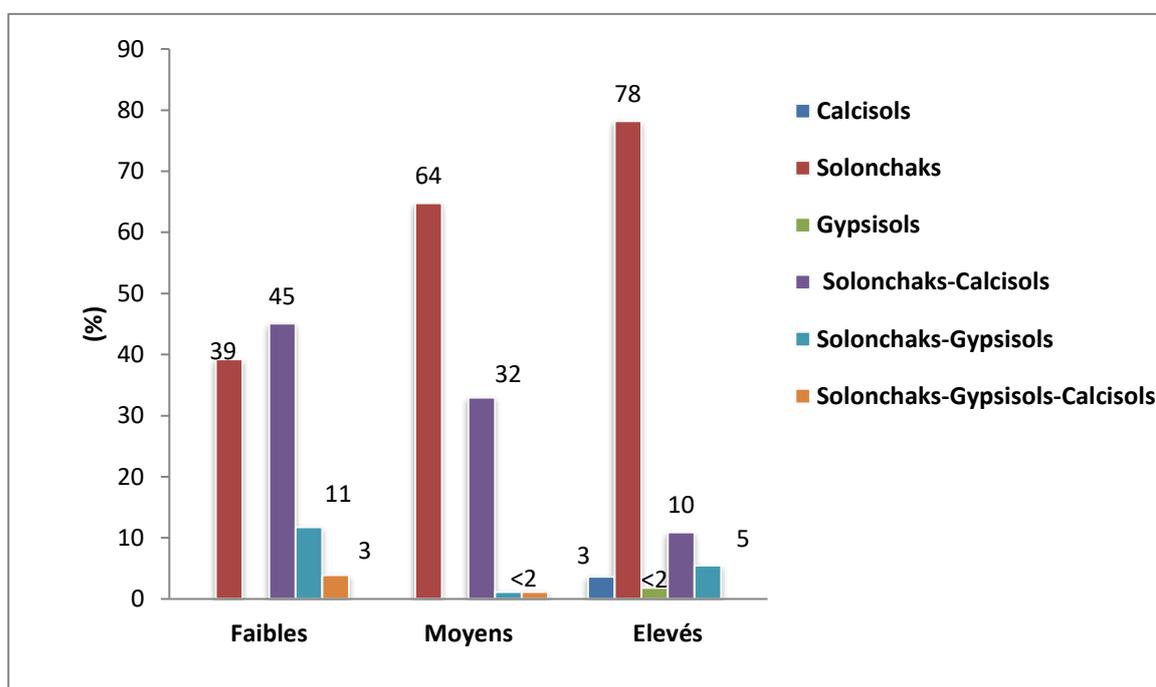


Figure 32. Répartition Fréquentiels des groupes de sols et leurs intergrades

La figure 33 met en évidence trois types de sols intergrades, les Solonchaks-Calcisols, les Solonchaks-Gypsisols et les Solonchaks-Calcisols-Gypsisols. Ces sols intergrades concernent environ 60 % des Solonchaks du groupe 1 avec une nette prédominance des Solonchaks-Calcisols (45,1 %) suivis par les Solonchaks-Gypsisols (11,76 %) et par les Solonchaks-Calcisols-Gypsisols qui ne représentent que 3,92 % dans ce groupe. Ces sols intergrades ne représentent que 34,92 % des sols du groupe 2 et uniquement 16,36 % des sols du groupe 3.

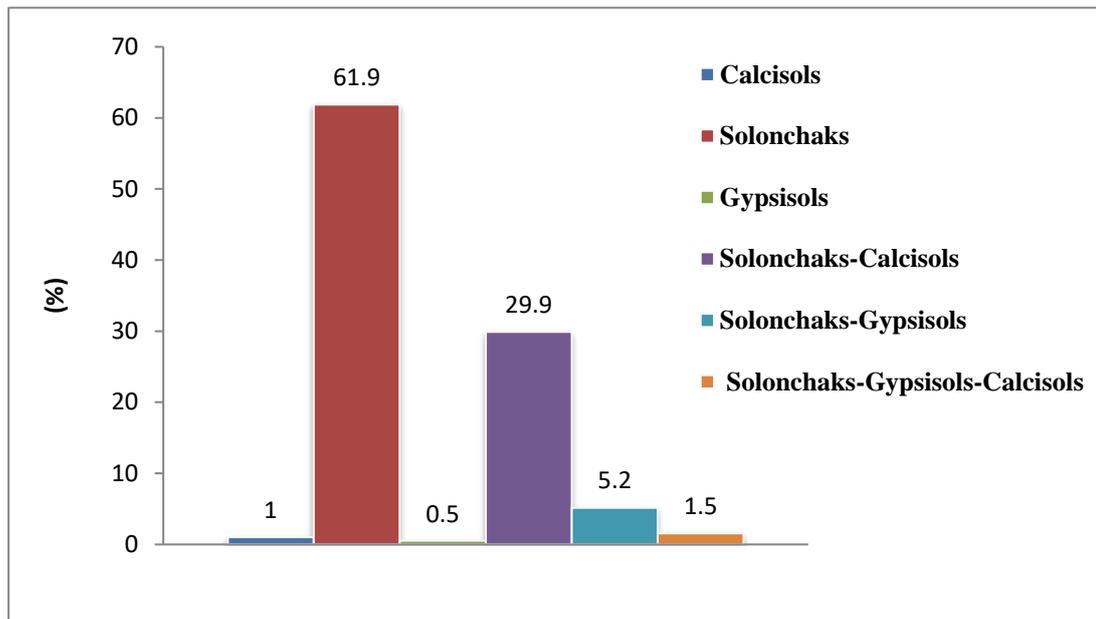


Figure 33. Histogramme des fréquences des groupes de sols et leurs intergrades

Ainsi, MFIS a montré que les Solonchaks du Nord d'Algérie reconnus par WRB renferment en fait des sols qui ont de fortes similitudes avec les Calcisols et les Gypsisols. Ces sols constituent des groupes à part entière de sols intergrades de types Solonchaks-Calcisols, Solonchaks-Gypsisols et Solonchaks-Calcisols-Gypsisols. De même, ce système a montré que certains Solonchaks sont classés comme Calcisols ou Gypsisols à part entière.

En se basant sur la totalité des sols étudiés, la classification par MFIS a montré aussi que les Solonchaks du Nord d'Algérie présentent un degré d'appartenance plus élevé avec les Calcisols (29,9 %) (figure 33) qu'avec les Gypsisols (5,2 %) et que leur appartenance commune au Calcisols et aux Gypsisols ne représente que 1,5 %. De ce fait, le classement des Solonchaks intergrades dans le nord d'Algérie est dans l'ordre Solonchaks-Calcisols, Solonchaks-Gypsisols et Solonchaks-Calcisols-Gypsisols.

MFIS a révélé également que 1 % et 0,5 % des sols étudiés sont en fait respectivement des Calcisols et des Gypsisols et non des Solonchaks. Toutefois, cette classification reconnaît que 61,9 % des Solonchaks du Nord de l'Algérie sont réellement des Solonchaks à part entière.

2. Relations entre les indices des sols obtenus par MFIS et les critères diagnostiques de WRB

Il s'agit ici d'étudier la nature des relations entre les indices obtenus par MFIS pour chaque sol et ses critères diagnostiques définis par WRB (CE, % CaCO₃ total, % gypse, épaisseur de l'horizon diagnostique (E), E×CE et E× % gypse).

Les résultats des corrélations entre les indices obtenus par MFIS et les critères diagnostiques de WRB sont présentés dans le tableau X.

Tableau X. Corrélations entre Is, Ic et Ig et les critères diagnostiques de WRB

Relations	Equations de régression	ddl	r	R ²	Signification
Is, CE	$Is = 0,005 \times CE + 0,15$	192	0,76	0,58	*
Is, E		192	0,01	0	N.S
Is, (E×CE)	$Is = 4,01 \times 10^{-5} (E \times CE) + 0,24$	192	0,49	0,24	*
Ig, gypse	$Ig = 0,004 \times \text{gypse} + 0,15$	192	0,7	0,49	*
Ig, E		192	0,06	0,004	N.S
Ig, (E× gypse)	$Ig = 3,76 \times 10^{-5} (E \times \text{gypse}) + 0,17$	192	0,6	0,36	*
Ic, E		192	0,05	0	N.S
Ic, CaCO ₃ total	$Ic = 0,005 \times \text{CaCO}_3 \text{ total} + 0,11$	192	0,77	0,6	*

* Significative au seuil $\alpha = 0,05$, N.S : non significative

Le tableau X révèle que toutes les corrélations sont positives et significatives ($0,49 < r < 0,77$; $p < 0,05$) sauf celles relatives aux épaisseurs des horizons (E) ($0,01 < r < 0,06$; $p > 0,05$). Les résultats montrent aussi que Is est essentiellement dépendant de CE (figure 34). Cependant, à partir du seuil CE = 40 dS/m, CE n'a plus aucun effet sur Is qui semble atteindre un palier (Is = 0,5), ce qui suggère la recherche d'un autre modèle d'ajustement curvilinéaire.

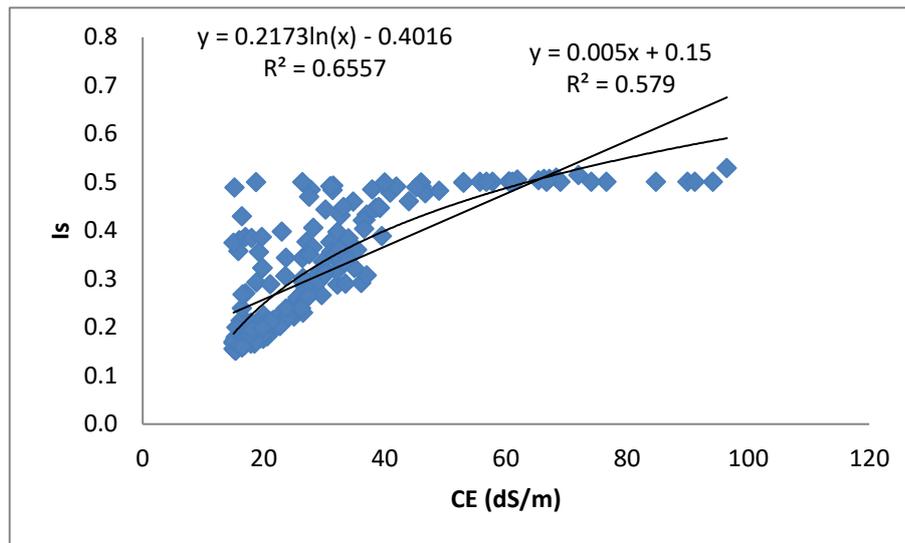


Figure 34. Relation entre Is et CE

Le meilleur modèle d'ajustement trouvé entre CE et Is est le modèle mathématique $Is = 0,21\ln(CE) - 0,4$ (figure 34). Ce résultat signifie que dans le cas des sols étudiés, $Is = 0,5$ est suffisant pour classer ces sols comme Solonchaks.

La relation entre Ig et la teneur en gypse est significative ($r = 0,7$; $p < 0,05$). La figure 35 montre clairement que l'augmentation des teneurs en gypses s'accompagne d'un accroissement de Ig. Autrement dit, plus un sol est gypseux et plus MFIS le rapproche des gypsisols.

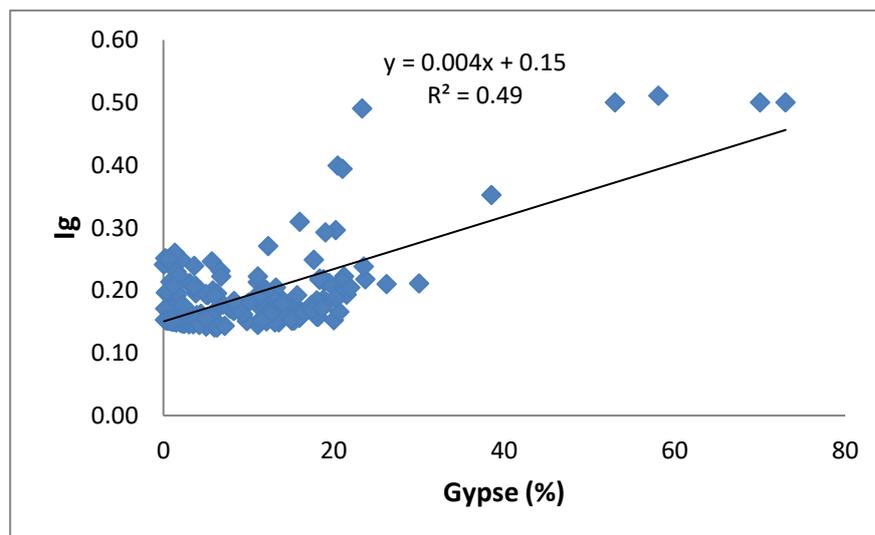


Figure 35. Relation entre Ig et la teneur en gypse

De même, Ic augmente avec l'augmentation de la teneur en calcaire ($r = 0,77$; $p < 0,05$) (figure 36). Ce résultat signifie que plus la teneur en calcaire est forte et plus MFIS le rapproche des Calcisols.

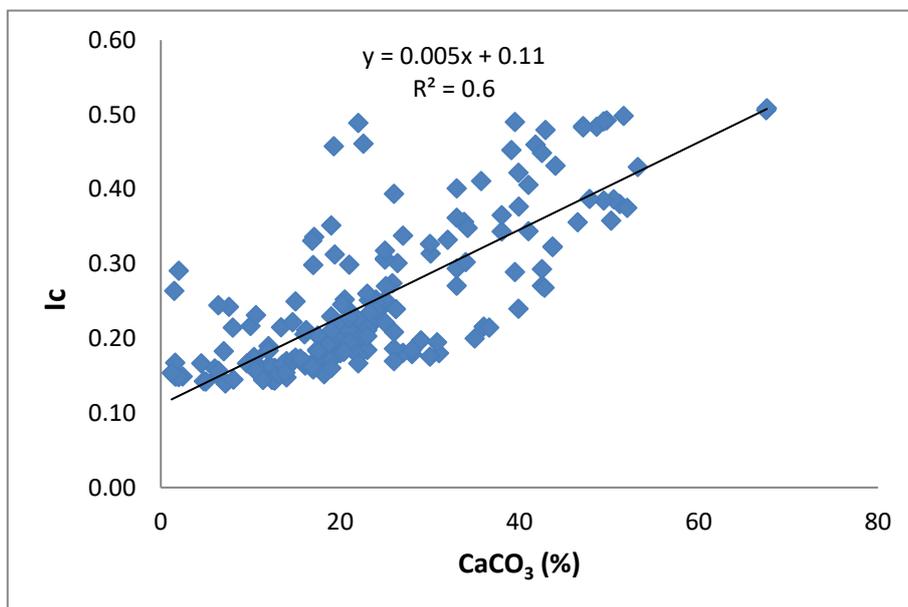


Figure 36. Relation entre Ic et la teneur en CaO₃ total

Les corrélations significatives entre Is, Ig et Ic et les différents critères diagnostiques qui sont respectivement CE, teneur en gypse et teneur en calcaire démontrent que MFIS tient compte réellement de ces critères pour le calcul du centre de gravité Z (indice) au cours de la défuzzification.

Les résultats des corrélations entre Is, Ic et Ig obtenus par MFIS sont présentés dans le tableau XI.

Tableau XI. Relations entre Is, Ic et Ig

Relations	Equations de régression	ddl	r	R ²	Signification
Is, Ic	$Is = 0,82 \times Ic + 0,1$	192	0,7	0,46	*
Is, Ig	$Is = 0,98 \times Ig + 0,13$	192	0,52	0,27	*
Ig, Ic	$Ig = 0,21 \times Ic + 0,14$	192	0,31	0,1	*

* Significative au seuil $\alpha = 0,05$.

Les statistiques (tableau XI) montrent que les relations entre les indices des trois sols pris deux à deux sont toutes positives et significatives ($p < 0,05$).

- La relation $I_s \times I_c$ ($r = 0,7$; $p < 0,05$) est positive et significative (tableau XI). Toutefois, la figure 37 montre que tous les points au dessus de la bissectrice (A-B) sont affectés à I_s ($I_s > I_c$) et les points au dessous le sont à I_c ($I_c > I_s$). Les points très proches ou situés de la droite A-B constituent des intergrades Solonchaks-Calcisols. De ce fait, MFIS, qui se base sur le centre de gravité (centroïde Z) pour le calcul des indices, a confirmé que la plus grande partie des Solonchaks étudiés (points au dessus de A-B de la figure 37) sont effectivement des Solonchaks ($I_s > I_c$). La figure 37 montre aussi que MFIS attribue certains sols aux Calcisols car ce sont des points situés au dessous de A-B ($I_s < I_c$). De même, d'autres sols sont des sols intergrades Solonchaks-Calcisols (points situés sur A-B ; $I_s = I_c$). Par ailleurs, MFIS a révélé que les Solonchaks du Nord d'Algérie sont constitués de 61,9 % de Solonchaks pures, 29,9 % de sols intergrades Solonchaks-Gypsisols et de 1 % de Calcisols.

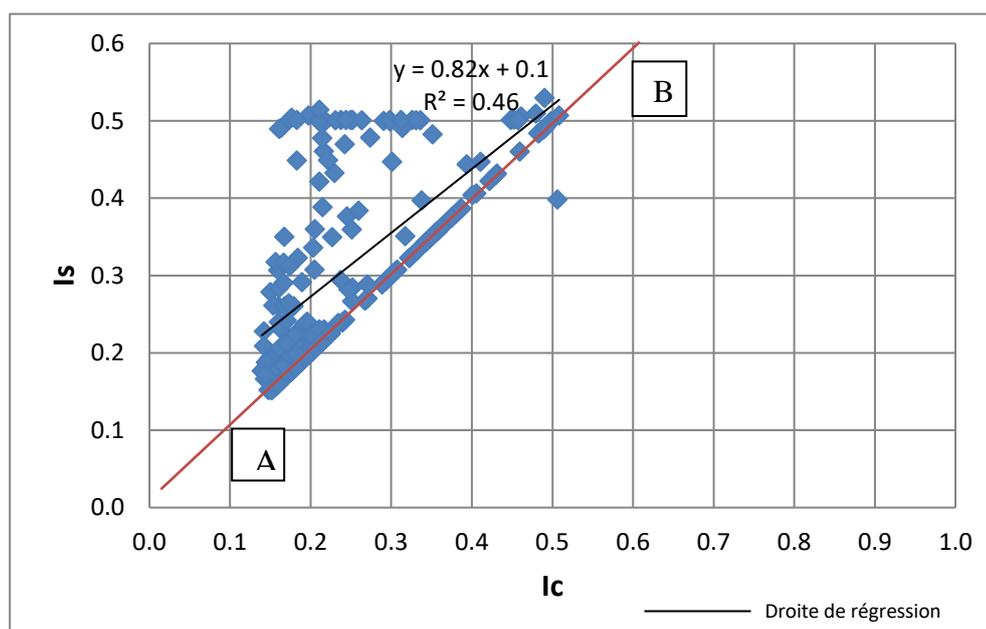


Figure 37. Relation entre I_s et I_c

- La relation $I_s \times I_g$ ($r = 0,52$; $p < 0,05$) est positive et significative (tableau XI). La figure 38 montre que la majorité des points sont au dessus de la bissectrice A-B ($I_s > I_g$), ces sols sont des Solonchaks pures. Cependant, le peu de points qui se situent au dessous de l'axe A-B sont en faveur de I_g ($I_s < I_g$), ces sols sont des Gypsisols. Les points très proches de A-B

ou bien sur A-B qui sont d'ailleurs peu représentés constituent des intergrades Solonchaks-Gypsisols. De même, MFIS a montré que les Solonchaks du nord d'Algérie sont constitués de 61,9 % de Solonchaks pures, 5,2 % de sols intergrades Solonchaks-Gypsisols et de 0,5 % de Gypsisols.

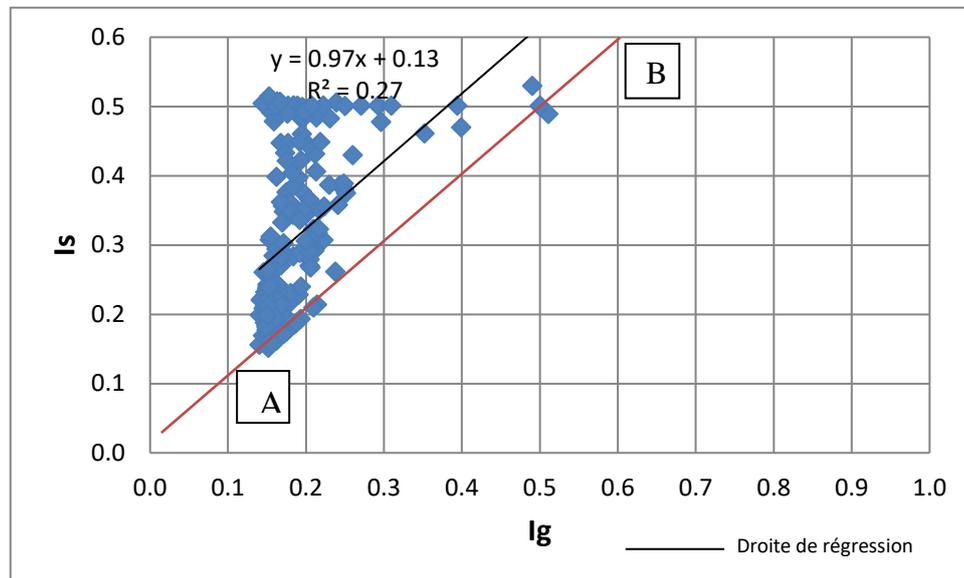


Figure 38. Relation entre Is et Ig

- La relation $Ic \times Ig$ est la moins forte ($r = 0,31$; $p < 0,05$), (figure 39). La faiblesse de cette relation s'explique par le fait que les sols étudiés ne sont ni des Calcisols ni des Gypsisols, mais en réalité des Solonchaks selon WRB. La figure 39 montre que les points au dessus de l'axe A-B sont en faveur des intergrades Solonchaks-Gypsisols et de quelques Gypsisols. Les points qui sont au dessous de l'axe A-B sont en faveur des intergrades Solonchaks-Calcisols et de quelques Calcisols. Les points sur l'axe A-B (ou proches de l'axe A-B) constituent des intergrades Solonchaks-Calcisols-Gypsisols. Par ailleurs, MFIS a révélé que l'intergrade Solonchaks-Calcisols-Gypsisols ne représente que 1,5 % de la totalité des Solonchaks du nord d'Algérie.

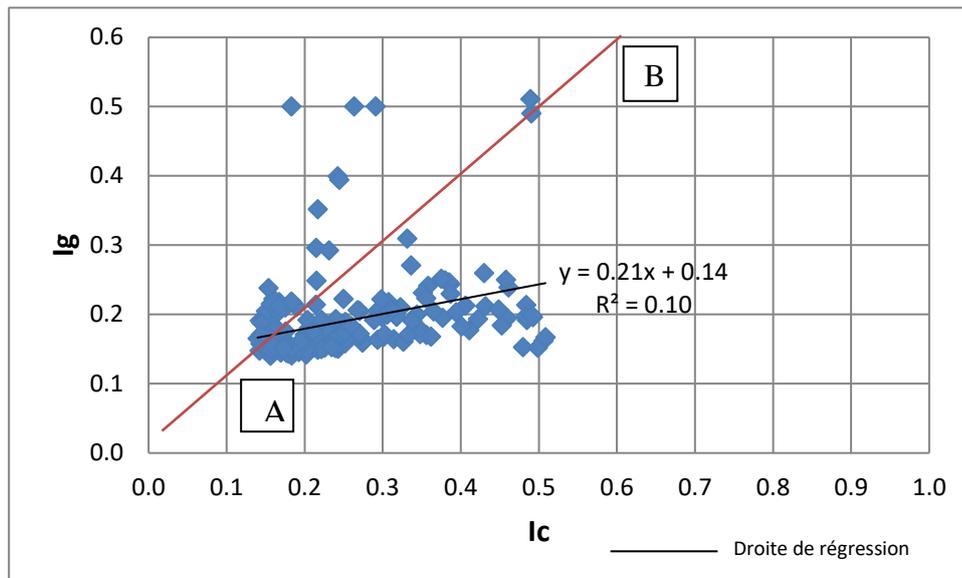


Figure 39. Relation entre Ig et Ic

Ce résultat signifie que I_s est fortement lié à I_c et I_g à cause de l'existence d'un degré d'appartenance entre les trois groupes de sols d'où l'apparition des sols intergrades Solonchak-Calcisol, Solonchak-Gypsisol et Solonchak-Calcisol-Gypsisol.

3. Discussion

La classification de 194 Solonchaks par MFIS a permis l'obtention de trois indices de sols différents, les indices des Solonchaks, ceux des Calcisols et ceux des Gypsisols. Cependant, les résultats ont montré que les indices attribués aux Solonchaks sont les plus dominants ($I_s = 41\%$ environ) comparativement à ceux attribués aux Calcisols ($I_c = 33\%$) et aux Gypsisols ($I_g = 25\%$). Ainsi, MFIS montre que les Solonchaks sont les sols les plus dominants suivis par des Solonchaks qui ont de fortes similitudes avec les Calcisols et par les Solonchaks semblables aux Gypsisols qui, eux, sont les plus faiblement représentés. La répartition de ces indices en différents groupes a montré que MFIS attribue les forts indices aux Solonchaks, et les indices moyens aux Calcisols. En revanche, les Gypsisols sont fortement représentés par le groupe des faibles indices. De ce fait, les Solonchaks étudiés ont de plus fortes chances de constituer des intergrades avec des Calcisols qu'avec des Gypsisols. Ce résultat est confirmé par les calculs qui ont montré que 29,9 % des sols étudiés ont un degré d'appartenance plus élevé avec les Calcisols qu'avec les Gypsisols (5,2 %). Les statistiques le confirment aussi en mettant en évidence une relation plus intense entre les Solonchaks et les Calcisols ($r = 0,7$; $p < 0,05$) qu'entre les Solonchaks et les Gypsisols ($r = 0,52$; $p < 0,05$).

De ce fait, les Solonchaks du Nord de l'Algérie constituent un groupe prédominant de sols intergrades avec les Calcisols (29,9 %) et un autre groupe de sols intergrades moins important avec les Gypsisols (5,2 %). Cette classification a montré aussi que le degré d'appartenance simultanée de ces Solonchaks avec les Gypsisols et les Calcisols constitue un groupe de sols intergrades très peu représenté (< 2 %). De même, il s'est avéré que 1 % et 0,5 % des 194 Solonchaks classés par WRB sont reconnus respectivement comme Calcisols et Gypsisols par MFIS. Cette différence entre les deux systèmes de classification serait due au fait que les valeurs seuils des critères diagnostiques définies par WRB ne seraient pas adaptées à tous les contextes pédologiques. Elle serait due également à l'ordre de priorité retenu par WRB pour classer les groupes. En conséquence, des informations importantes sont perdues (Zhua et Lawrence, 1996) en matière de cartographie des sols, qui sont dues en particulier à la fragmentation taxonomique. A l'inverse, MFIS, qui est une classification continue et numérique (McBratney et Odeh, 1997 ; Carré et Jacobson, 2009) et qui se base sur les variables linguistiques et sur les fonctions d'appartenances de types gaussiens pour chaque critère considéré fait abstraction de ces valeurs seuils. En outre, MFIS fournit des informations sur les chevauchements de groupes de sols (Viscarra et al., 2016). Ainsi donc, ce système ne reconnaît la prévalence des Solonchaks sur les autres groupes (sols intergrades, Calcisols et Gypsisols) que sur 61,9 % de l'effectif des sols étudiés. Ce résultat révèle que les deux systèmes utilisés (WRB et MFIS) sont favorables au groupe Solonchak.

La classification par MFIS des 194 Solonchaks de WRB a mis en évidence l'existence de différents degrés d'appartenances de ces Solonchaks avec les Calcisols et les Gypsisols d'où une meilleure perception de la réalité du terrain grâce à la détermination des différents groupes de sols intergrades.

Les tests statistiques ont montré une forte corrélation entre les indices obtenus par MFIS et les critères diagnostiques de chaque groupe de sols. De même, la corrélation de I_c ou I_g avec I_s est significative, ce qui explique l'existence de groupes de sols intergrades.

Conclusion

En conclusion, MFIS a permis de subdiviser les Solonchaks en plusieurs groupes et de mettre en évidence des sols intergrades. Du fait que la démarche adoptée pourrait être appliquée à n'importe quels types de sols du monde, MFIS pourrait constituer un outil efficace pour améliorer les classifications conventionnelles des sols. MFIS constitue donc un outil de base intéressant pour le classement et la cartographie des sols et un support indéniable dans l'agriculture de précision.

Chapitre II : Classification temporelle des Solonchaks de Rélizane par MFIS

Ce chapitre est subdivisé en deux grands sous-chapitres :

- Le premier sous-chapitre est consacré à l'étude du suivi de l'évolution du profil salin, de la composition cationique du complexe adsorbant et la composition ionique de la solution du sol sur une période de deux années correspondant à quatre campagnes de mesures :

- Deux campagnes d'échantillonnage de sol ont été effectuées en janvier 2012 et en janvier 2013. Elles correspondent à la saison humide.
- Deux campagnes d'échantillonnage de sol ont été effectuées en août 2012 et en août 2013. Elles correspondent à la saison sèche.

- Le deuxième sous-chapitre est consacré à l'application de MFIS sur les profils étudiés pour examiner leurs éventuels changements taxonomiques en fonction de la variation saisonnière de leur salinité.

1. Les Solonchaks de Rélizane

Dans ce qui suit, nous présentons et discutons les résultats d'analyses des Solonchaks étudiés successivement pour chacune des campagnes de mesures.

1.1. Première campagne

La première campagne correspond à la période humide. Les prélèvements ont été effectués en janvier 2012.

1.1.1. Les constituants des sols

Le tableau XII montre que la texture est homogène dans les profils 3 et 4 et accuse quelques variations dans les profils 1 et 2. Les fractions argileuses et limoneuses sont dominantes dans le profil 1. Tous les horizons sont argilo-limoneux sauf Cgnz1 et Cgnz2 qui sont respectivement limono-argileux et limoneux. La distribution hétérogène dans le profil de ces fractions granulométriques confirme l'origine et le caractère alluvial du matériau parental du sol. Dans le profil 2, la texture est argilo-limoneuse ou limono-argileuse selon l'horizon considéré. Les profils 3 et 4 ont des teneurs élevées en argile ($47,7 \% < A < 66 \%$) et en limon ($28 \% < A < 47,5 \%$) et donc des taux de sables très faibles dans l'ensemble de leurs horizons

(< 1 %) sauf dans Anz du profil 4 qui en enregistre un taux de 5 % environ. Dans ce profil, tous les horizons sont argilo-limoneux.

Le tableau XII montre aussi que les taux de gypse et de calcaire varient peu dans les profils. Les teneurs en gypse sont faibles dans l'ensemble des profils ($\text{CaSO}_4 < 2,6 \%$). D'une manière générale, le gypse est faiblement représenté dans la région d'étude (Douaoui, 2005). Les teneurs en calcaire sont moyennes ($14,4 \% < \text{CaCO}_3 < 23,51 \%$) et leurs distributions dans le profil sont homogènes.

Tableau XII : Résultats analytiques des constituants des sols (1^{er} campagne)

	Horizons	Profondeur (cm)	Gypse (%)	CaCO ₃ (%)	Argiles (%)	Limons (%)	Sables (%)	textures
Profil 1	Anz	0-17	1,1	23,5	52,1	42,4	1,3	A-L
	BCnz	17-33	1,2	20,2	57,9	35,3	1,7	A-L
	Cnz	33-45	2,6	21,8	48,1	42,3	5,4	A-L
	Cgnz1	45-110	2,4	20,2	30,6	58,4	5,9	L-A
	Cgnz2	110-150	2,2	20	22,4	51,5	21	L
Profil 2	Anz	0-10	0,6	18	38,8	42	13,5	A-L
	ABnz	10-19	0,6	22,2	42	51,2	2,7	L-A
	Cgnz1	19-28	2,1	19	30	63,2	3,7	L-A
	Cnz2	28-38	0,9	19,2	32,9	54,6	8,3	L-A
	Cgnz3	38-60	0,6	19,3	23,4	57,2	15,2	L-A
Profil 3	Anz	0-17	0	17	47,7	47,5	<1	A-L
	Bgnz1	17-42	0,5	17,8	54	46,5	<1	A-L
	Bgnz2	42-74	0,5	17,9	55,8	41	<1	A-L
	Bgnz3	74-115	1,2	18,4	55,5	40	<1	A-L
	Cgnz	115-150	0,8	14,4	57,6	39,2	<1	A-L
Profil 4	Anz	0-36	0,4	18,8	66	28	4,6	A-L
	Bgnz1	36-65	0,5	17	65,5	30,2	<1	A-L
	Bgnz2	65-88	1	17,9	61,5	38,1	<1	A-L
	Cnz	88-100	0,9	15,5	65,6	30,4	<1	A-L

A-L : Argilo-Limoneux, L-A : Limono-Argileux, L : Limoneux

Ltifi (2008) a montré que la texture et la structure du sol agissent sur le processus de salinisation selon son pouvoir drainant. Ainsi, un sol à texture grossière, perméable et bien drainant est peu affecté par la salinisation. De ce fait, la lixiviation des sels en profondeur est très fréquente. En revanche, les sols lourds, peu perméables et de texture fine sont plus affectés par l'hydromorphie et la salinisation.

Les sols sableux ont une vitesse élevée d'écoulement capillaire mais une hauteur limitée de remontée. Par contre, les sols argileux ont une vitesse d'infiltration faible, théoriquement, une

hauteur considérable de remontée capillaire. Dans ces sols argileux, la remontée capillaire est parfois assez réduite à cause des fissures qui se forment lors du dessèchement et qui provoquent une rupture du système capillaire. Contrairement, les sols limoneux, qui ne présentent pas de fissures lors du dessèchement, sont les plus affectés par la salinisation du fait qu'ils combinent une vitesse moyenne d'infiltration de l'eau avec une remontée capillaire élevée (Van Hoorn, 1981).

1.1.2. Le complexe adsorbant

Les résultats des analyses du complexe adsorbant sont présentés dans le tableau XIII.

Tableau XIII. Garniture cationique du complexe adsorbant (1^{er} campagne)

Horizons	Na ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	∑ bases	CEC	Taux de saturation	
	%				cmol(+)/ kg	cmol(+)/ kg	%	
Profil 1	Anz	25,2	46	25,60	6,14	20,59	20,83	102,94
	BCnz	32,04	44,5	18,32	3,12	21,68	22,13	98
	Cnz	26,32	43,4	27,63	2,32	18,94	19	99,67
	Cgnz1	38,89	48,2	15,72	2,28	18,92	18	105,09
	Cgnz2	32,29	54,3	14,86	2,21	14,51	14	103,66
Profil 2	Anz	29,55	45,9	19,32	5,19	17,73	17,74	99,96
	ABnz	26,33	46	20,71	5,39	19,17	19,48	98,43
	Cgnz1	24,89	43,6	32,39	3,83	18,85	18	104,71
	Cnz2	29,72	40,9	21,28	4,28	17,31	18	96,25
	Cgnz3	33,41	41,9	20,24	3,94	16,91	17	99,49
Profil 3	Anz	9,44	43,6	44,89	2,11	18,01	18	100,04
	Bgnz1	33,37	40	22,32	4,84	19,1	19	100,53
	Bgnz2	24,6	48,3	20,75	5,95	19,92	20	99,6
	Bgnz3	23,1	45,8	22,50	5,45	19,37	20	96,85
	Cgnz	28,25	36,5	30,92	2,13	23,47	24	97,8
Profil 4	Anz	28,42	47	18,76	3,24	18,51	19	97,42
	Bgnz1	28,48	45,4	20	2,27	20,19	21	96,15
	Bgnz2	34,9	43	19,90	2,65	20,09	20	100,45
	Cnz	33,36	41,1	19,65	2,17	21,18	22	96,28

La capacité d'échange cationique oscille entre 14 et 24 cmol(+)/kg de terre (tableau XIII). Le complexe adsorbant est dominé par le calcium (36,5 % < Ca⁺⁺ < 54,3 %) et le magnésium (14,86 % < Mg⁺⁺ < 44,89 %). Les taux de potassium sont faibles (2,11 à 6,14 %). Les taux de sodium échangeable (ESP) sont variables (9 % < ESP < 38 %) selon l'horizon et le sol considérés. Tous les horizons sont sodiques (ESP > 15 %), sauf Anz du profil 1 (ESP = 9 %)

qui est également l'horizon le moins salé (CE = 2,61 dS/m). Le classement des bases échangeables par ordre des grandeurs décroissantes est de type $Ca^{++} \% > Na^{+} \% > Mg^{++} \% > K^{+} \%$. Tous les sols étudiés sont saturés en bases échangeables.

1.1.3. La solution du sol

Les paramètres analysés et les résultats statistiques sont présentés dans le tableau XIV. Le classement des cations de la solution du sol par ordre des grandeurs est de type $Ca^{++} \% > Na^{+} \% > Mg^{++} \% > K^{+} \%$. Il est analogue à celui des bases échangeables du complexe adsorbant.

Tableau XIV: Résultats analytiques et statistiques de la solution des sols (1^{er} campagne)

	Horizons	pH	CE dS/m	Na ⁺ meq/l	K ⁺ meq/l	Ca ⁺⁺ meq/l	Mg ⁺⁺ meq/l	Σ ⁺	HCO ₃ ⁻ meq/l	Cl ⁻ meq/l	SO ₄ ⁻ meq/l	Σ ⁻	SAR
Profil 1	Anz	7,63	23,5	125,6	10,16	50,25	30,64	216,65	2	200	30	232	19,75
	BCnz	7,75	27,1	180,65	3,82	50,25	26,67	261,39	2	240	30	272	29,13
	Cnz	7,18	41,5	208,27	4	135,63	78,82	426,72	8	373,91	94,2	476,11	20,11
	Cgnz1	7,3	57,4	322,04	4,94	215,08	36,08	36,92	9	500,13	80,6	589,73	28,69
	Cgnz2	7,6	37,3	200	5,21	292,75	33	530,96	2,61	378,26	141,2	522,11	15,67
Profil 2	Anz	7,5	40,1	220	5	34,67	209,6	469,05	2,61	300,65	149,8	453,06	18,56
	ABnz	7,1	55,1	270,25	2,57	40,88	260,9	574,6	2,61	385,96	149,8	538,06	20,92
	Cgnz1	7,3	54,6	250	4,54	35,73	230,5	520,5	1,74	430,43	158,43	590,53	21,67
	Cnz2	7,1	65	400,75	2,88	54,67	286,38	744,67	1,74	560,87	160	722,87	30,69
	Cgnz3	7,2	59	300	4	39,6	290,49	634,09	5,22	539,13	115,56	659,69	23,35
Profil 3	Anz	7,3	2,61	20	1,14	8,58	2,52	32,24	2	15	7	24	8,9
	Bgnz1	7,3	36,2	240,6	4,94	106,25	26,67	378,46	1	365	50	416	29,51
	Bgnz2	7,3	32,9	250	1,95	106,25	26,67	384,87	6	386	30	422	30,67
	Bgnz3	7,4	38,2	230	0,5	120	100	450,5	2,52	386,96	98,4	487,88	21,93
	Cgnz	7,49	42,2	261	0,5	124,58	105,6	491,85	6	335	128,4	489,4	24,33
Profil 4	Anz	7,55	14,53	89,7	3,44	35,25	21,67	150,06	2	120,17	38,52	160,69	16,81
	Bgnz1	7,4	24,3	200,68	0,83	47,25	30,64	279,4	2	234	30	266	32,16
	Bgnz2	7,28	28,4	230,78	1,39	35,25	25,67	293,09	2	265	40	307	41,81
	Cnz	7,12	27,4	228,5	1,58	45,25	23,67	299	1	250,87	40	391,87	38,93
C.V (%)		2	43										

Le pH varie entre 7,1 et 7,63 (tableau XIV) ce qui signifie que ce paramètre est peu variable dans l'espace et dans le profil (CV = 2 %). La gamme de ces pH correspond à une réaction alcaline du sol.

CE varie selon la profondeur (tableau XIV). Exception faite de l'horizon de surface du profil 3 (CE = 2,61 dS/m), la salinité est forte dans l'ensemble des horizons, en particulier dans les horizons de profondeur. Ses valeurs maximales sont de l'ordre de 57,4 dS/m, 65 dS/m,

42,2 dS/m et 28,4 dS/m respectivement dans les profils 1, 2, 3 et 4. Ces valeurs maximales se localisent en bas des profils (figure 40) sauf dans le profil 1 (figure 40) où elles sont observées dans sa partie médiane (CE = 57,4 dS/m). La variabilité spatiale de CE est assez forte (CV = 43 %).

La figure 40 montre que trois profils salins sont de type descendant (profils 2, 3 et 4) et un profil de type convexe (profil 1). Ces deux types de profils salins se caractérisent par un gradient de salinité descendant, seule la localisation du niveau de salinité maximum diffère entre eux. Ce phénomène serait dû à une lixiviation des sels provoquée par les pluies et qui se seraient accumulés au niveau des horizons de profondeur. Les pluies auraient provoqué une augmentation de CE dans les parties médianes des quatre profils.

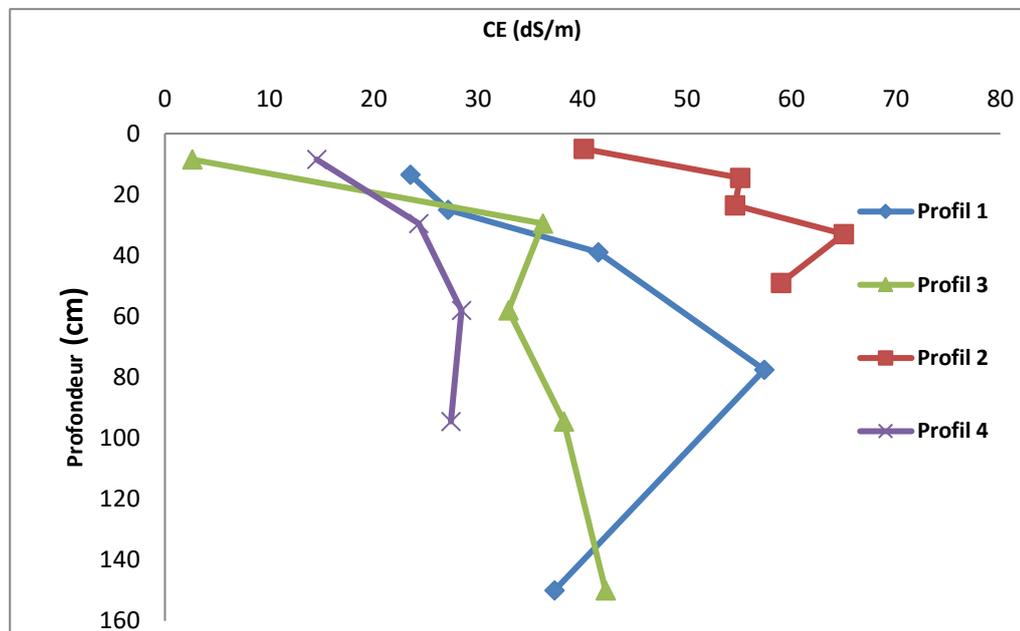


Figure 40. Profils salins des quatre profils (1^{er} campagne)

Avec des taux moyens compris entre 47 % et 62 %, Na^+ est le cation dominant dans la solution du sol des quatre profils (tableau XIV et figure 41). Sa concentration varie entre 20 meq/l et 400,75 meq/l. Le Ca^{++} occupe la deuxième position dans les profils 1, 3 et 4 avec des taux respectifs de 23 %, 27 % et 24 % et des concentrations qui oscillent entre 8,58 meq/l et 292,75 meq/l. Dans le profil 2, Ca^{++} se situe en troisième position après Mg^{++} avec un taux de 7 % et une concentration comprise entre 34,67 meq/l et 54,67 meq/l. Mg^{++} se situe en troisième position sauf dans le profil 2. K^+ vient en dernière position pour tous les profils avec un taux inférieur à 5 %. Ainsi, le classement des cations selon la prédominance est de type :

- $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{++} > \text{Mg}^{++} > \text{K}^+$ pour les profils 1, 3 et 4.
- $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{++} > \text{Ca}^{++} > \text{K}^+$ pour le profil 2.

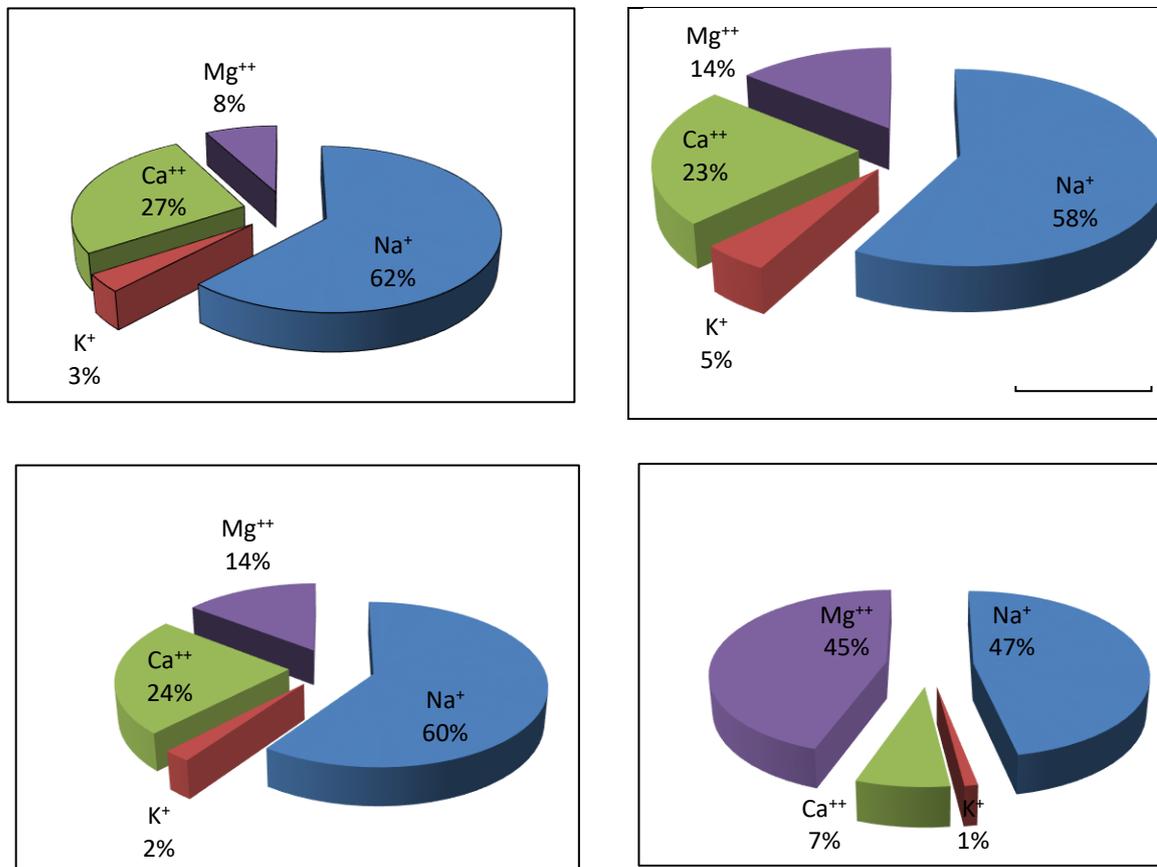


Figure 41. Répartition des cations dans la solution du sol (1^{ère} campagne)

Cl^- est l'anion dominant dans la solution du sol (tableau XIV et figure 42). Il représente entre 64 % et 86 % des anions avec des concentrations qui varient entre 15 meq/l et 560,87 meq/l. SO_4^- se situe en deuxième position avec des taux qui oscillent entre 13 % et 33 % et des concentrations qui varient entre 7 meq/l et 160 meq/l. HCO_3^- , avec des taux inférieurs à 8 % et des concentrations oscillant entre 1 meq/l et 9 meq/l, est le moins bien représentés. De ce fait, l'ordre de classement des anions selon leur prédominance est toujours de type $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^- > \text{HCO}_3^-$.

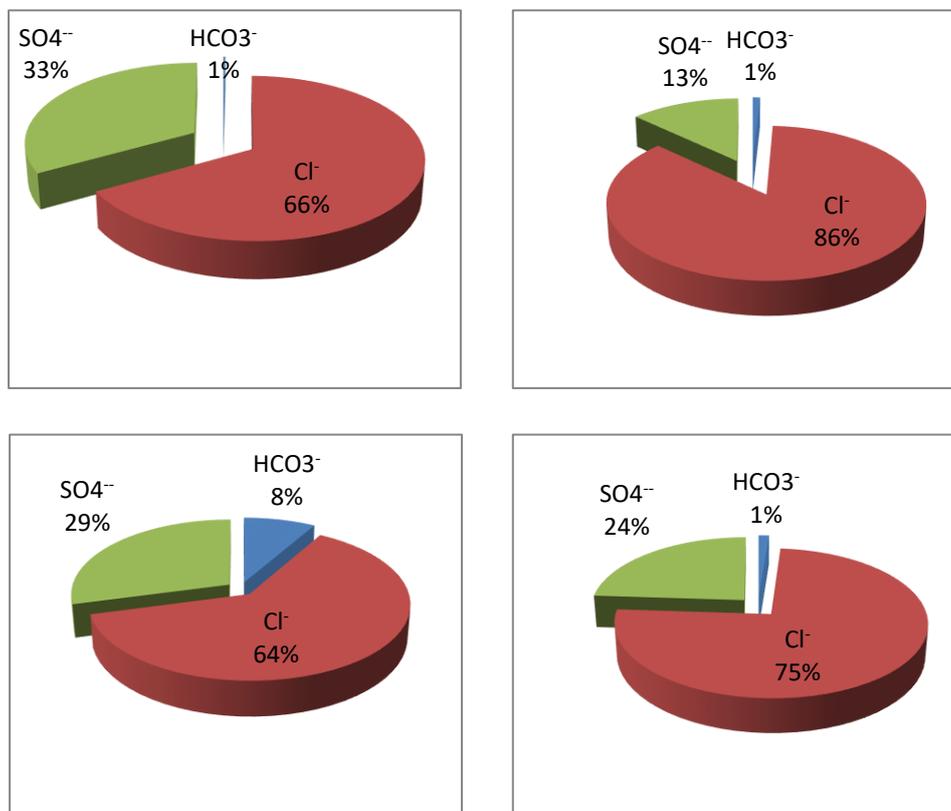


Figure 42. Répartition des anions dans la solution du sol (1^{ère} campagne)

Le SAR varie entre 8 et 41 (tableau XIV). L'horizon de surface du profil 3 se caractérise par un SAR relativement faible (SAR = 8) comparativement aux autres horizons. Notons que les valeurs de CE et de ESP de cet horizon sont également relativement faibles (CE = 2,6 dS/m ; ESP = 9,44 %). Cependant, le SAR des autres horizons est très élevé (SAR > 15) d'où l'important risque de sodicité.

Le diagramme de Piper (figure 43) révèle trois types de faciès chimiques de la solution des sols. Un faciès de type chloruré sodique pour la majorité des horizons et un faciès de type chloruré calcique pour un seul échantillon (Cgnz2) du profil1. Le faciès chloruré sans dominance particulière de l'un des cations représente les échantillons Cnz du profil1, Anz du profil2, ABnz, Cgnz1 et Cgnz3 du profil2.

Ces faciès chimiques indiquent que ces sols évoluent selon la voie saline neutre. Ceci est fréquent en Afrique du Nord (Cheverry, 1974 ; Vallès et al., 1989 ; Vallès et al., 1997). En

Algérie, ces résultats rejoignent ceux de Daoud (1993) pour les sols du Bas-Chélif, Hamdi-Aïssa (2004) pour les sols de Ouargla, Djamai (2007) pour les sols salés de Fetzara.

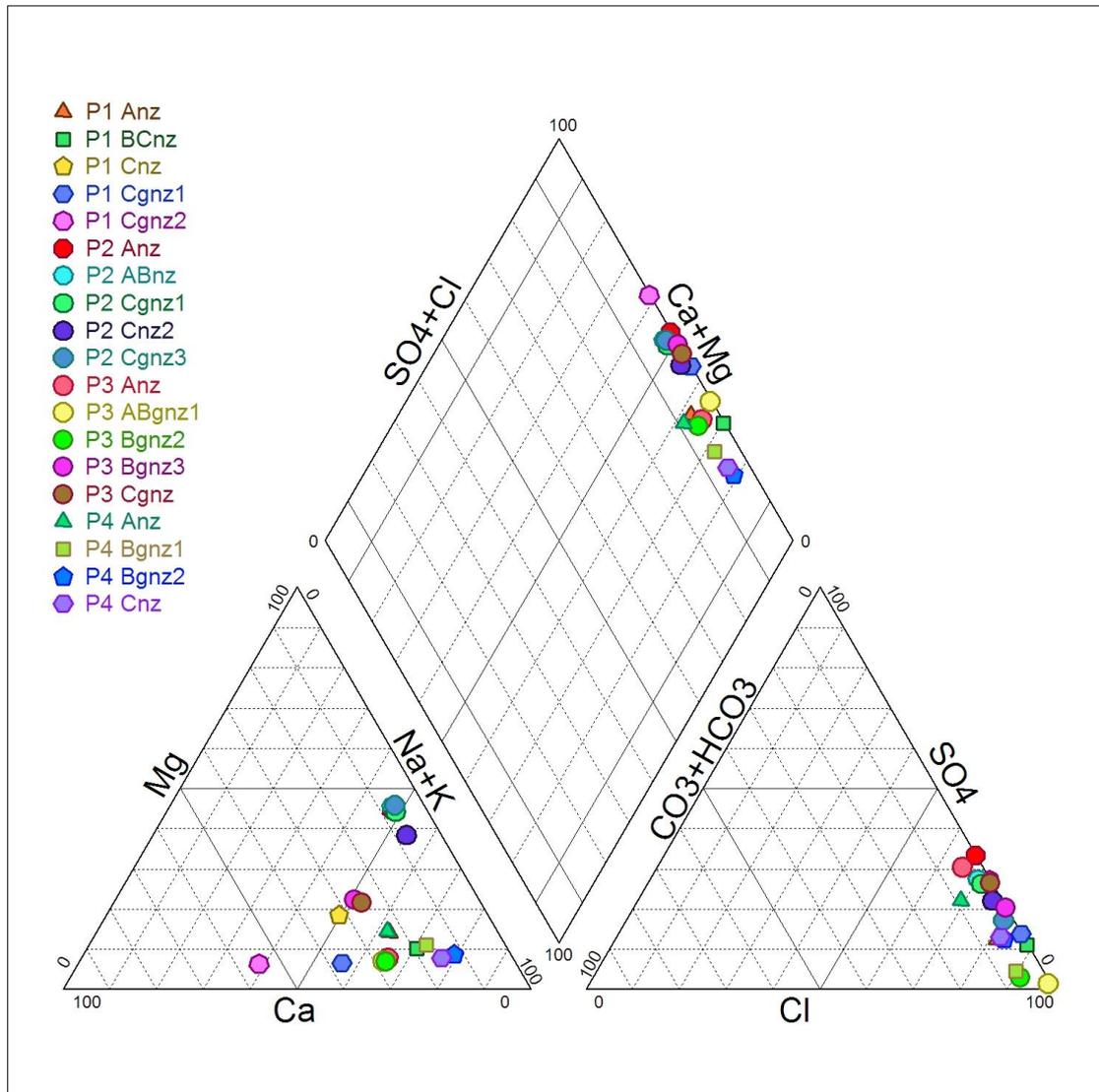


Figure 43. Faciès chimiques des solutions du sol (1^{er} campagne)

1.1.4. Analyse statistique

L'ACP représentée par la figure 44 a été effectuée sur toutes les variables (pH, CE, Na⁺, Mg⁺⁺, Ca⁺⁺, K⁺, SO₄⁻, HCO₃⁻ et Cl⁻).

L'axe 1 extrait 47,94 % de l'inertie du nuage de points et l'axe 2 extrait 18,79 % de l'inertie résiduelle. Ainsi, l'essentiel de l'information contenue dans les résultats est consignée dans les axes 1 et 2 de l'ACP.

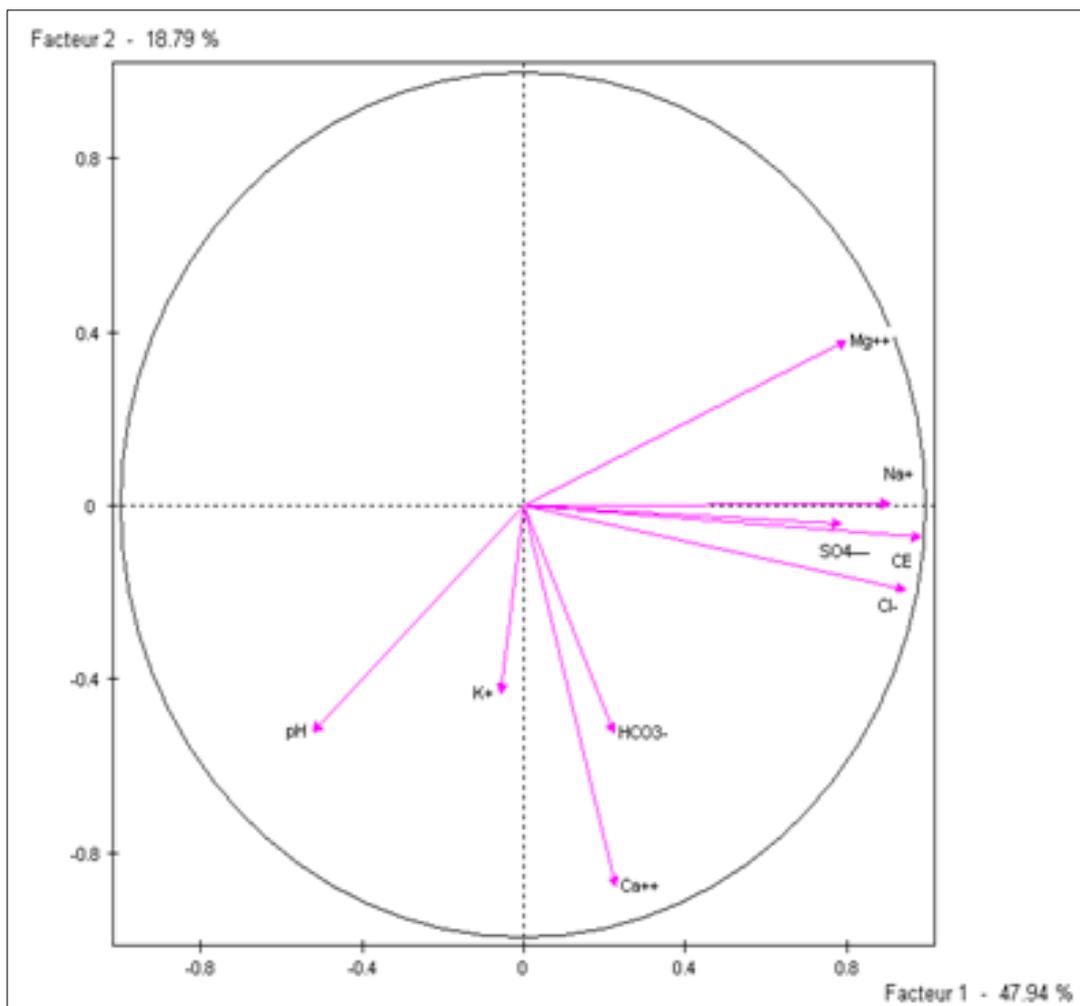


Figure 44. ACP effectuée sur neuf variables (1^{er} campagne)

Le premier axe est formé par la contribution des variables Cl^- ($r = 0,96$), SO_4^- ($r = 0,82$), CE ($r = 0,99$), Na^+ ($r = 0,92$) et Mg^{++} ($r = 0,79$) (tableau XV). L'axe 2 est formé par la contribution des variables HCO_3^- ($r = 0,55$), Ca^{++} ($r = 0,85$), K^+ ($r = 0,43$) et pH ($r = -0,56$). Le pH contribue aussi à l'axe 1 (tableau XV).

De ce fait, il s'avère que Cl^- (20,4 %), Na^+ (18,7 %), Mg^{++} (13,81 %) et SO_4^- (14,91 %) (Tableau XVI) ont plus de poids sur la variation de CE comparativement aux autres éléments (K^+ , Ca^{++} , pH et HCO_3^-).

Tableau XV: Corrélations entre les différents paramètres chimiques et les facteurs (1^{er} campagne)

paramètres	F1	F2	F3	F4	F5
pH	-0,50	0,56	0,46	-0,31	0,14
CE	0,99	0,04	0,08	0,06	-0,03
Na ⁺	0,92	-0,03	-0,14	0,01	-0,26
K ⁺	0,01	0,43	0,70	0,51	-0,11
Ca ⁺⁺	0,26	0,85	-0,20	-0,28	-0,19
Mg ⁺⁺	0,79	-0,41	0,36	-0,02	0,26
HCO ₃ ⁻	0,38	0,55	-0,50	0,29	0,47
Cl ⁻	0,96	0,16	-0,05	0,04	-0,15
SO ₄ ⁻	0,82	0,01	0,35	-0,36	0,20

Tableau XVI : Contribution des différents paramètres chimiques dans la formation des facteurs (1^{er} campagne)

Paramètres	F1 (%)	F2 (%)	F3 (%)	F4 (%)	F5 (%)
pH	5,60	18,02	16,83	14,25	4,17
CE	21,81	0,09	0,48	0,51	0,18
Na ⁺	18,70	0,05	1,62	0,03	14,37
K ⁺	0,00	12,42	38,81	40,07	2,52
Ca ⁺⁺	1,48	41,29	3,22	12,14	7,57
Mg ⁺⁺	13,81	9,64	10,19	0,07	13,47
HCO ₃ ⁻	3,29	17,09	19,16	12,73	44,92
Cl ⁻	20,40	1,40	0,21	0,31	4,91
SO ₄ ⁻	14,91	0	9,49	19,89	7,89

La matrice de corrélation (tableau XVII) révèle que les corrélations sont significatives et positives entre les couples CE-Na⁺ ($r = 0,91$), CE-Mg⁺⁺ ($r = 0,78$), CE-Cl⁻ ($r = 0,95$) et CE-SO₄⁻ ($r = 0,8$). Ces corrélations démontrent l'existence de fortes relations entre la salinité et Na⁺, Mg⁺⁺, Cl⁻ et SO₄⁻. D'ailleurs, ces derniers sont les variables les plus proches du cercle des corrélations de l'ACP (figure 44).

Tableau XVII : Matrice de corrélation entre les différents paramètres chimiques (1^{er} campagne)

Paramètres	pH	CE	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻
pH									
CE	-0,45								
Na⁺	-0,51*	0,91*							
K⁺	0,38	0,12	-0,08						
Ca⁺⁺	0,25	0,25	0,23	0,16					
Mg⁺⁺	-0,42	0,78*	0,60*	0,03	-0,26				
Cl⁻	-0,12	0,37	0,30	0,01	0,49*	0,01			
HCO₃⁻	-0,41	0,95*	0,93*	0,08	0,39	0,64*	0,42		
SO₄⁻	-0,16	0,80	0,61*	0,07	0,24	0,81*	0,13	0,69*	

*corrélations significatives au seuil $\alpha = 0,05$ (ddl=17)

Conclusion

En général, la texture des profils étudiés est argilo-limoneuses. Les sables sont très peu représentés. De même, ces profils sont partout calcaires avec des taux qui se situent autour de 20 %. La distribution du calcaire reste homogène dans les profils. Le gypse est faiblement représenté avec des teneurs inférieures à 2,6 %.

Les principaux résultats analytiques révèlent que les profils étudiés se caractérisent par :

- Une salinité très élevée (14,53 dS/m < CE < 59 dS/m) à l'exception de l'horizon de surface du profil 3 qui est peu salé (CE = 2,61 dS/m).
- Un gradient de salinité descendant.
- Un ESP fort (9,5 % < ESP < 39 %).
- Les chlorures (63 % < Cl⁻ < 75 %) et le sodium (47 % < Na⁺ < 62 %) sont les ions dominants de la solution du sol.
- Le faciès chimique dominant de la solution du sol est de type chloruré-sodique.

- L'ACP a révélé que les éléments chimiques de la solution du sol qui ont le plus de poids sur la variation de CE sont Cl^- ($r = 0,96$), SO_4^{2-} ($r = 0,82$), Na^+ ($r = 0,92$) et Mg^{2+} ($r = 0,79$). Ils contribuent à hauteur de 48 % dans la variation de CE, alors que HCO_3^- , Ca^{2+} et K^+ n'en contribuent qu'à hauteur de 19 %.
- L'ACP a révélé également que la relation est significative entre CE et les éléments chimiques de la solution du sol (Na^+ , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^-).

Nous concluons que cette première campagne se caractérise par une forte accumulation des sels dans la partie médiane des profils. Ce phénomène serait dû à une lixiviation partielle des sels par les pluies. Elle est marquée également par une forte sodicité et une importante concentration en électrolytes (Na^+ , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^-) dans la solution du sol. Ceci se traduit par un SAR assez élevé et un faciès chimique dominant de type chloruré-sodique. Il est important de mentionner que la région de Rélizane présente un déficit hydrique important car pour la saison humide de 2012, la pluviométrie (238,9 mm)* est restée inférieure à l'évaporation (297 mm)*. Toutefois, même si le bilan hydrique est déficitaire, les pluies orageuses peuvent être importantes pendant certaines périodes de l'année et par conséquent le bilan périodique sera positif favorisant ainsi une lixiviation des sels solubles (Djamai, 2007). Par ailleurs, il faut signaler que les prélèvements des échantillons ont été réalisés après un événement pluvieux.

1.2. La deuxième campagne de mesure

La deuxième campagne correspond à la période sèche. Les prélèvements ont été effectués en août 2012.

1.2.1. Le complexe adsorbant

Les résultats des analyses du complexe adsorbant sont présentés dans le tableau XVIII.

Le tableau XVIII montre que le complexe adsorbant est saturé en bases échangeables. Ceci s'explique par la richesse du sol en carbonates de calcium ($\text{CaCO}_3 > 14\%$) et par la salinité très élevée ($\text{CE} > 9 \text{ dS/m}$).

*Données climatiques de l'année en cours (station de Hmadna)

Tableau XVIII : Garniture cationique du complexe adsorbant (2^{er} campagne)

	Horizons	Na ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	∑ Bases	CEC	Taux de saturation
		%				cmol (+)/kg	cmol (+)/kg	%
Profil 1	Anz	28	50,1	22,6	5	22,02	20,83	105,7
	BCnz	39,77	44,06	14,32	3,16	22,42	22,13	101,31
	Cnz	40,37	42,95	15,63	2,58	19,29	19	101,53
	Cgnz1	41,11	45,28	14,72	2,72	18,69	18	103,83
	Cgnz2	39,43	47,14	14,86	2,36	14,53	14	101,43
Profil 2	Anz	21,91	57,14	15,68	5,13	17,72	17,74	99,86
	ABnz	28,67	45,65	20,84	5,13	19,54	19,48	100,29
	Cgnz1	30,44	38,06	30,39	3,39	18,41	18	102,28
	Cnz2	38,33	38,89	21,28	3,89	18,43	18	102,39
	Cgnz3	33,82	41,18	23,24	3,53	17,3	17	101,77
Profil 3	Anz	31,67	36,94	28,22	1,94	17,78	18	98,77
	Bgnz1	31,89	34,74	25,58	4,89	18,45	19	97,1
	Bgnz2	30	42,25	23,75	2,75	19,75	20	98,75
	Bgnz3	32	38,75	22,50	7,05	20,06	20	98,3
	Cgnz	21,75	45,46	31,92	2,29	24,34	24	101,42
Profil 4	Anz	18,32	52,58	25	2,21	18,64	19	98,11
	Bgnz1	27,90	41,33	30,67	2,38	21,48	21	102,28
	Bgnz2	38,55	39,50	19,05	3,35	20,09	20	100,45
	Cnz	30	40,05	19,77	3	20,42	22	92,82

1.2.2. La solution du sol

Les résultats des analyses de la solution du sol et leurs statistiques sont présentés dans le tableau XIX. Ils montrent que les valeurs de pH obtenues varient entre 7,44 et 8,2. Ces valeurs de pH révèlent une alcalinité de la réaction des sols. La variation du pH dans le profil est faible au regard de son coefficient de variation (C.V = 3,14 %).

Le SAR (tableau XIX) varie entre 16 et 172 d'où un risque de sodicité important pour les quatre profils. Ceci est dû à la forte salinité qui affecte les quatre profils.

Tableau XIX: Résultats analytiques et statistiques de la solution des sols (2^{ème} campagne)

	Horizons	pH	CE dS/m	Na ⁺ meq/l	K ⁺ meq/l	Ca ⁺⁺ meq/l	Mg ⁺⁺ meq/l	Σ ⁺ meq/l	Cl ⁻ meq/l	HCO ₃ ⁻ meq/l	SO ₄ ⁻ meq/l	Σ ⁻ meq/l	SAR
Profil 1	Anz	7,5	25,2	161,71	9,16	24,67	62,50	258,04	210,22	3,48	30,05	243,75	24,49
	BCnz	8,1	74,8	726,16	5,8	41,33	12,88	786,18	690,09	3,04	40,72	733,85	139,47
	Cnz	8,2	91,6	871,86	4	44,67	6,59	927,12	834,78	2,17	85,49	922,44	172,22
	Cgnz1	7,44	136,3	1298,07	4	58,00	10,47	1370,53	1190,91	2,17	205,82	1398,90	221,86
	Cgnz2	7,95	164,8	800,61	5,25	52,80	5,04	863,70	1454,55	2,17	220,47	1677,19	148,87
Profil 2	Anz	7,69	28,1	180,71	5	24,67	220	430,38	231,74	2,17	45,47	279,38	16,34
	ABnz	7,5	138,4	970,25	2,57	82,87	320,25	1375,94	1156,36	2,61	210,69	1369,66	68,34
	Cgnz1	8	164,2	1290,71	4,50	54,67	290	1639,88	1394,55	3,04	221,91	1619,50	98,32
	Cnz2	7,66	69,6	409,92	2,4	34,67	235,38	682,37	582,61	2,17	100	684,78	35,28
	Cgnz3	7,85	60	380,00	2	36,67	201,38	620,05	550,61	2,02	98	650,63	34,83
Profil 3	Anz	8,2	54,1	427,00	3,4	88,00	4,39	522,79	378,26	4,35	152,59	535,20	62,83
	Bgnz1	7,96	64,8	509,00	4	95,00	6,67	614,67	582,61	2,17	78,16	662,94	71,39
	Bgnz2	8,16	47,9	312,59	1	82,13	8,72	404,44	408,70	2,61	48,38	459,69	46,38
	Bgnz3	8,1	49,2	330,31	2,50	78,00	10,02	420,83	415,48	2,17	63,27	480,92	49,79
	Cgnz	7,89	21,2	121,97	1,50	38,13	18,47	180,07	180,65	1,74	33,50	215,89	22,93
Profil 4	Anz	7,74	9,24	113,99	0,80	10,80	9,25	134,80	82,61	2,17	55,83	140,61	36,00
	Bgnz1	7,93	152,2	1026,35	4	255,57	170,25	1456,17	1600,00	1,74	78,16	1679,90	70,34
	Bgnz2	8,15	71,2	482,07	1,30	126,67	35,25	645,29	662,17	2,17	33,5	697,84	53,58
	Cnz	8,1	61	452,07	1,10	122,00	34,00	609,17	666,00	1,1	29	696,10	51,19
	C.V (%)	3,14	63,41										

La distribution de CE dans le profil (tableau XIX, figure 45) montre une forte salinité au niveau des horizons de sub-surface des profils 3 et 4 où elle est respectivement de 64,8 dS/m et 152,2 dS/m. CE est relativement plus faible au niveau de l'horizon de profondeur du profil 3 (CE = 21,2 dS/m) et de l'horizon de surface du profil 4 (CE = 9,24dS/m). Le profil 1 (figure 45) se caractérise par un maximum de salinité dans sa partie inférieure (CE = 164,8 dS/m). Ceci serait dû à une éventuelle rupture des capillaires provoquée par le changement textural. De même, la texture de cet horizon devient limoneuse avec un taux de limon de 51,5 % ce qui atténue la remontée capillaire. Toutefois, les sels se sont accumulés au niveau de cet horizon. Le minimum de salinité est observé dans la partie supérieure du profil (CE = 25,2 dS/m).

Le profil 2 (figure 45) se caractérise par un maximum de salinité dans sa partie médiane (CE = 164,2 dS/m), le minimum étant observé au niveau de l'horizon de surface (CE = 28,1 dS/m). Cette accumulation des sels au niveau du troisième horizon serait liée au changement textural dans le

profil. Elle serait favorisée par le fait que ce profil se localise dans une dépression caractérisée par la présence d'une nappe salée (CE = 60 dS/m) qui se situe à moins de 1,5 m de profondeur.

CE est très variable dans l'espace (C.V= 63 %). Le profil salin du profil 1 est descendant, celui du profil 3 est ascendant, et ceux des profils 2 et 4 sont convexes comme illustré par la figure 45.

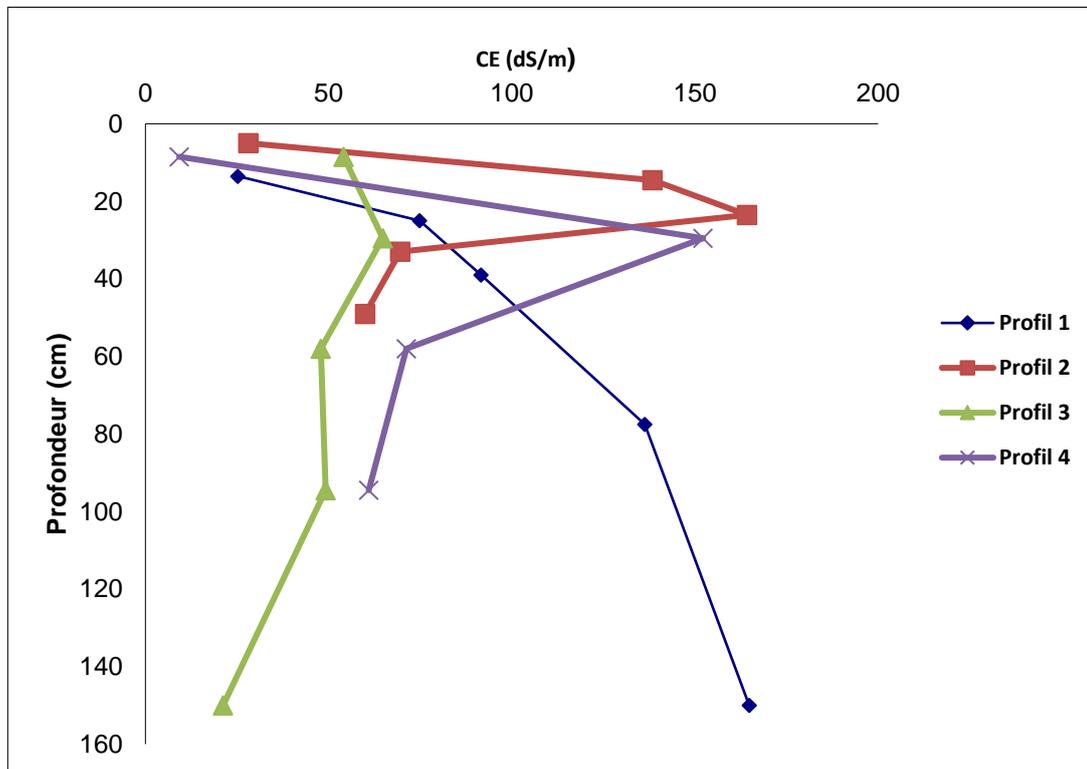


Figure 45. Profils salins des quatre profils (2^{er} campagne)

Avec des taux qui oscillent entre 51 % et 84 % et des concentrations entre 113,99 meq/l et 1290,71 meq/l (tableau XIX et figure 46), Na^+ est le cation le plus abondant dans la solution du sol de tous les profils. Mg^{++} et Ca^{++} se situent respectivement en deuxième et troisième positions pour le profil 1 (24 % et 10 %) et le profil 2 (42 % et 6 %). Cette tendance entre Mg^{++} et Ca^{++} s'inverse dans les profils 3 et 4. Avec des taux inférieurs à 3 % et des concentrations qui varient entre 1 meq/l et 9,16 meq/l, K^+ se situe en dernière position dans l'ensemble des profils.

Le classement des cations selon la prédominance est de type $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{++} > \text{Ca}^{++} > \text{K}^+$ pour les profils 1 et 2 et de type $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{++} > \text{Mg}^{++} > \text{K}^+$ pour les profils 3 et 4.

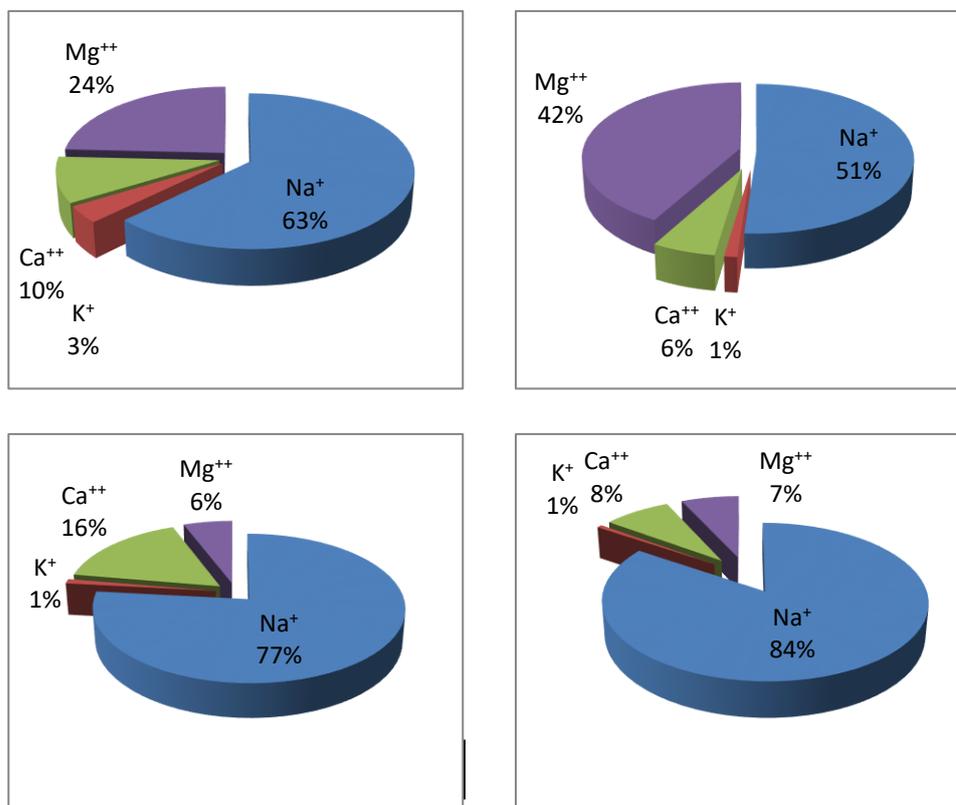


Figure 46. Répartition des cations dans la solution du sol (2^{ème} campagne)

Cl^- est l'anion dominant dans la solution du sol (tableau XIX et figure 47). Ses taux sont compris entre 59 % et 86 % de la somme totale des anions et ses teneurs varient entre 82,61 meq/l et 1454,55 meq/l. Les ions SO_4^{2-} se situent en deuxième position (12 % à 40 %) et les ions HCO_3^- en troisième position avec seulement 1 % à 2 %. De ce fait, l'ordre de classement des anions selon la prédominance devient le suivant pour tous les horizons : $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$. Ces résultats (teneurs élevées en Na^+ , Mg^{++} et Cl^-) concordent avec ceux obtenus dans la même région par Durand (1956), Boulaine (1957), Daoud (1993), Hadj Miloud (2010) et Ait Mechedal (2014).

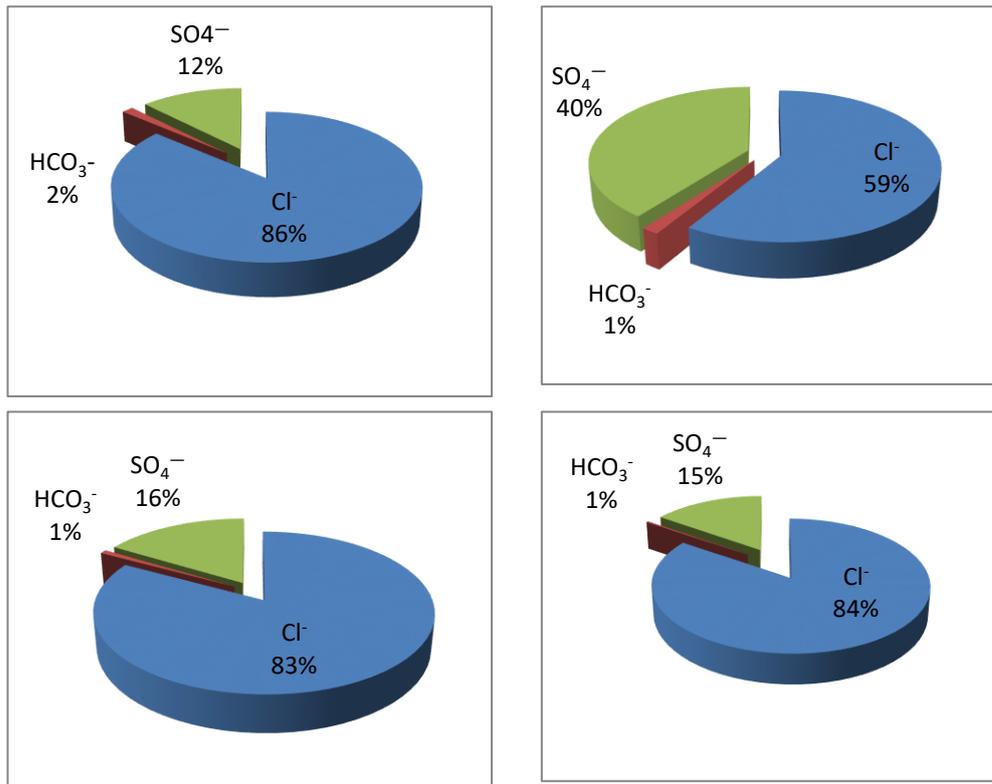


Figure 47. Répartition des anions dans la solution du sol (2^{ème} campagne)

Le diagramme de Piper (figure 48) montre que le faciès chimique est de type chloruré sodique pour 17 solutions de sols et hyper chloruré sodique pour 1 Cgnz1 et Cgnz2 du profil1. Il est à noter que ces deux derniers horizons sont marqués par une très forte salinité (CE > 136 dS/m). Ces sols évoluent donc selon la voie saline neutre à dominante chlorurée (Marlet et Job, 2006).

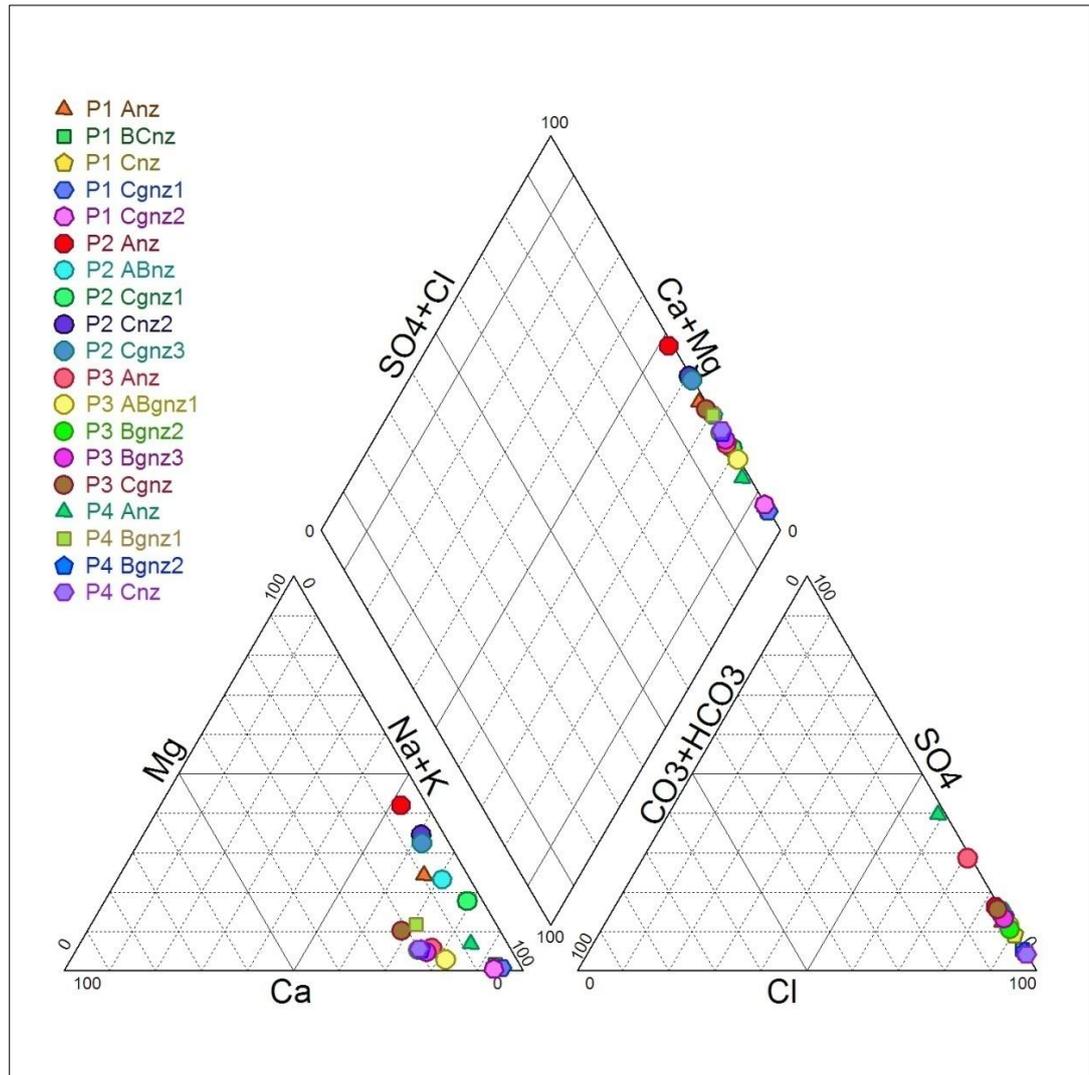


Figure 48. Faciès chimique des solutions du sol (2^{ème} campagne)

1.2.3. Analyse statistique

L'ACP (figure 49) a été réalisée sur neuf variables (pH, CE, Na^+ , Mg^{++} , Ca^{++} , K^+ , SO_4^- , HCO_3^- et Cl^-). L'axe 1 extrait 43,02 % de l'inertie du nuage de points. Sur l'axe 2, l'inertie résiduelle est de 20,96 %. L'essentiel de l'information contenue dans les résultats est représenté donc par les axes 1 et 2 de l'ACP.

Le premier axe est formé de la contribution des variables Cl^- ($r = 0,96$), SO_4^- ($r = 0,82$), CE ($r = 0,98$), Na^+ ($r = 0,97$) et Mg^{++} ($r = 0,49$) (tableau XX) alors que l'axe 2 est formé de la contribution des variables HCO_3^- ($r = -0,64$), Ca^{++} ($r = 0,7$), K^+ ($r = -0,64$) et pH ($r = -0,6$).

Ainsi, il s'avère que les éléments chimiques de la solution du sol Cl^- (23,62 %), Na^+ (22,52 %), SO_4^- (17,91 %) ont plus de poids sur la variation de CE.

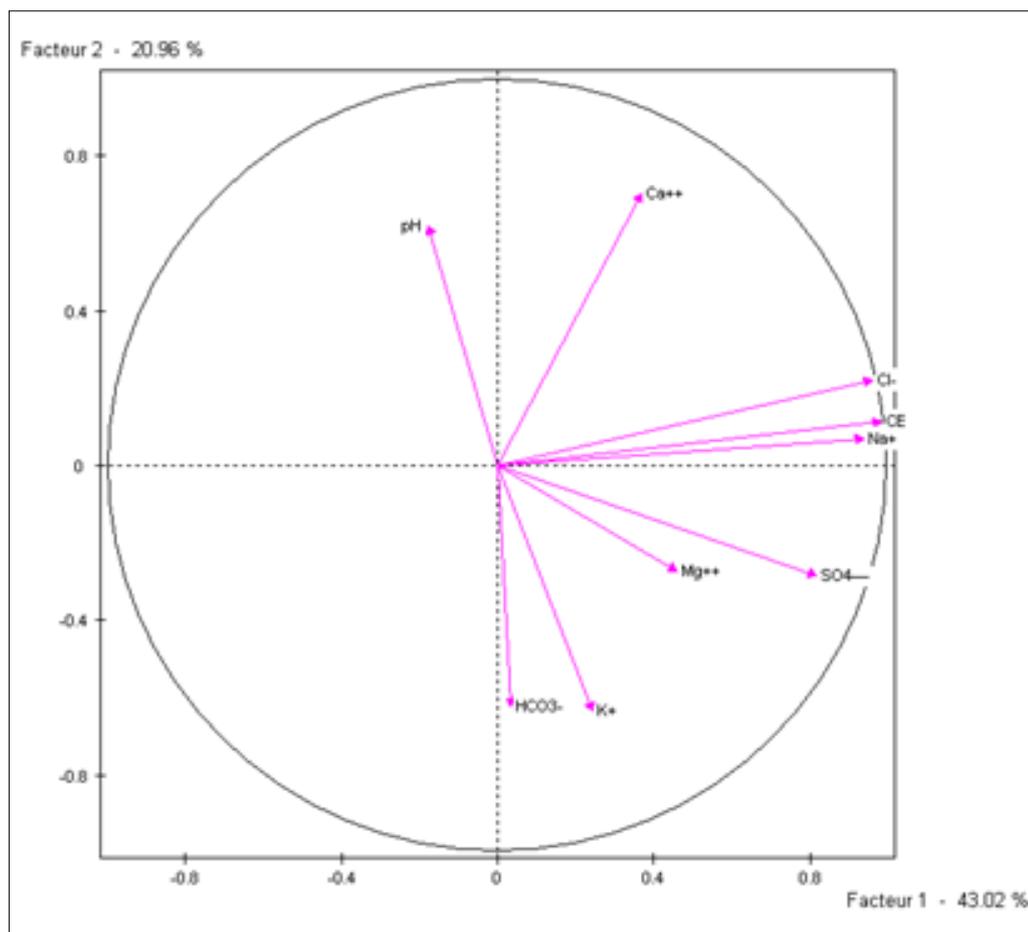


Figure 49. ACP effectuée sur neuf variables (2^{ème} campagne)

Tableau XX: Corrélations entre les différents paramètres chimiques et les facteurs (2^{er} campagne)

Paramètres	F1	F2	F3	F4	F5
pH	-0,18	0,60	0,62	-0,32	0,10
CE	0,98	0,12	0,07	-0,01	-0,09
Na ⁺	0,94	0,06	0,10	0,00	-0,14
K ⁺	0,24	-0,64	0,41	0,57	0,02
Ca ⁺⁺	0,37	0,70	0,14	0,31	0,42
Mg ⁺⁺	0,49	-0,24	-0,55	-0,13	0,57
Cl ⁻	0,96	0,22	0,06	0,10	-0,07
HCO ₃ ⁻	0,04	-0,64	0,59	-0,27	0,35
SO ₄ ⁻	0,82	-0,29	-0,02	-0,39	-0,18

La contribution de Mg^{++} est faible (6,07 %) par rapport à celles de Cl^- , Na^+ et SO_4^- . Toutefois, ces éléments ont plus de poids sur la variation de CE comparativement aux autres éléments (K^+ , Ca^{++} , pH et HCO_3^-) (tableau XXI).

Tableau XXI : Contribution des différents paramètres chimiques dans la formation des facteurs (2^{er} campagne)

Paramètres	F1 (%)	F2 (%)	F3 (%)	F4 (%)	F5 (%)
pH	0,85	19,27	31,18	13,55	1,49
CE	24,71	0,7	0,38	0	1,08
Na^+	22,52	0,21	0,86	0	2,86
K^+	1,5	21,66	13,64	41,36	0,03
Ca^{++}	3,46	25,97	1,61	12,27	25,3
Mg^{++}	6,07	3,19	24,23	2,31	46,53
Cl^-	23,62	2,61	0,27	1,22	0,62
HCO_3^-	0,03	21,94	27,78	9,53	17,36
SO_4^-	17,21	4,41	0,02	19,72	4,7

L'ACP a montré que Na^+ , Cl^- , SO_4^- et CE sont proches du cercle de corrélation (figure 49). Ceci révèle l'existence d'une forte corrélation entre ces éléments.

D'après le tableau XXII, les corrélations sont statistiquement significatives et positives ($p < 0,05$) entre les couples CE- Na^+ ($r = 0,93$), CE- Cl^- ($r = 0,99$) et CE- SO_4^- ($r = 0,78$). Ces résultats indiquent une forte relation entre CE, Na^+ , Cl^- et SO_4^- . Mg^{++} n'a pas de relation statistique significative avec CE ($r = 0,35$). Ces corrélations sont mises en évidence par le cercle des corrélations de l'ACP (figure 49).

Conclusion

- Les résultats obtenus pour la deuxième campagne montrent que les quatre profils se caractérisent par :
- Une salinité très élevée ($9,24 \text{ dS/m} < CE < 164,8 \text{ dS/m}$).
- Un gradient de salinité ascendant pour les profils 2, 3 et 4.
- Un gradient de salinité descendant pour le profil 1.
- Un ESP très élevé ($17 \% < ESP < 47,37 \%$).

- Cl^- (59 % < Cl^- < 86 %) et Na^+ (51 % meq/l < Na^+ < 77 meq/l) sont les ions prédominants de la solution du sol. Ceci explique les valeurs élevées du SAR d'où un important risque de sodicité.
- Le faciès chimique dominant de la solution du sol est de type chloruré-sodique.
- L'ACP a révélé que les éléments chimiques de la solution du sol Cl^- (23,62 %), Na^+ (22,52 %), SO_4^{2-} (17,91 %) et Mg^{2+} (6,07 %) sont ceux qui contribuent le plus dans la variation de CE. La relation est statistiquement significative entre les couples CE- Na^+ , CE- Cl^- et CE- SO_4^{2-} . Seul Mg^{2+} ne semble pas jouer un rôle statistiquement significatif dans la variation de CE pour cette campagne.

L'analyse des résultats a montré que la deuxième campagne se distingue de la première par une augmentation de la salinité dans la partie supérieure du sol, sauf dans le profil 1. Cette augmentation est due à la remontée capillaire lors de la saison sèche et chaude qui a engendré un bilan hydrique déficitaire. De même, la concentration ionique (Na^+ , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^-) de la solution du sol est relativement plus élevée que celle de la campagne précédente. Les valeurs du SAR restent excessivement élevées et le faciès chimique dominant est de type chloruré-sodique, et donc il reste similaire à celui de la première campagne.

1.3. La troisième campagne de mesure

La troisième campagne correspond à la période humide. Les prélèvements ont été réalisés en janvier 2013.

1.3.1. Le complexe adsorbant

Le tableau XXII révèle que le complexe adsorbant est saturé en bases échangeables. Ces bases sont dominées surtout par Ca^{2+} (42,75 % à 69,05 % de la CEC) et Na^+ (15,56 % à 35,88 % de la CEC). Ce résultat signifie que tous les horizons sont sodiques.

Les teneurs en Mg^{++} échangeable sont assez fortes (13,53 % à 27,78 %) alors que celles de K^+ échangeable sont les plus faibles (1,59 à 5,79 % de la CEC).

Tableau XXII : Garniture cationique du complexe adsorbant (3^{ème} campagne)

	Horizons	Na ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	CEC	∑ Bases	Taux de saturation
		%				cmol(+)/kg	cmol(+)/kg	%
Profil 1	Anz	17,80	59,25	15,52	5,28	20,83	20,38	97,85
	BCnz	26,21	48,58	18,98	4,62	22,13	21,77	98,39
	Cnz	31,58	53,68	15,79	2,68	19	19,71	103,73
	Cgnz1	35,00	60,28	16,11	2,83	18	20,56	114,22
	Cgnz2	32,29	54,29	14,86	2,79	14	14,59	104,23
Profil 2	Anz	19,73	69,05	13,53	4,79	17,74	19	107,10
	ABnz	20,53	55,18	18,84	6,16	19,48	19,62	100,71
	Cgnz1	27,78	45	27,78	3,89	18	18,8	104,45
	Cnz2	33,33	44,44	22,22	3,89	18	18,7	103,88
	Cgnz3	35,88	47,65	23,59	3,82	17	18,86	110,94
Profil 3	Anz	15,56	64,72	13,89	3,33	18	17,55	97,50
	Bgnz1	20,95	55,63	17,32	4,68	19	18,73	98,58
	Bgnz2	23,75	47,25	23,00	4,5	20	19,7	98,50
	Bgnz3	26,00	42,75	23,00	8	20	19,95	99,75
	Cgnz	23,92	49,79	20,83	3,75	24	23,95	98,29
Profil 4	Anz	16,84	58,21	16,32	5,79	19	18,46	97,16
	Bgnz1	31,43	49,86	14,76	4,24	21	21,06	100,29
	Bgnz2	30,60	51	15,40	1,95	20	19,79	98,95
	Cnz	34,09	43,18	18,18	3,18	22	21,7	98,63

1.3.2. La solution du sol

Les résultats analytiques et statistiques de la solution du sol sont présentés dans les tableaux XXIII

Le tableau XXIII révèle que le pH varie entre 7,03 et 7,85. Ces valeurs correspondent à une légère alcalinité de la réaction des sols. Le pH varie peu dans l'ensemble des profils (CV = 3 %). Le SAR varie entre 9,36 et 132,04 (tableau XXIII) ce qui suggère un risque d'alcalinité assez important pour l'ensemble des profils.

Tableau XXIII: Résultats analytiques et statistiques de la solution des sols (3^{ème} campagne)

	Horizons	pH	CE (dS/m)	Na ⁺ meq/l	K ⁺ meq/l	Ca ⁺⁺ meq/l	Mg ⁺⁺ meq/l	Σ ⁺ meq/l	Cl ⁻ meq/l	HCO ₃ ⁻ meq/l	SO ₄ ⁻ meq/l	Σ ⁻ meq/l	SAR
Profil 1	Anz	7,72	7,23	62,90	1,48	30,48	20,5	115,36	70	11	28,79	109,79	12,46
	BCnz	7,79	11,92	84,37	2,68	25,68	13,97	126,7	80	12	40,64	132,64	16,70
	Cnz	7,42	18,49	75,65	0,12	60,00	16,59	152,36	120	11	55	186	11,09
	Cgnz1	7,4	64,1	632,27	0,39	35,39	10,47	678,51	590	11	56,5	657,49	132,04
	Cgnz2	7,35	42,7	328,95	0,83	30,83	40,6	401,20	325	12	80	417	55,04
Profil 2	Anz	7,85	10,7	50,79	1,92	28,27	30,6	111,57	60	2	41,08	103,09	9,36
	ABnz	7,69	25,9	188,79	1,92	28,27	30	248,97	180	2,1	50,5	232,6	34,98
	Cgnz1	7,19	31,1	311,67	2,79	26,27	31,82	372,55	310	2,6	39,37	351,97	57,83
	Cnz2	7,3	37,8	325,34	0,73	30,62	31,45	388,14	320,35	1,4	32,52	354,27	58,40
	Cgnz3	7,13	56,8	480,22	2,68	35,60	40	558,51	540	5	51,36	596,36	78,11
Profil 3	Anz	7,75	7,21	59,50	0,39	34,27	3,39	97,54	60	4	35,36	99,36	13,71
	Bgnz1	7,06	22,4	150,42	0,39	34,27	19	204,07	170	3	35,10	208,09	29,15
	Bgnz2	7,14	25,8	180,13	0,39	48,27	22,8	251,59	210	2	31,67	243,67	30,22
	Bgnz3	7,13	35	301,62	0,72	28,67	28,61	359,62	320	3	20,42	343,41	56,36
	Cgnz	7,28	30,7	280,62	0,50	25,67	18,47	325,26	310	3	14,55	327,55	59,74
Profil 4	Anz	7,67	6,55	58,33	0,61	10,60	7,18	76,73	48	5	32,77	85,76	14,61
	Bgnz1	7,4	19,07	130,32	0,99	31,76	15,34	178,42	145	7	32,09	184,08	26,86
	Bgnz2	7,12	46,8	390,78	1,10	35,80	37,57	465,25	390	5	55,94	450,93	64,52
	Cnz	7,03	37,1	320,69	0,50	35,33	30	386,53	315	6,5	39,38	360,87	56,11
	C.V (%)	3,71	59,15										

CE (tableaux XXIII) varie entre 6,55 et 64,1dS/m. Sa distribution dans le profil est illustrée par la figure 50 qui révèle une forte salinité en profondeur pour tous les sols étudiés ($35 \text{ dS/m} < \text{CE} < 64,1 \text{ dS/m}$). CE est relativement faible en surface ($\text{CE} < 10,23 \text{ dS/m}$) à cause probablement de la lixiviation des sels suite aux fortes chutes de pluie. De ce fait, les sels se seraient accumulés au niveau des horizons de profondeurs provoquant ainsi une augmentation de leur salinité. Le profil salin est de type convexe pour les profils 1, 3 et 4 et de type descendant pour le profil 2 (figure 50). En fin, la salinité est hétérogène ($\text{C.V} = 59\%$) dans l'ensemble des horizons étudiés. Les profils salins de ces quatre sols sont illustrés par la figure 50.

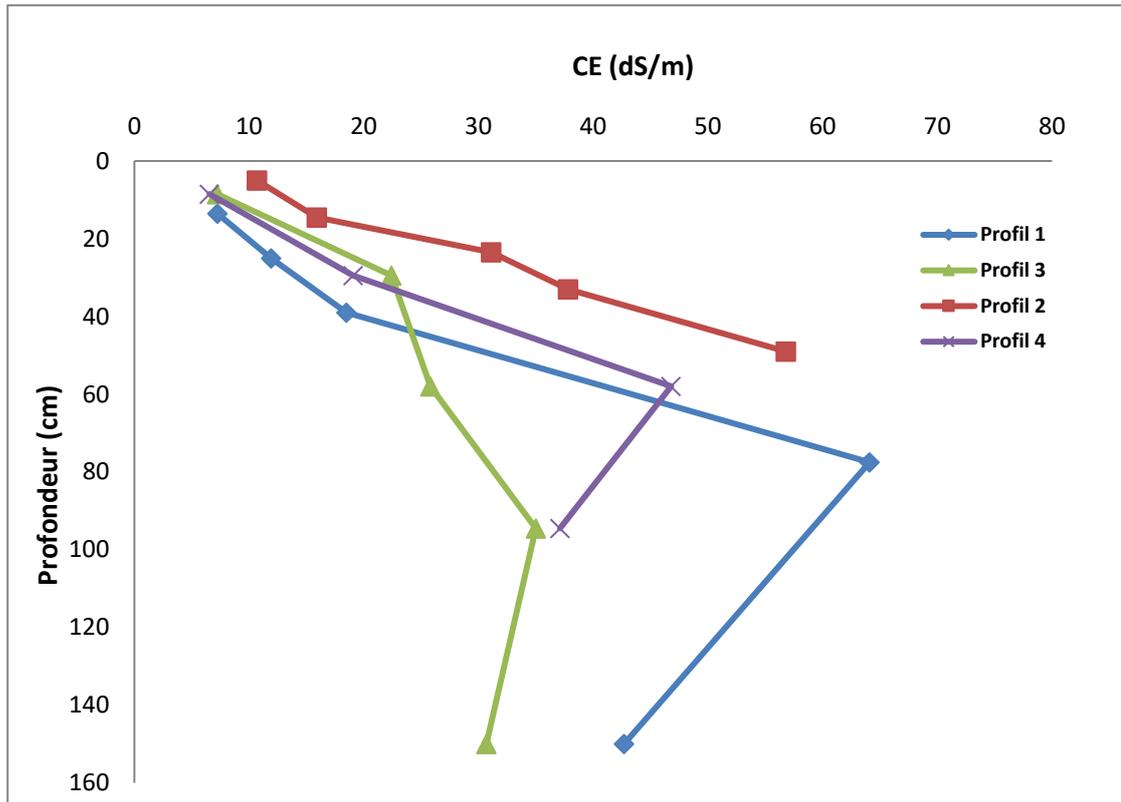


Figure 50. Profils salins des quatre profils (3^{ème} campagne)

Na^+ est le cation dominant (46 % à 76 %) dans la solution du sol pour tous les profils (figure 51). Sa concentration varie entre 58,33 et 632,27 meq/l (tableau XXIII). Il est suivi par le Ca^{++} pour les profils 1, 3 et 4 (26 % à 35 %) avec des teneurs qui oscillent entre 60 et 10,4 meq/l. Dans le profil 2, Ca^{++} occupe la troisième position (25 %) juste après Mg^{++} (27 %). Mg^{++} se situe en troisième position pour les profils 1, 3 et 4 avec des taux qui varient entre 4 et 18 % et des concentrations entre 7,18 et 37,57 meq/l.

K^+ , avec des teneurs qui se situent entre 0,12 meq/l et 2,79 meq/l, est le cation le moins bien représenté dans les solutions des sols étudiés (0,98 à 2 %).

De ce fait, le classement des cations selon la prédominance est de type :

- $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{++} > \text{Mg}^{++} > \text{K}^+$ pour les profils 1, 3 et 4 ;
- $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{++} > \text{Ca}^{++} > \text{K}^+$ pour le profil 2.

Ces résultats concordent avec ceux des différents travaux réalisés dans la même région (Daoud, 1993 ; Hadj Miloud 2010, Ait Mechedal, 2014).

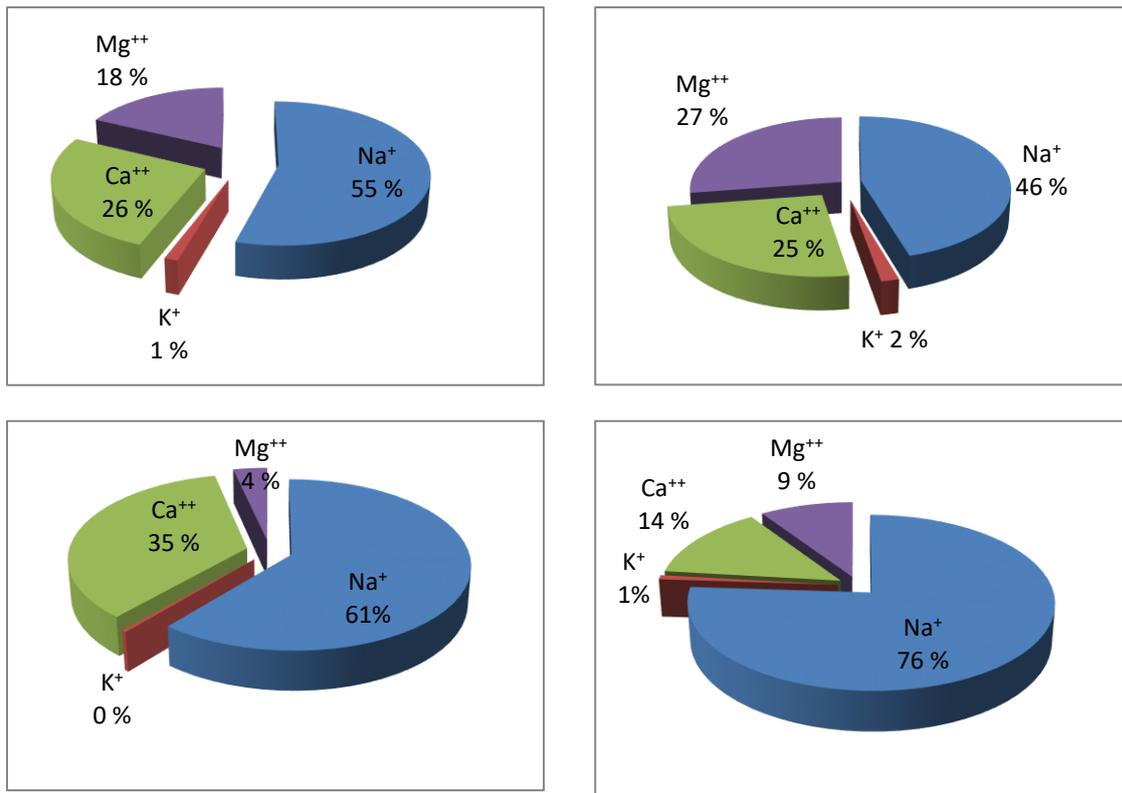


Figure 51. Répartition des cations dans la solution du sol (3^{ème} campagne)

Cl^- est l'anion dominant dans la solution du sol pour tous les profils (tableau XXIII et figure 52). Il représente en moyenne 60 % de la somme totale des anions avec des valeurs qui varient entre 48 meq/l et 590 meq/l. SO_4^{2-} se classe en deuxième position pour tous les profils avec des taux qui varient entre 26 % et 40 % et des teneurs qui oscillent entre 14,55 meq/l et 80 meq/l.

Avec des taux variant entre 2 et 10 % et des concentrations oscillant entre 1,4 meq/l et 12 meq/l, HCO_3^- se situe en dernière position.

De ce fait, l'ordre de classement des anions selon la prédominance pour tous les profils est de type $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$.

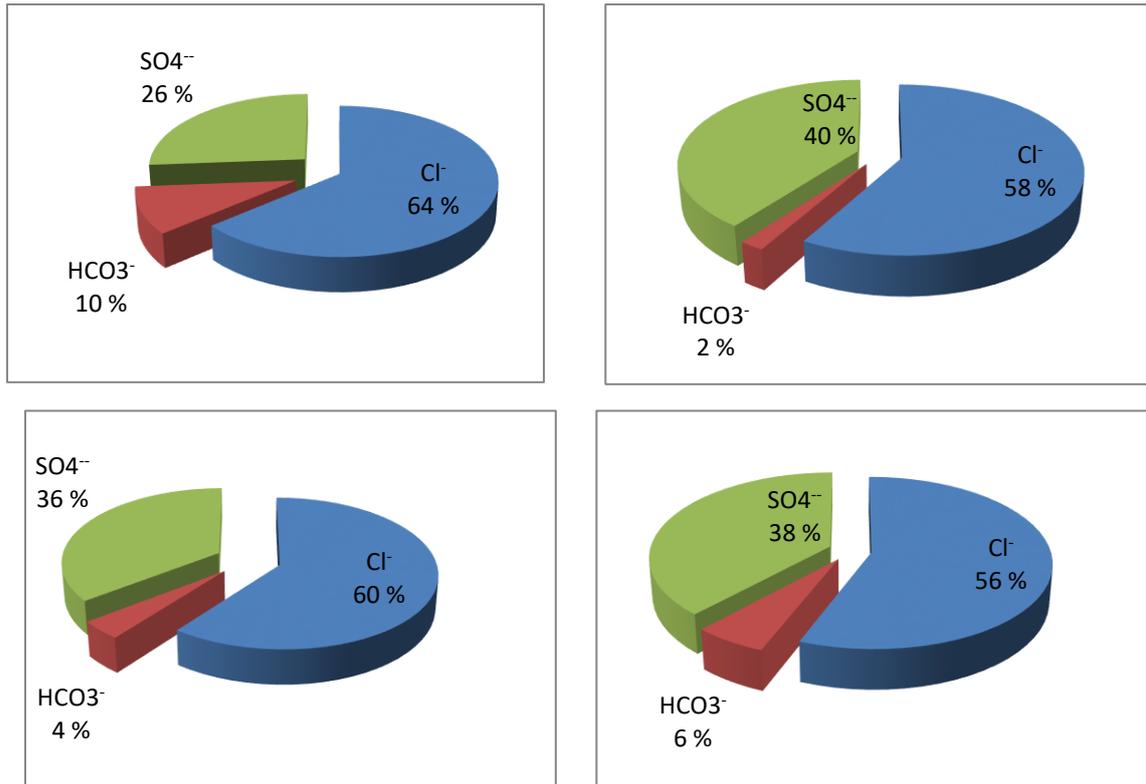


Figure 52. Répartition des anions dans la solution du sol (3^{ème} campagne)

Le diagramme de Piper (figure 53) fait ressortir que la majorité des faciès chimiques des solutions des sols étudiés est de type chloruré sodique. Cependant, les exceptions sont détectées tels que les types chloruré magnésien (horizon Cnz du profil 2), chloruré sans dominance de l'un des cations (horizon Cnz du profil1) et le faciès hyper chloruré sodique (horizon Cgnz du profil1). Les faciès de types chloruré sodique et hyper chloruré sodique correspondent aux horizons qui ont les plus fortes CE.

Les sols étudiés évoluent donc selon la voie saline neutre à dominante chlorurée (Marlet et Job, 2006 ; Vallès et al., 1997).

Sur le plan agronomique, ce faciès chloruré sodique est néfaste pour le développement des plantes. En outre, 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).

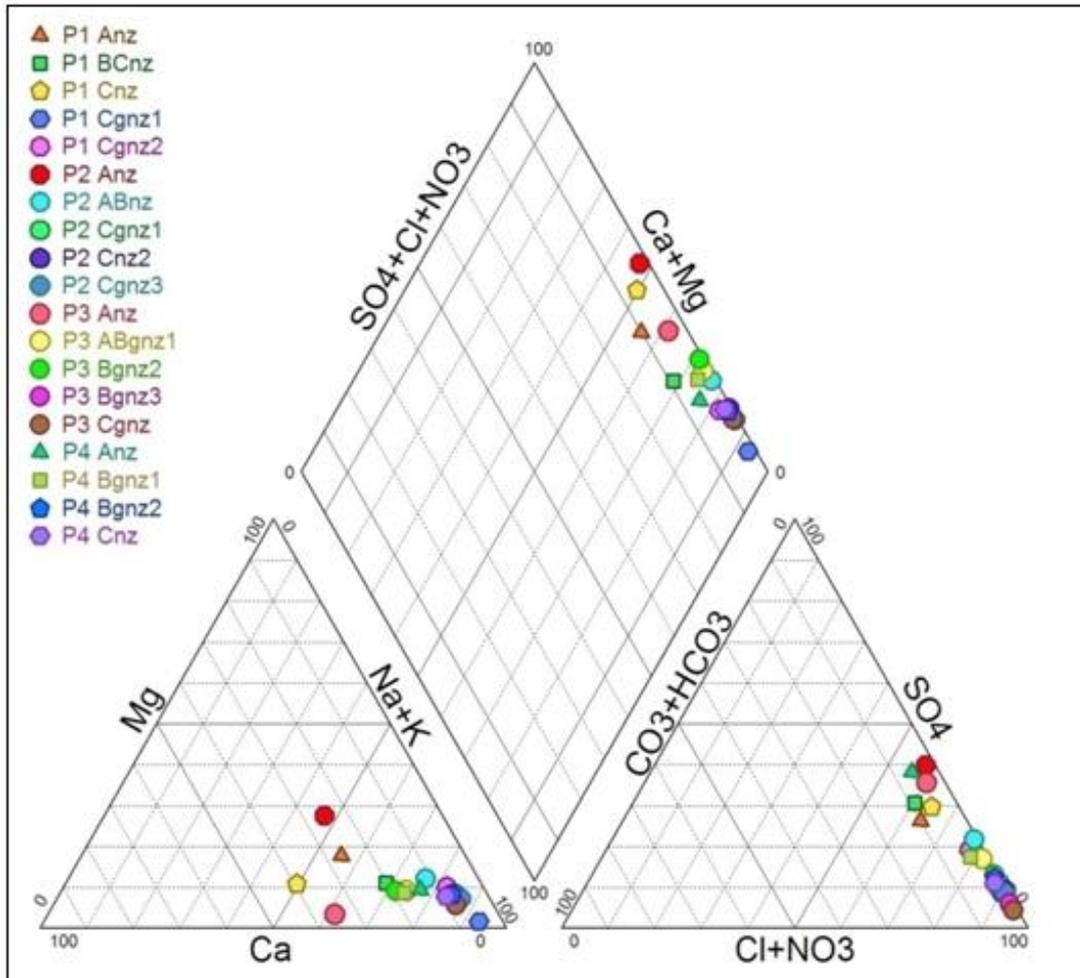


Figure 53. Faciès chimiques des solutions du sol (3^{ème} campagne)

1.3.3. Analyse statistique

D'après la figure 54, l'axe 1 de l'ACP extrait 44,12 % de l'inertie du nuage de points. Sur l'axe 2, l'inertie résiduelle qu'il extrait est de 18,06 %. L'essentiel de l'information contenue dans les résultats est donc représenté par les axes 1 et 2.

Le premier axe est formé de la contribution des variables Cl^- ($r = 0,96$), SO_4^- ($r = 0,46$), CE ($r = 0,98$), Na^+ ($r = 0,94$) et Mg^{++} ($r = 0,64$) alors que l'axe 2 est formé par la contribution des variables HCO_3^- ($r = -0,87$), Ca^{++} ($r = 0,47$), K^+ ($r = -0,16$), SO_4^- ($r = 0,69$) et pH ($r = -0,31$) (tableau XXIV).

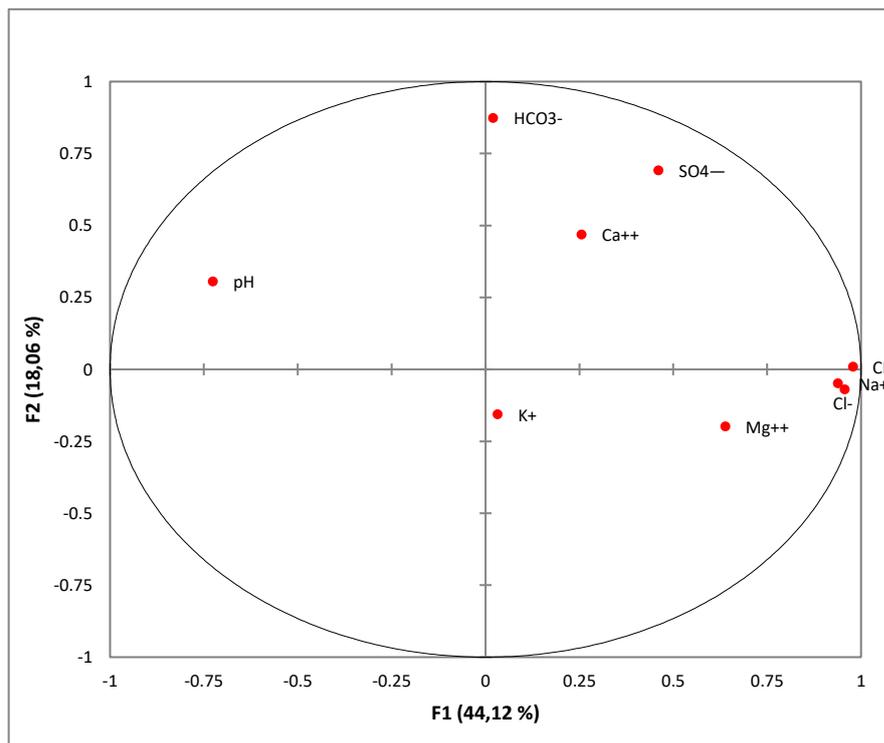


Figure 54. ACP effectuée sur neuf variables (3^{ème} campagne)

Tableau XXIV : Corrélations entre les différents paramètres chimiques et les facteurs (3^{ème} campagne)

Paramètres	F1	F2	F3	F4	F5
pH	-0,73	0,31	0,43	-0,19	-0,09
CE	0,98	0,01	-0,01	-0,17	0
Na+	0,94	-0,05	0,02	-0,32	0,03
K+	0,03	-0,16	0,88	0,15	0,39
Ca++	0,26	0,47	-0,53	0,55	0,28
Mg++	0,64	-0,20	0,41	0,53	-0,16
Cl-	0,96	-0,07	-0,01	-0,24	0,09
HCO3-	0,02	0,87	0,12	-0,26	0,2
SO4—	0,46	0,69	0,34	0,18	-0,35

Néanmoins, le tableau XXV révèle que chaque élément chimique de la solution du sol contribue avec des taux différents par rapport aux autres éléments. Cette contribution est de 23,09 % pour Cl⁻, 22,2 % pour Na⁺, 10,8 % pour Mg⁺⁺ et 5,35 % pour SO₄⁻. Par ailleurs, Cl⁻, Mg⁺⁺ et Na⁺ ont plus de poids sur la variation de la CE comparativement aux autres éléments de la solution du sol.

Tableau XXV : Contribution des différents paramètres chimiques dans la formation des facteurs (3^{ème} campagne)

Paramètres	F1 (%)	F2 (%)	F3 (%)	F4 (%)	F5 (%)
pH	13,26	5,73	11,82	3,80	1,80
CE	24,14	0,01	0	3,12	0
Na ⁺	22,2	0,15	0,02	10,78	0,26
K ⁺	0,03	1,5	50,76	2,35	35,29
Ca ⁺⁺	1,65	13,53	18,18	33,09	18,09
Mg ⁺⁺	10,28	2,41	10,95	29,79	6,08
Cl ⁻	23,09	0,30	0,01	6,3	1,76
HCO ₃ ⁻	0,01	46,93	0,93	7,4	8,98
SO ₄ ⁻	5,35	29,45	7,33	3,38	27,74

Cependant, d'après le cercle des corrélations, l'axe F1 est lié aux éléments Na⁺, Cl⁻, Mg⁺⁺ et pH qui ont le plus de poids sur la variation de la CE. L'axe F2 est essentiellement lié aux éléments qui ont le moins de poids sur la variation de la CE.

Le tableau XXVI montre que les corrélations sont statistiquement significatives et positives ($p < 0,05$) entre les couples CE-Na⁺ ($r = 0,98$), CE-Cl⁻ ($r = 0,99$), et CE-Mg⁺⁺ ($r = 0,52$). Ces résultats démontrent l'existence de fortes relations entre la salinité, Na⁺, Cl⁻ et Mg⁺⁺. SO₄⁻ ne présente pas de relation statistique significative avec CE.

Tableau XXVI : Matrice de corrélation entre les différents paramètres chimiques (3^{ème} campagne)

Paramètres	pH	CE	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻
pH	1								
CE	-0,64*	1							
Na ⁺	-0,60	0,98*	1						
K ⁺	0,24	0	0,02	1					
Ca ⁺⁺	-0,32	0,19	0,08	-0,33	1				
Mg ⁺⁺	-0,45*	0,52*	0,44	0,39	0,08	1			
Cl ⁻	-0,65*	0,99*	0,99*	0,03	0,14	0,47*	1		
HCO ₃ ⁻	0,24	0,05	0,03	-0,02	0,19	-0,2	0	1	
SO ₄ ⁻	0,01	0,43	0,34	0,12	0,28	0,39	0,32	0,49*	1

*corrélations significatives au seuil $p = 0,05$ (ddl=17)

Conclusion

Les principaux résultats de la troisième campagne de mesures montrent que les quatre profils se caractérisent par :

- Une CE très élevée ($6,55 \text{ dS/m} < CE < 64,1 \text{ dS/m}$) qui varie du niveau salé ($CE > 4 \text{ dS/m}$) jusqu'au niveau extrêmement salé ($CE > 16 \text{ dS/m}$). Ce dernier est prédominant pour les quatre profils.
- Un gradient de salinité descendant, seule la localisation du niveau de salinité maximum diffère entre les horizons.
- Un fort pourcentage de sodium échangeable ($15,56 \% < ESP < 35,88 \%$) d'où les profils étudiés sont tous salés et sodiques.
- Cl^- ($56 \% < \text{Cl}^- < 64 \%$) et Na^+ ($46 \% < \text{Na}^+ < 76 \%$) sont les ions les plus dominants dans la solution du sol.
- Un faciès de type chloruré sodique représente la majorité des horizons.
- L'ACP a montré que CE est particulièrement influencée par Cl^- (23,09 %), Na^+ (22,2 %), pH (13,26 %) et Mg^{++} (10,8 %).
- L'ACP a révélé également que K^+ , Ca^{++} , SO_4^- et HCO_3^- ont moins de poids sur la variation de CE comparativement aux autres éléments.

La troisième campagne se caractérise donc par une forte accumulation des sels dans la partie médiane du profil. Ceci serait dû à la lixiviation partielle des sels par les pluies malgré que le bilan hydrique est déficitaire pour cette saison ($P (154,1\text{mm}) < ETP (297\text{mm})$)*. Nous l'expliquons par le fait que l'échantillonnage a été effectué après un épisode pluvieux. Cette campagne se démarque de la campagne précédente par des niveaux de salinité, sodicité (ESP) et une concentration ionique (Na^+ , Mg^{++} , SO_4^- , Cl^-) de la solution du sol relativement plus bas. Cependant, la dominance ionique dans la solution du sol ne change pas. Ceci se traduit par un SAR assez élevé et un faciès chimique dominant de type chloruré-sodique. Nous concluons que le type de salinisation se fait similairement par rapport aux campagnes précédentes. Il s'agit d'une salinisation par la voie saline neutre à dominance chlorurée.

*Données climatiques de l'année en cours (station de Hmadna)

1.4. La quatrième campagne de mesure

Cette campagne coïncide avec la période sèche. Les prélèvements ont été effectués en août 2013.

1.4.1. Le complexe adsorbant

Les résultats des analyses du complexe adsorbant sont présentés dans le tableau XXVII.

Tableau XXVII : Garniture cationique du complexe adsorbant (4^{ème} campagne)

	Horizons	Na ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	CEC	∑ Bases	Taux de saturation
		%				Cmol(+)/ kg	Cmol(+)/ kg	%
Profil 1	Anz	23,8	54,25	16,52	5,28	20,83	20,83	99,85
	BCnz	26,21	48,58	18,98	3,62	22,13	21,55	97,39
	Cnz	31,58	53,68	15,79	2,68	19	19,71	103,73
	Cgnz1	35	60,28	16,11	2,83	18	20,56	114,22
	Cgnz2	32,29	54,29	14,86	2,79	14	14,59	104,23
Profil 2	Anz	15,09	69,05	13,53	4,79	17,74	18,18	102,46
	ABnz	20,53	55,18	18,84	6,16	19,48	19,62	100,71
	Cgnz1	27,78	45,00	27,78	3,89	18	18,8	104,45
	Cnz2	33,33	44,44	22,22	3,89	18	18,7	103,88
	Cgnz3	32,35	41,18	23,53	4,53	17	17,27	101,59
Profil 3	Anz	15,56	64,72	13,89	3,33	18	17,55	97,50
	Bgnz1	23,95	55,63	16,32	4,68	19	19,11	100,58
	Bgnz2	23,75	47,25	23,00	4,5	20	19,7	98,50
	Bgnz3	26	42,75	23,00	8	20	19,75	99,75
	Cgnz	25,92	46,79	21,83	3,75	24	23,59	98,29
Profil 4	Anz	15,84	61,32	18,42	5,26	19	19,16	100,84
	Bgnz1	25,24	52,38	17,14	7,62	21	21,5	102,38
	Bgnz2	33	50,05	17,00	4,25	20	20,86	104,30
	Cnz	30,64	47,73	18,18	3,5	22	22,01	100,05

Le tableau XXVII révèle que Ca^{++} est le cation dominant pour tous les horizons (41,18 % < Ca^{++} < 69,05 %). Il est suivi par Na^+ (15,09 % < Na^+ < 35 %) et Mg^{++} (13,53 % < Mg^{++} < 27,78 %) dont les taux sont assez appréciables. Les taux de K^+ sont les plus faibles (2,68 % < K^+ < 8 %). Cette configuration cationique indique que tous les horizons sont sodiques. Le complexe adsorbant est partout saturé en bases échangeables vue le contexte pédologique de ces sols.

Le classement des bases échangeables par ordre des grandeurs est de type $\text{Ca}^{++} \% > \text{Na}^+ \% > \text{Mg}^{++} \% > \text{K}^+ \%$.

1.4.2. La solution du sol

Les résultats analytiques et statistiques de la solution du sol sont présentés dans le tableau XXVIII

Tableau XXVIII: Résultats analytiques et statistique de la solution des sols (4^{ème} campagne)

	Horizons	pH	CE dS/m	Na^+ meq/l	K^+ meq/l	Ca^{++} meq/l	Mg^{++} meq/l	Σ^+ meq/l	Cl^- meq/l	HCO_3^- meq/l	SO_4^{--} meq/l	Σ^- meq/l	SAR
Profil 1	Anz	7,68	36	240,02	0,14	70,53	50	360,69	302	15	78,16	395,16	30,91
	BCnz	8,27	48	461,18	0,84	29,14	11	502,16	450	1	79,32	530,32	102,93
	Cnz	8,14	61,7	546,21	2,09	33,43	7,5	589,23	506	2	100,96	608,96	120,74
	Cgnz1	7,39	122,5	1082,64	0,6	49,86	15	1148,10	1111	1	100,88	1212,88	190,11
	Cgnz2	7,83	60,6	520,90	1,48	38,43	30,5	591,31	536	1	87,96	624,96	88,73
Profil 2	Anz	7,61	93,3	909,63	0,34	81,79	60,3	1052,06	1015	1	98	1114,00	107,92
	ABnz	7,59	109,6	1067,70	0,98	67,50	50	1186,18	1120	15	105,8	1240,80	139,29
	Cgnz1	7,89	77	551,83	1,09	190,71	200	943,63	865	15	94	974,00	39,48
	Cnz2	7,5	92,1	870,47	1,21	56,79	230	1158,47	1015	15	80,6	1110,60	72,69
	Cgnz3	7,91	88,6	851,50	1,18	51,43	60	964,11	940	15	80	1035,00	114,07
Profil 3	Anz	8,09	4,73	30,93	2,06	7,29	4,50	44,78	35	1	9,84	45,84	12,74
	Bgnz1	7,93	36,5	260,13	0,98	69,29	20	350,40	301	2	67	370,00	38,93
	Bgnz2	8,2	42,5	410,41	1,09	81,79	8,5	501,79	415	25	75,6	515,60	61,08
	Bgnz3	8,08	50,7	510,47	0,74	88,43	12,5	612,14	495	1	85,6	581,60	71,85
	Cgnz	8,11	47,9	430,63	3,68	90,71	20	545,02	440	2	72,4	514,40	57,87
Profil 4	Anz	7,54	13,97	80,04	0,84	32,71	15	128,59	100	15	25,8	140,80	16,38
	Bgnz1	7,83	50	520,80	1,18	56,79	22	600,77	490	15	80	585,00	82,97
	Bgnz2	8,1	93,6	960,42	4,09	58,57	20	1043,08	1016	14	95	1125,00	153,23
	Cnz	8,08	84,3	688,75	1,33	105	60	855,08	830	15	78	923,00	75,82
	C.V (%)	3	49										

Le pH varie entre 7,39 et 8,27 avec une moyenne de 7,88 (tableau XXVIII) et varie donc très peu dans l'espace (C.V % < 3). La réaction du sol est partout alcaline. Le SAR varie entre 12,74 et 190,11 ce qui suggère que le risque de sodicité est très élevé. La plus faible valeur du SAR est

enregistrée pour l'horizon Anz du profil 3. Elle correspond à l'horizon le moins salé (CE = 4,73 dS/m).

CE varient entre 4,73 dS/m et 122,5 dS/m (tableau XXVIII). Cependant, hormis deux horizons dont la salinité est de 4,73 dS/m (Anz du profil 3) et 13,97 dS/m (Anz du profil 4), tous les autres horizons se caractérisent par une très forte salinité supérieure à 36 dS/m. Les données du tableau XXVIII illustrées par la figure 55 révèlent que les plus fortes salinités des profils 1, 3 et 4 sont enregistrées au niveau de leurs horizons médians ($92,1 \text{ dS/m} < \text{CE} < 122,5 \text{ dS/m}$) et les plus faibles dans leurs horizons de surface ($4,73 \text{ dS/m} < \text{CE} < 36,5 \text{ dS/m}$). Ainsi, le profil salin de ces trois sols est de type convexe. Dans le profil 2, le maximum de salinité est enregistré en sub-surface (109,6 dS/m). Celle-ci diminue relativement dans les horizons de profondeur Cnz1, Cnz2 et Cgnz3 pour atteindre respectivement les valeurs de 77, 92,1 et 88,6 dS/m. Ainsi, le profil salin du sol 2 est de type concave. Cette dynamique des sels caractérise les sols influencés par une nappe salée peu profonde qui est localisée dans les zones basses. Le profil 2 se situe dans une dépression caractérisée par la présence d'une nappe salée (CE = 60 dS/m) peu profonde (1,6 m de profondeur). De même, la texture de l'horizon de sub-surface renferme 42 % d'argile et sa CE est de 109,6 dS/m. Quand le terrain est très légèrement ondulé et la texture est fine, les sels s'accumuleront dans les point hauts (Franzen, 2005). De plus, la remonté capillaire accentue le phénomène de salinisation pendant la période sèche.

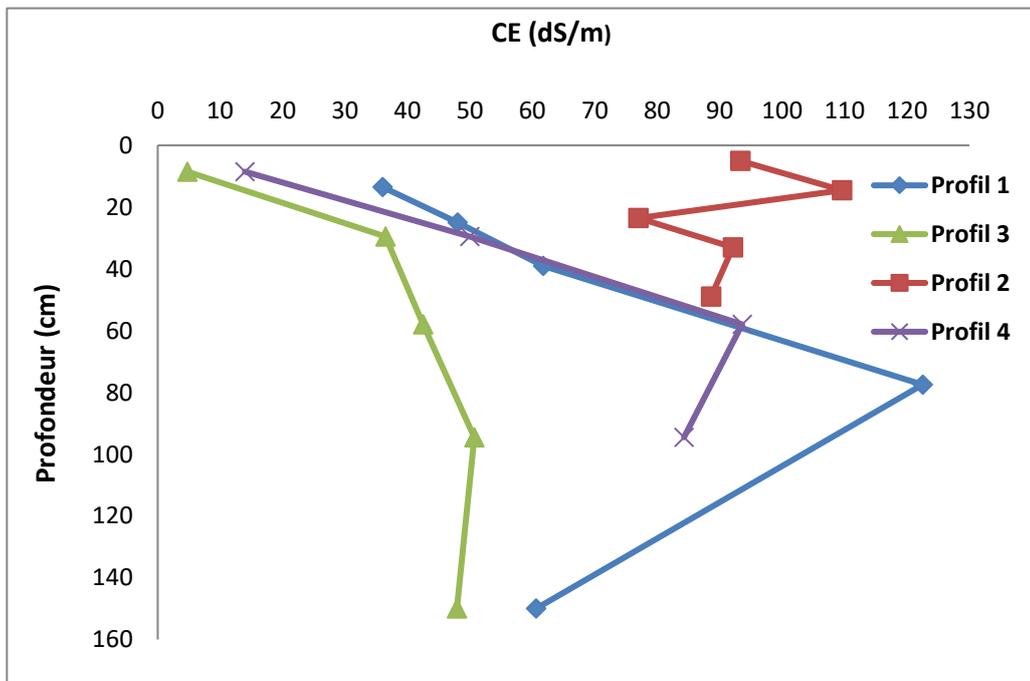


Figure 55. Profils salins des quatre profils (4^{ème} campagne)

Na^+ occupe plus de la moitié (63 % à 82 %) des cations de la solution du sol pour les quatre profils étudiés (figure 56). Il est suivi par Ca^{++} (7 % à 25 %), Mg^{++} (6 % à 14 %) et K^+ (< 5 %). Les valeurs élevées du SAR s'expliquent par les fortes teneurs en Na^+ par rapport aux restes des cations de la solution du sol.

Le classement des cations selon la prédominance est toujours de type $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{++} > \text{Mg}^{++} > \text{K}^+$.

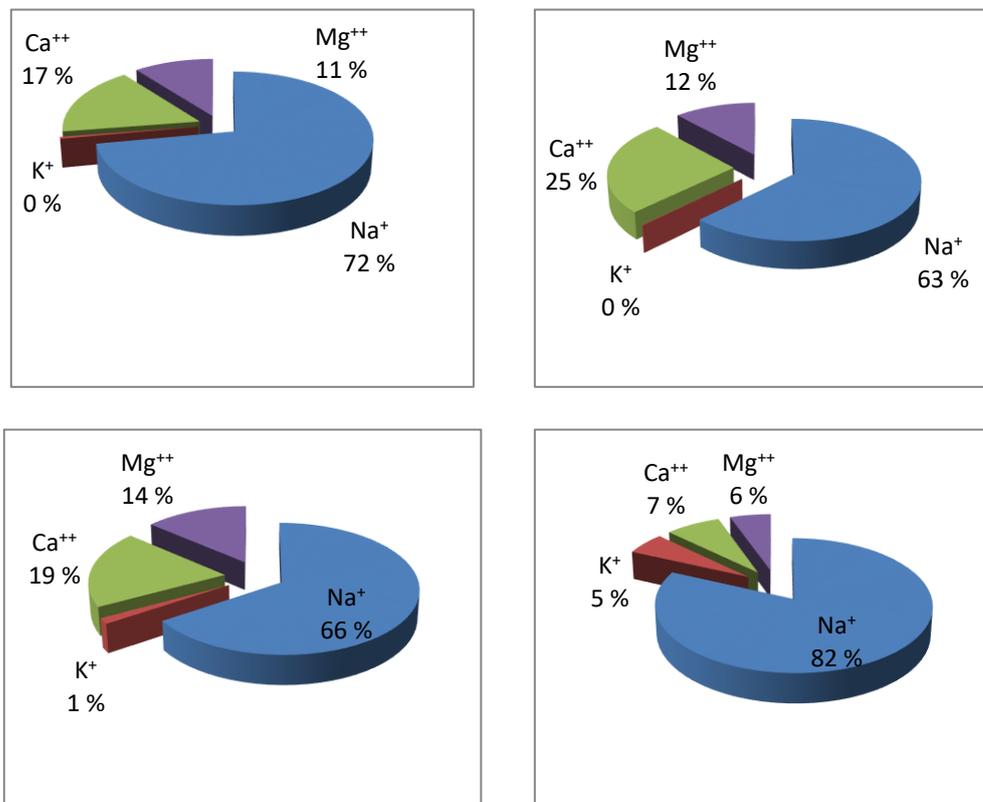


Figure 56. Répartition des cations dans la solution du sol du profil 3 (4^{ème} campagne)

Cl^- est partout dominant dans la solution du sol (XXVIII et figure 57). Avec des concentrations qui varient entre 35 et 1120 meq/l, il représente en moyenne un taux supérieur à 71 % de la somme totale des anions pour tous les profils étudiés. SO_4^- vient en deuxième position (9 % < SO_4^- < 22 %) avec des teneurs qui varient entre 9,84 meq/l et 100,96 meq/l. HCO_3^- , avec des teneurs qui oscillent entre 1 et 25 meq/l, se situe en dernière position (< 11 %). De ce fait, l'ordre de classement des anions selon la prédominance est de type $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^- > \text{HCO}_3^-$.

Ces résultats concordent avec ceux de Daoud (1993), Hadj Miloud (2010) et Ait Mechedal (2014) pour les sols de la région de Rélizane.

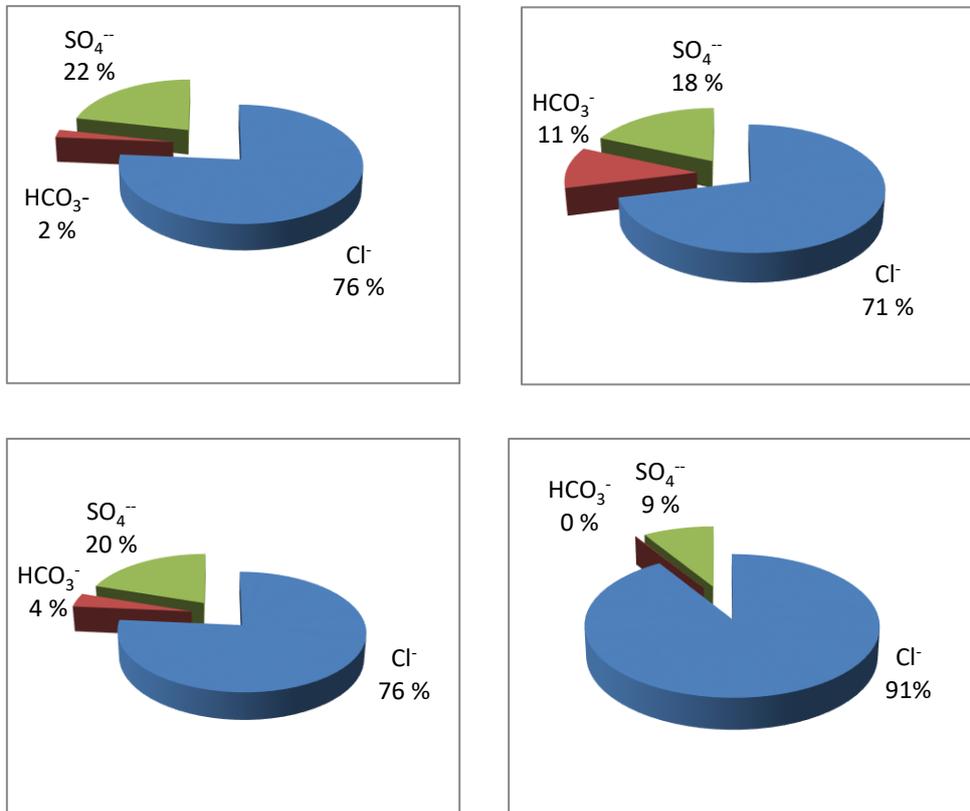


Figure 57. Répartition des anions dans la solution du sol (4^{ème} campagne)

Le diagramme de Piper (figure 58) a permis de révéler deux types de faciès chimiques, le faciès chloruré sodique pour la majorité des solutions du sol et le faciès hyper chloruré sodique pour les horizons Anz et Cnz du profil 1 et Cgnz3 et ABnz du profil 2. Ces derniers sont caractérisés par une très forte salinité ($61,7 \text{ dS/m} < \text{CE} < 122,5 \text{ dS/m}$). Ces deux faciès chimiques correspondent à la voie saline neutre très fréquente en Algérie (Daoud, 1993 ; Hamdi-Aissa et al., 2004 ; Djamaï, 2007) et en Afrique du Nord (Cheverry, 1974).

Selon Droubi et al. (1980), le faciès chimique chloruré sodique ne favorise pas les phénomènes de précipitation des sels jusqu'à des niveaux de salinité très élevés.

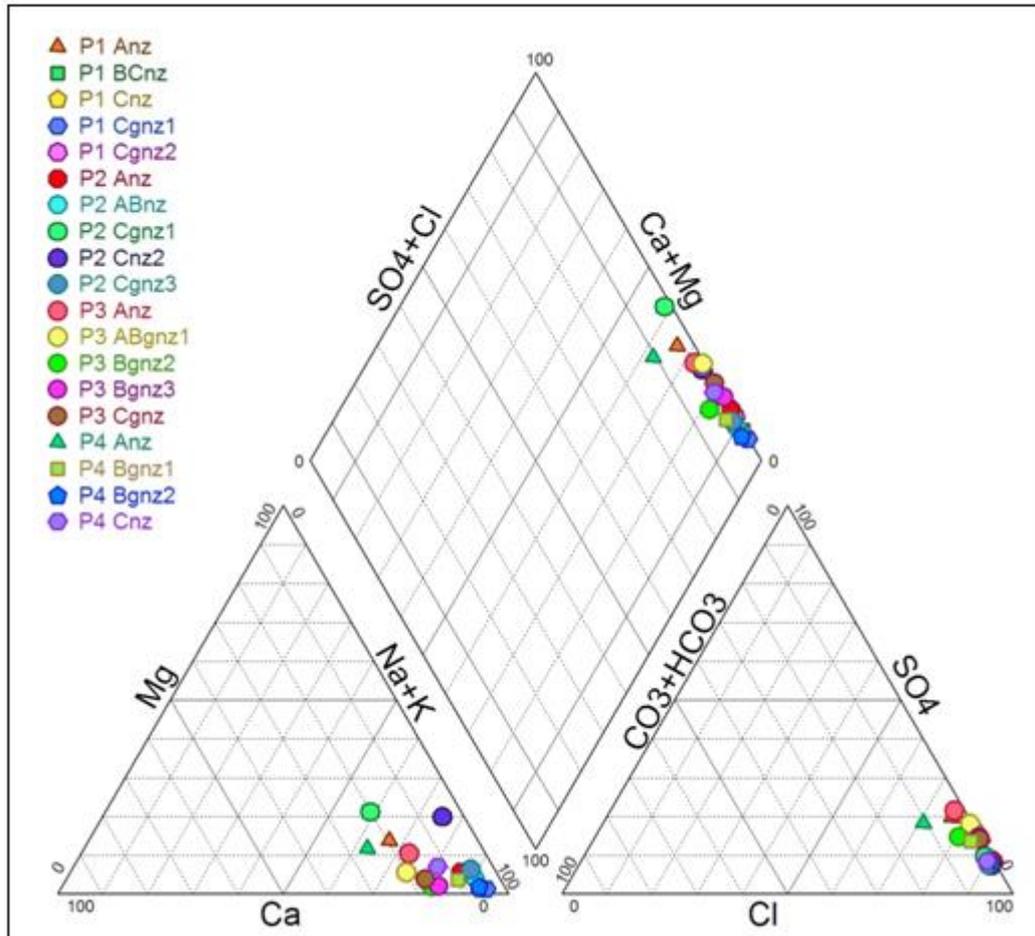


Figure 58. Faciès chimiques des solutions du sol (4^{ème} campagne)

1.4.3. Analyse statistique

L'ACP (figure 59) a été effectuée sur les mêmes variables que celles des campagnes précédentes. L'axe 1 extrait 45,9 % de l'inertie du nuage de points. L'inertie résiduelle que l'axe 2 extrait est de 18,98 %. L'essentiel de l'information est de ce fait indiqué dans les axes 1 et 2 de l'ACP.

L'axe 1 est formé de la contribution des variables Cl^- ($r = 0,98$), SO_4^{2-} ($r = 0,82$), CE ($r = 0,97$), Na^+ ($r = 0,94$), Mg^{++} ($r = 0,52$) et le Ca^{++} ($r = 0,4$). La contribution de Ca^{++} est relativement faible. L'axe 2 est formé de la contribution des variables HCO_3^- ($r = 0,67$), K^+ ($r = 0,77$) et pH ($r = 0,69$) (tableau XXIX).

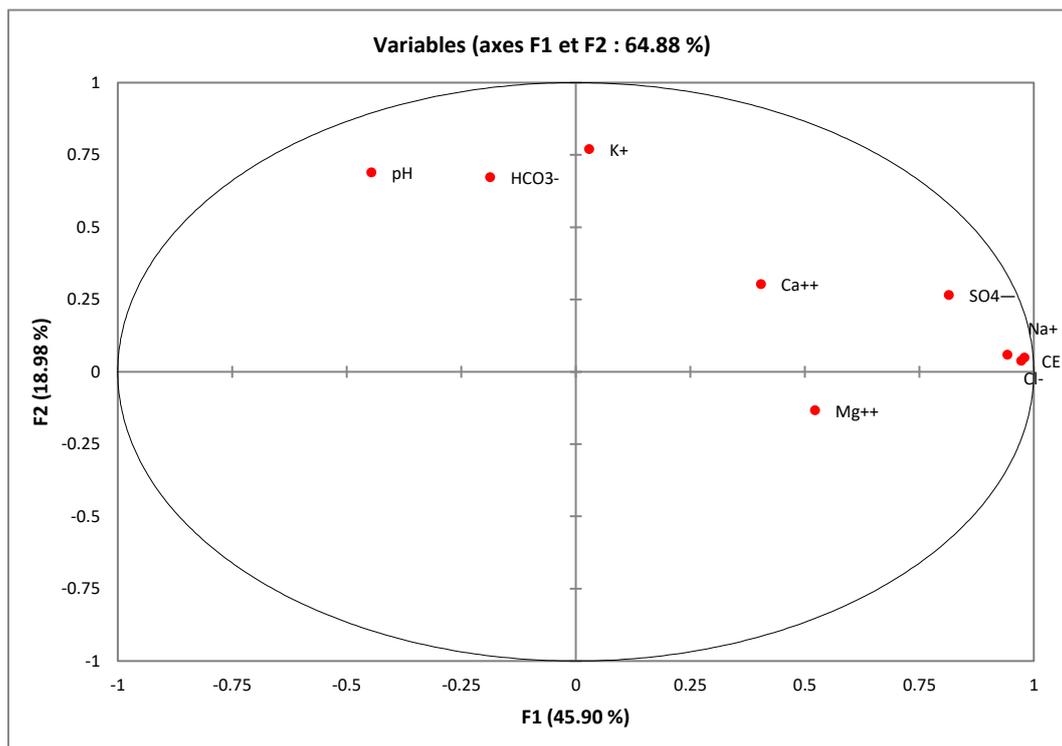


Figure 59. ACP effectuée sur neuf variables (4^{ème} campagne)

Tableau XXIX: Corrélations entre les différents paramètres chimiques et les facteurs (4^{ème} campagne)

Paramètres	F1	F2	F3	F4	F5
pH	-0,45	0,69	-0,10	0,45	-0,18
CE	0,97	0,04	-0,18	-0,02	0,03
Na ⁺	0,94	0,06	-0,29	-0,04	0,03
K ⁺	0,03	0,77	-0,33	-0,32	-0,39
Ca ⁺⁺	0,40	0,30	0,74	0,31	-0,07
Mg ⁺⁺	0,52	-0,13	0,67	-0,22	-0,35
Cl ⁻	0,98	0,05	-0,10	-0,04	-0,07
HCO ₃ ⁻	-0,19	0,67	0,35	-0,38	0,48
SO ₄ ⁻⁻	0,82	0,27	-0,08	0,28	0,29

Nous concluons que Cl⁻ (23,25 %), Na⁺ (21,5 %), Mg⁺⁺ (6,61 %) et SO₄⁻ (16,08 %) (tableau XXX) ont plus de poids sur la variation de CE que K⁺, Ca⁺⁺, pH et HCO₃⁻. L'ACP a montré que Na⁺, Cl⁻, SO₄⁻ et CE sont proches du cercle de corrélation (figure 59). Ceci révèle l'existence d'une corrélation entre ces éléments.

Tableau XXX : Contribution des différents paramètres chimiques dans la formation des facteurs (4^{ème} campagne)

Paramètres	F1(%)	F2 (%)	F3 (%)	F4 (%)	F5 (%)
pH	4,81	27,82	0,66	29,99	5,22
CE	22,92	0,08	2,31	0,07	0,16
Na ⁺	21,50	0,21	6,28	0,22	0,10
K ⁺	0,02	34,7	7,94	14,84	24,05
Ca ⁺⁺	3,96	5,39	39,97	13,83	0,68
Mg ⁺⁺	6,61	1,03	32,71	7,51	19,38
Cl ⁻	23,25	0,14	0,79	0,21	0,70
HCO ₃ ⁻	0,85	26,51	8,87	21,80	36,08
SO ₄ ⁻	16,08	4,13	0,46	11,52	13,63

D'après le tableau XXXI, les corrélations sont statistiquement significatives et positives entre les couples CE-Na⁺ (r = 0,98), CE-Cl (r = 0,98) et CE-SO₄⁻ (r = 0,79). Ces corrélations révèlent l'existence de fortes relations entre la salinité, Na⁺, Cl⁻ et SO₄⁻. Mg⁺⁺ ne présente pas de relation statistiquement significative avec CE (r = 0,37), d'ailleurs il est relativement loin du cercle de corrélation (figure 59).

Tableau XXXI : Matrice de corrélation entre les différents paramètres chimiques (4^{ème} campagne)

Paramètres	pH	CE	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻
pH	1								
CE	-0,39	1							
Na ⁺	-0,35	0,98*	1						
K ⁺	0,42	0,10	0,15	1					
Ca ⁺⁺	0,03	0,27	0,16	-0,03	1				
Mg ⁺⁺	-0,36	0,37	0,29	-0,14	0,54*	1			
Cl ⁻	-0,38	0,98*	0,97*	0,12	0,33	0,46*	1		
HCO ₃ ⁻	0,29	-0,19	-0,20	0,31	0,22	-0,02	-0,19	1	
SO ₄ ⁻	-0,12	0,79*	0,77*	0,08	0,38	0,21	0,75*	0,01	1

* significatives au seuil $\alpha = 0,05$ (ddl=17).

Conclusion

Les principaux résultats analytiques de la quatrième campagne révèlent que les quatre profils se caractérisent par :

- Une très forte salinité ($4,73 \text{ dS/m} < \text{CE} < 122,5 \text{ dS/m}$).
- Un profil salin de type convexe pour les profils 1, 3, 4 et un profil concave pour le profil 2.
- Un ESP élevé ($15,56 \% < \text{ESP} < 36,64 \%$).
- Solution du sol dominée par Cl^- ($71 \% < \text{Cl}^- < 91 \%$) et Na^+ ($63 \% < \text{Na}^+ < 82 \%$).
- Un faciès chimique chloruré sodique largement dominant.
- L'ACP a révélé que CE est particulièrement influencée par Cl^- (23,25 %), Na^+ (21,5 %), Mg^{++} (6,61 %) et SO_4^- (16,08 %).

L'analyse des résultats a montré que la quatrième campagne se distingue de la campagne précédente par une très forte salinité dans la partie médiane du profil sauf pour le profil 2 dont les sels s'accumulent surtout dans l'horizon de sub-surface. Ceci est dû à une remontée capillaire favorisée par un bilan hydrique largement déficitaire pour cette saison ($(27,2 \text{ mm}) \text{ P} < \text{ETP} (232 \text{ mm})$)*. La concentration ionique (Na^+ , Mg^{++} , SO_4^- , Cl^-) de la solution du sol est nettement plus élevée que celle de la campagne précédente et le risque de sodicité reste toujours aussi important (SAR assez élevé). En revanche, la concentration des ions K^+ et HCO_3^- ne changent pas et elles demeurent toujours faibles. Le faciès chimique dominant est de type chloruré-sodique, donc il est similaire à celui des campagnes précédentes. Ces sols évoluent selon la voie saline neutre.

2. Relations entre CE et les paramètres chimiques des Solonchaks étudiés

Dans ce qui suit, nous présentons d'abord les relations entre CE d'une part et les cations et anions de la solution du sol, le pH et le SAR d'autre part. Nous présentons ensuite les relations entre CE et ESP et entre CE et Mg^{++} échangeable (tableau XXXII). Le choix de Mg^{++} et Na^+ échangeables se justifie par le fait que ces deux éléments provoquent une dégradation de la structure des sols (Durand, 1960 ; Saidi, 2004). Seules les relations statistiquement significatives seront représentées graphiquement. Dans cette démarche, nous avons étudié l'ensemble des échantillons sans préjuger de leur appartenance à tel ou tel profil, ni de la saison de leur prélèvement. Ceci permet d'établir des régressions sur la base d'un nombre important d'échantillons.

* Données climatiques de l'année en cours (station de Hmadna)

Les équations établies permettent la prédiction de CE à partir de ces différents paramètres chimiques. Elles permettent aussi de déterminer l'intensité des relations entre CE et les paramètres chimique des sols étudiés.

Tableau XXXII. Corrélations entre CE et les différents paramètres chimiques

Relations	r	ddl	Signification	Seuil α
CE, Na ⁺ (solution du sol)	0,93	74	***	0,001
CE, Mg ⁺⁺ (solution du sol)	0,42	74	***	0,001
CE, Ca ⁺⁺ (solution du sol)	0,59	74	***	0,05
CE, K ⁺ (solution du sol)	0,22	74	NS	0,05
CE, Cl ⁻	0,98	74	***	0,001
CE, SO ₄ ⁻⁻	0,7	74	***	0,001
CE, HCO ₃ ⁻	0,21	74	NS	0,05
CE, pH	0,28	74	*	0,05
ESP, SAR	0,56	74	***	0,001
CE, ESP	0,55	74	***	0,001
CE, Mg ⁺⁺ (échangeable)	0,09	74	NS	0,05

* significative, *** très hautement significative, NS : non significative

2.1. Relation entre CE et les cations de la solution du sol

Il s'agit d'étudier les relations entre CE et les cations de la solution du sol.

2.1.1. Relation CE-Na⁺

Les résultats statistiques (tableau XXXII) indiquent que CE est très fortement corrélée à Na⁺ ($r = 0,93$; $p < 0,001$) de la solution du sol. La droite de la régression linéaire (figure 60) confirme ce résultat et indique que l'augmentation de la concentration de Na⁺ engendre une augmentation presque proportionnelle de CE. La forte liaison entre ces deux paramètres est bien illustrée par le nuage de point qui est très effiloché.

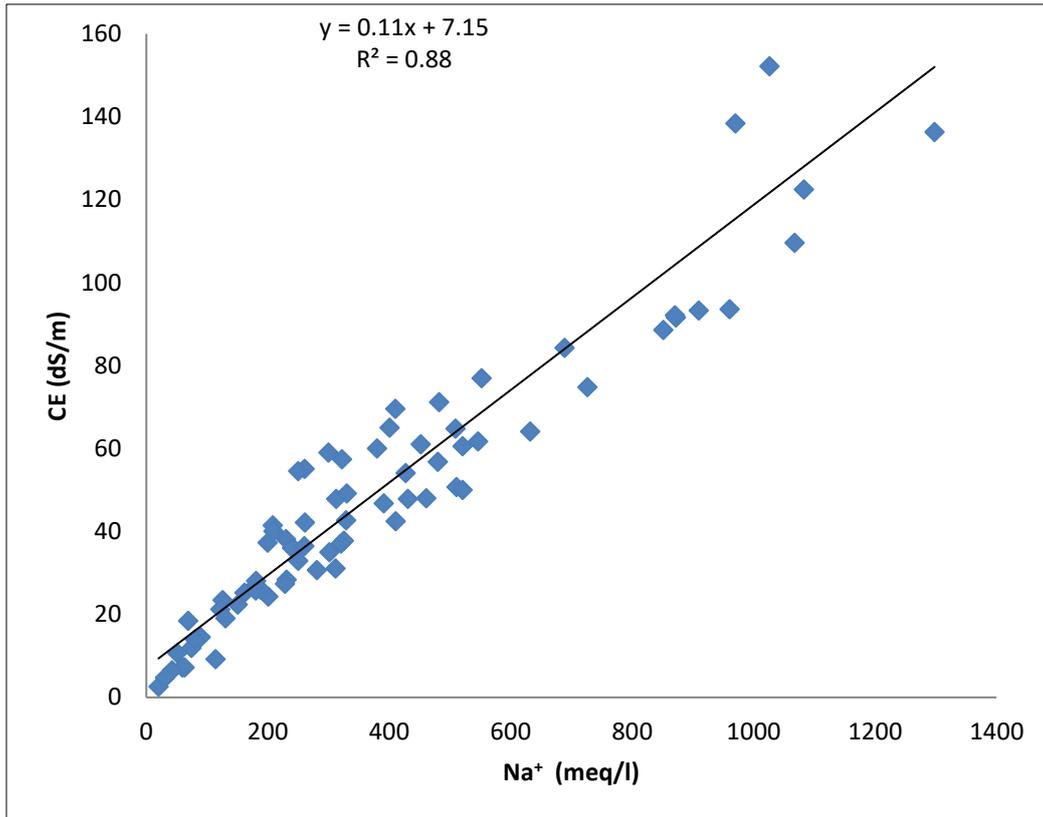


Figure 60. Relation entre CE et Na⁺ de la solution du sol

2.1.2. Relation CE-Mg⁺⁺

Les résultats statistiques (tableau XXXII) indiquent que CE est très fortement corrélée avec le Mg⁺⁺ ($r = 0,42$; $p < 0,001$) de la solution du sol.

Toutefois, la figure 61 ne fait apparaître aucune tendance réelle de l'augmentation de CE quant la concentration en Mg⁺⁺ augmente. En effet, le nuage de point est très éparse et la majorité des valeurs sont très éloignées de la courbe de tendance curvilinéaire.

Par ailleurs, les valeurs de CE correspondant à une valeur donnée de la concentration en Mg⁺⁺ sont souvent très écartées les un des autres. Ce résultat laisse difficile la prédiction de CE par la concentration en Mg⁺⁺ même si les statistiques suggèrent le contraire. Le meilleur modèle d'ajustement trouvé entre CE et Mg⁺⁺ est de type $CE = 14,4 Mg^{0,29}$.

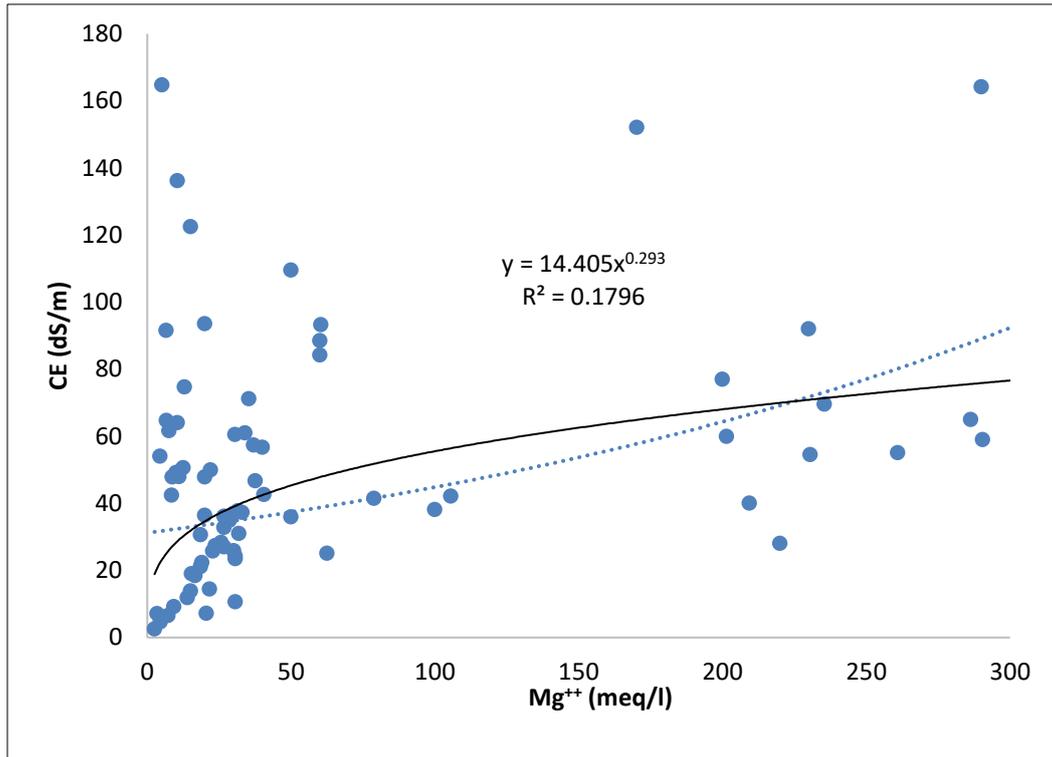


Figure 61. Relation entre CE et Mg^{++} de la solution du sol

2.1.3. Relation CE- Ca^{++}

La relation entre CE et Ca^{++} est statistiquement très hautement significative ($r = 0,59$; $p < 0,001$) (tableau XXXII). Toutefois, la figure 62 montre que le nuage de point est très dispersé et que la majorité des points sont très distants de la droite de régression curvilinéaire ($CE = 2,52 Ca^{0,7}$). Ce résultat rend difficile la bonne prédiction de CE par la concentration de Ca^{++} de la solution du sol. Il est analogue à celui de la relation CE- Mg^{++} .

Ainsi, il s'avère que Na^+ est le seul cation de la solution du sol qui peut constituer un bon prédicteur de CE même si les relations statistiques entre cette dernière et la concentration en Ca^{++} et Mg^{++} sont statistiquement significatives.

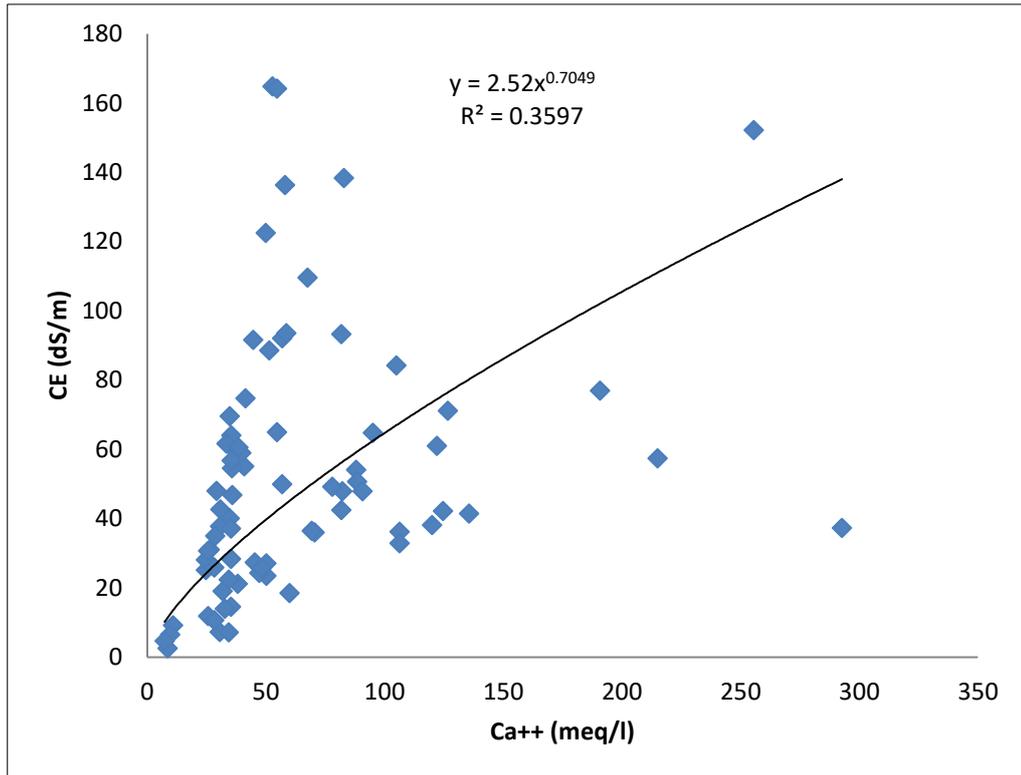


Figure 62. Relation entre CE et Ca^{++} de la solution du sol

2.2. Relation entre CE et les anions de la solution du sol

Il s'agit d'étudier les relations entre CE, et la composition anionique de la solution du sol.

2.2.1. Relation CE- Cl^-

Tableau XXXII révèle que la relation entre CE et Cl^- est très hautement significative ($r = 0,98$; $p < 0,001$). Ce résultat est bien illustré par la figure 63 qui montre clairement que l'augmentation de la concentration de Cl^- se traduit par une augmentation de CE. De même, le nuage de point est très serré et les points se distribuent de part et d'autre de la droite de la régression linéaire ($\text{CE} = 0,1 \text{ Cl}^- + 3,5$). Ce résultat signifie que la concentration de Cl^- est un excellent indicateur de CE des Solonchaks étudiés.

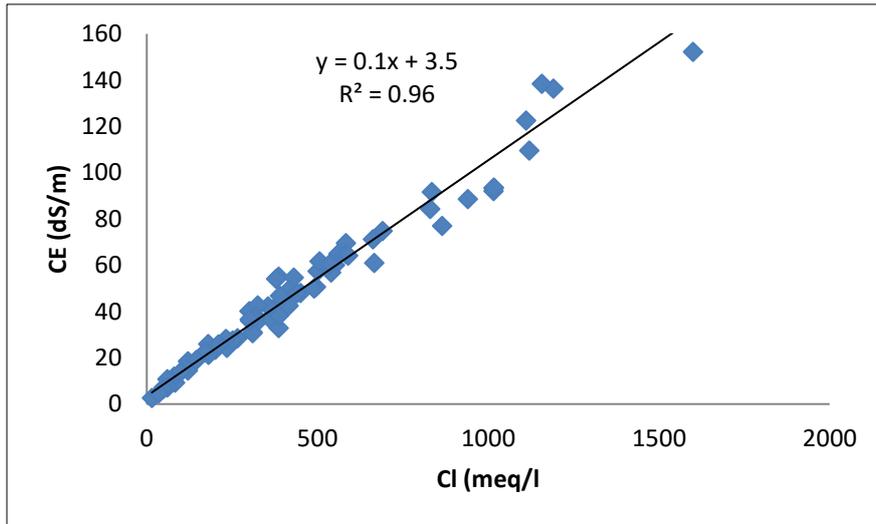


Figure 63. Relation entre CE et Cl⁻

2.2.2. Relation CE-SO₄²⁻

La relation entre CE et les SO₄²⁻ est très hautement significative ($r = 0,7$; $p < 0,001$) (tableau XXXII). Ce résultat est illustré par la figure 64 qui montre que l'augmentation de CE est dépendante de l'évolution de la concentration en SO₄²⁻. Toutefois, le nuage de points est relativement lâche et les points se distribuent le long de la droite de la régression linéaire ($CE = 0,35 SO_4 + 12,14$) même s'ils en sont parfois assez éloignés. Il existe une tendance à l'augmentation de CE quand la concentration en SO₄²⁻ augmente. Ce résultat suggère que la relation entre CE et SO₄²⁻ est peu intense même si les statistiques stipulent qu'elle est très hautement significative.

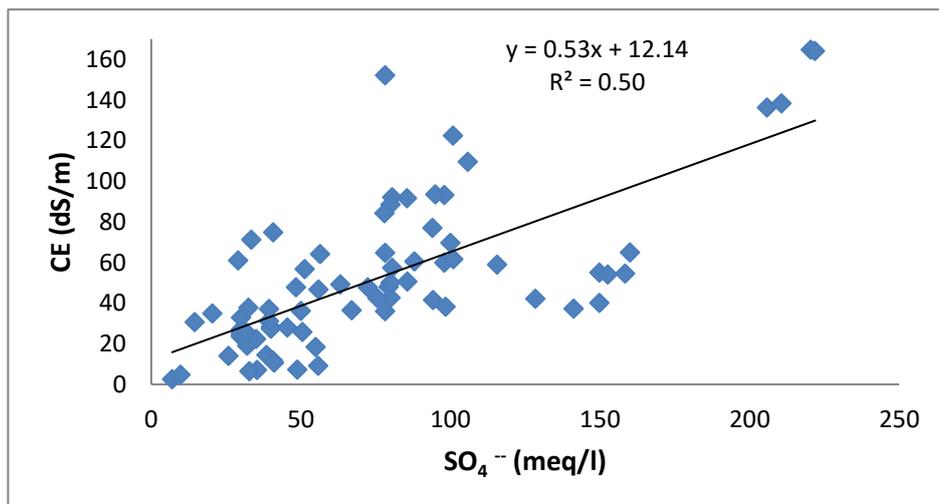


Figure 64. Relation entre CE et SO₄²⁻

Ainsi, il s'avère que SO_4^- est le seul anion de la solution du sol qui peut constituer un bon prédicteur de CE même si la relation statistique entre cette dernière et SO_4^- est significative.

2.3. Relation pH-CE

Malgré que la relation entre CE et pH est statistiquement significative (tableau XXXII), elle est faible ($r = 0,28$; $p < 0,05$). De même, le nuage de points de la figure 65 est très étalé et ne se concentre pas de part et d'autre de la droite de la régression linéaire. Pour une même valeur de CE, les valeurs de pH peuvent varier considérablement. Toutefois, la droite de la régression linéaire ($\text{pH} = 0,002\text{CE} + 7,41$) montre une légère tendance à l'augmentation de pH quand les valeurs de CE augmentent.

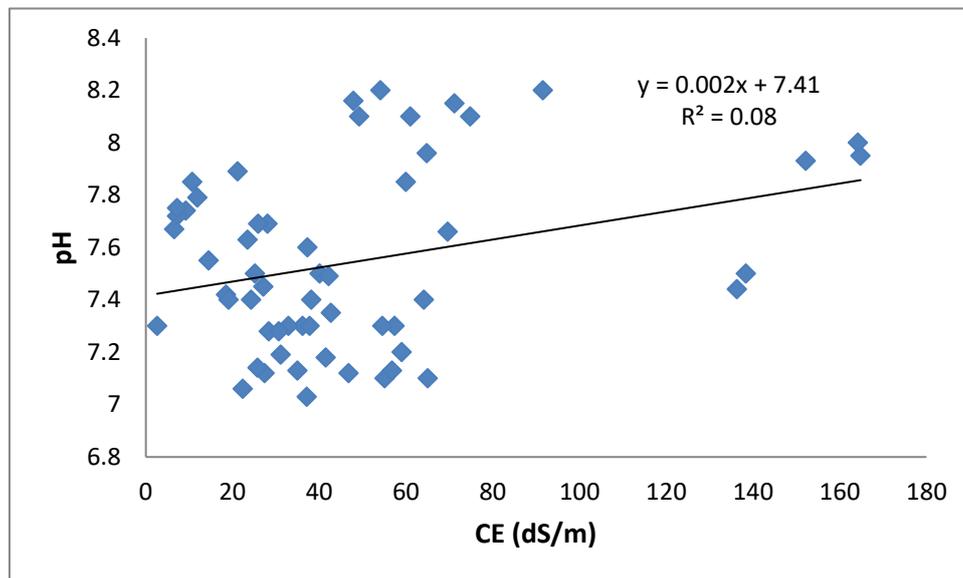


Figure 65. Relation entre CE et pH

2.4. Relations CE-ESP

La relation entre CE et l'ESP est statistiquement très hautement significative ($r = 0,55$; $p < 0,001$) (Tableau XXXII). La tendance générale de cette relation montre que l'évolution de la salinité provoque une variation de l'ESP. Ceci est illustré par la figure 66 dont l'équation de régression linéaire est de type $\text{CE} = 2,71\text{ESP} - 23,06$. Ce résultat va dans le même sens que ceux de Djili (2000) et Touaf (2002).

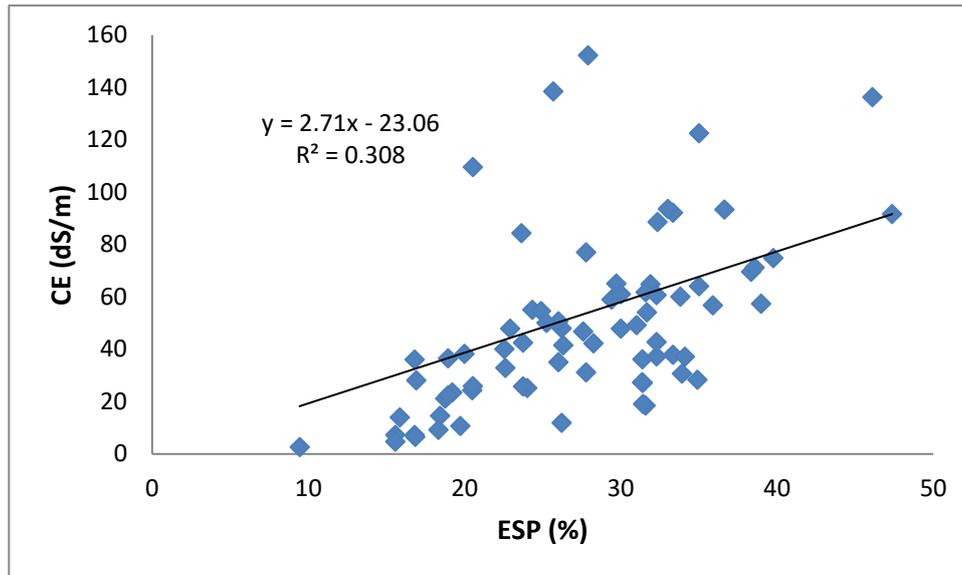


Figure 66. Relation entre CE et l'ESP

2.5. Relation entre SAR et ESP

Le SAR est un paramètre d'évaluation de la qualité des eaux d'irrigation. Ainsi, l'utilisation du SAR suppose que l'eau d'irrigation se transforme en solution du sol sans modification de sa composition chimique. Ce paramètre permet de prédire le taux de sodium échangeable du sol lorsque le complexe adsorbant se mettra en équilibre avec cette eau. La relation la plus connue entre l'ESP et le SAR est celle de USSL (1954). $ESP = 1,47 SAR / (0,0147 SAR)$ (USSL, 1954).

En Algérie, les premières tentatives de mise en équation de la relation entre l'ESP et le SAR n'ont pas donné satisfaction (Durand, 1960). En revanche, Halitim (1988) a trouvé une relation significative entre l'ESP et le SAR dans la région de Zaherz $ESP = 0,78 SAR + 0,95$ ($r = 0,87$) et également Tchencheli (1990) dans la zone semi-aride de la plaine du Haut-Chélif. $ESP = 1,977 SAR - 3,35$ ($r = 0,74$).

Le tableau XXXII indique que la relation entre le SAR et l'ESP des sols étudiés est très hautement significative ($r = 0,56$; $p < 0.001$). Ce résultat signifie qu'il existe une tendance à l'augmentation de l'ESP quand le SAR augmente comme cela est illustré par la figure 67. L'équation de la régression linéaire est de type $ESP = 0,095 SAR + 21,66$. Ce résultat concorde avec ceux de Halitim (1988) et Tchencheli (1990).

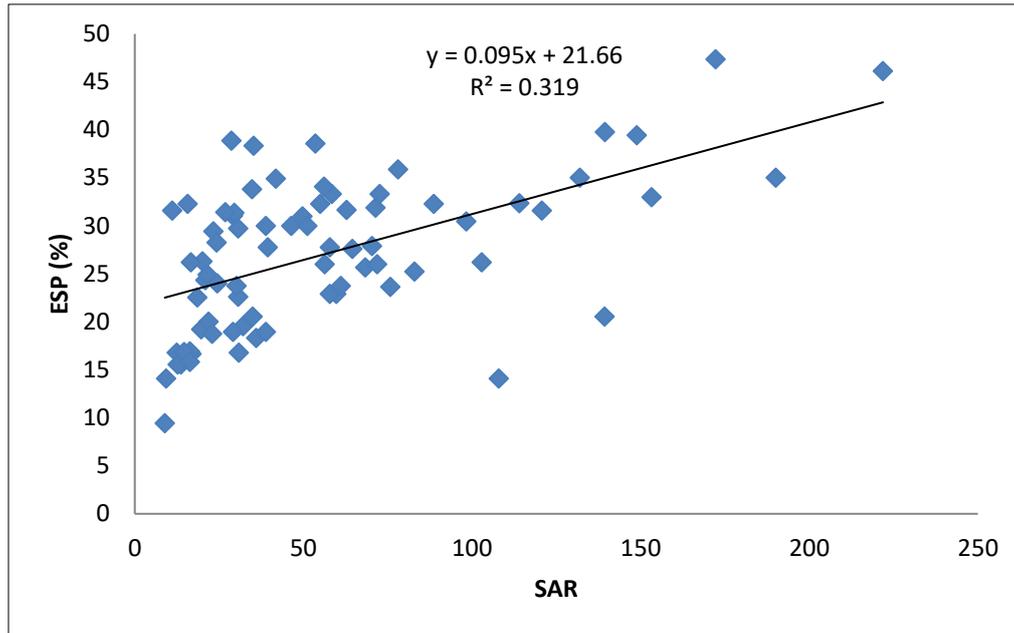


Figure 67. Relation entre l'ESP et le SAR

3. Discussion des résultats

Les sols étudiés sont des sols développés sur les alluvions de l'Oued Mina pour les profils 1 et 2 et sur celles de l'Oued Chélif pour les profils 3 et 4. Le fait que ces sols sont développés sur un matériau alluvial situé à l'aval du bassin versant explique que leur texture soit lourde (argileuse à argilo-limoneuse) mais alterne parfois avec des couches de texture plus grossières (Hadj Miloud, 2010).

Les sols étudiés sont marqués par une très forte salinité ($CE > 7 \text{ dS/m}$) sauf l'horizon de surface du profil 3 qui, lors de la première campagne de mesure, a enregistré une faible valeur ($CE = 2,61 \text{ dS/m}$). Dans ces sols, la salinité est nettement plus élevée durant la saison sèche et chaude ($4,73 \text{ dS/m} < CE < 164,8 \text{ dS/m}$) comparativement à celle de la saison humide et froide ($2,61 \text{ dS/m} < CE < 64 \text{ dS/m}$). Cette différence serait due au climat évaporant de cette région ($ETP = 1500 \text{ mm/an}$) et à la nature argileuse des sols qui favorisent la remontée capillaire des eaux de la nappe salée peu profonde lors de la période sèche et chaude. Le profil salin dominant pour la période sèche est de type convexe. La diminution de la salinité des horizons de surface des sols durant la période humide est liée à la lixiviation partielle des sels. Le profil salin lors de cette période humide est essentiellement de type descendant.

D'une manière générale, les résultats de la composition chimique des solutions des sols montrent que la prédominance des cations est de type $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{++} > \text{Mg}^{++} > \text{K}^+$ et celle des

anions est de type $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$. Ces résultats concordent avec ceux de Daoud (1993) dans le Bas-Chélif, Djamaï (2007) dans la région de Fetzara et Ouardi (2006) en milieu salé du Maghreb.

Cependant, les valeurs du SAR sont relativement élevées ($9,8 < \text{SAR} < 221$), d'où un risque important d'alcalinisation. Ceci est dû à la concentration élevée de Na^+ dans la solution du sol, comparativement aux Ca^{++} et Mg^{++} .

Les cations de la solution du sol sont dominés par le sodium ($46 \% < \text{Na}^+ < 82\%$) et les anions par les chlorures ($56 \% < \text{Cl}^- < 91 \%$) d'où un faciès chimique de type chloruré sodique correspondant à la voie saline neutre. Les teneurs élevées de Na^+ ont un effet direct sur les fortes valeurs de l'ESP ($9,5 \% < \text{ESP} < 47 \%$) surtout lors de la période sèche ($15,56 \% < \text{ESP} < 47 \%$). Ainsi, la majorité des horizons sont fortement sodiques (USSL, 1954) d'où les structures dégradées des profils 1, 2 et 3 décrits par Hadj Miloud (2010). De même, les plus fortes valeurs de CE correspondent aux fortes valeurs de Na^+ ($r = 0,93$; $p < 0.001$) et de Cl^- ($r = 0,98$; $p < 0.001$).

D'une manière générale, l'ACP pour chaque campagne a montré que les éléments chimiques Cl^- , Na^+ , SO_4^{2-} et Mg^{++} de la solution du sol ont plus de poids sur la variation de CE que K^+ , Ca^{++} et HCO_3^- . Ceci pourrait être expliqué par le fait que Cl^- , Na^+ , SO_4^{2-} et Mg^{++} sont issus des espèces minérales qui seraient plus solubles par rapport aux autres éléments. L'ACP a révélé aussi que Mg^{++} ne joue pas un rôle significatif dans la variation de CE dans les saisons sèches de 2012 et 2013. De même, les sulfates n'interviennent pas dans l'accroissement de la salinité lors de la saison humide de 2013. L'ACP a montré aussi que l'intensité des relations statistiques entre CE et les éléments de la solution du sol peut varier d'une saison à une autre. Seules les relations entre les couples CE- Na^+ et CE- Cl^- demeurent fortes quelle que soit l'année et la saison considérées.

L'étude des relations statistiques, toutes saisons confondues, a montré une corrélation positive très hautement significative entre CE et Na^+ , Mg^{++} , Ca^{++} , SO_4^{2-} et Cl^- . De même, la relation entre CE et le pH est positive et significative. L'évolution de Na^+ s'explique par le fait qu'il est le cation dominant dans la solution des sols et qu'il ne rentre pas dans les phénomènes de précipitation des minéraux jusqu'à des valeurs de CE très élevées (Droubi et al., 1980). Cependant, l'évolution de Mg^{++} et Ca^{++} peut être contrôlée par la précipitation de la magnésite

et de la calcite. Toutefois, ce contrôle semble insuffisant pour limiter leur évolution avec le niveau de salinité. L'ion chlore, qui ne rentre pas dans les précipitations des minéraux jusqu'à des niveaux de salinité très élevés, présente un comportement comparable à celui du sodium et suit l'évolution de CE. De même, l'accroissement des sulfates pourrait être contrôlé par la précipitation des minéraux sulfatés. Ces accroissements semblent insuffisants pour contrôler leur augmentation avec le niveau de salinité (Daoud, 1993).

La corrélation entre le taux du Na^+ échangeable et CE est significative. Ce résultat suggère que la salinité des sols s'accompagne d'une sodisation du complexe adsorbant. En général, ceci est le cas des sols du nord d'Algérie (Djili, 2000) et en particulier les sols du Chélif (Daoud, 1993 ; Saidi, 2004). De même, la corrélation est très hautement significative entre l'ESP et le SAR. De ce fait, nous concluons que le SAR constitue un bon estimateur de la sodisation du complexe adsorbant. Quant à la corrélation entre K^+ , HCO_3^- , Mg^{++} échangeable et CE, elle reste très faible et statistiquement non significative.

4. Evolution saisonnière de la salinité

L'évolution saisonnière de la salinité des sols de Rélizane a été étudiée en 2012 et 2013. Les prélèvements des échantillons ont été effectués à la fin de la saison humide et à la fin de la saison sèche de chaque année, ce qui correspond à quatre campagnes de mesures. Dans cette approche, il s'agit de comparer les profils salins et de mettre en évidence les gradients de leurs évolutions. La comparaison a porté entre les profils suivants :

- Les profils salins de la saison sèche et de la saison humide de la même année;
- Les profils salins des saisons humides de 2012 et de 2013 ;
- Les profils salins des saisons sèches de 2012 et de 2013.

4.1. Comparaison des profils salins de la même année

Il s'agit de comparer les profils salins des saisons sèches et humides de la même année.

4.1.1. Comparaison des profils salins de 2012

La figure 68 révèle que la salinité a augmenté dans tous les horizons du profil 1 pendant la saison sèche par rapport à la saison humide. Cette augmentation est nettement plus marquée pour les horizons de profondeur. L'écart de CE pour les horizons 4 et 5 est respectivement de

78,9 dS/m et 127,5 dS/m (tableau I, annexe 2). Cette augmentation serait due à la remontée capillaire pendant la saison sèche.

La salinité a légèrement diminué en surface et elle a augmenté en profondeur dans le profil 2 pendant la période sèche par rapport à la saison humide (figure 68). L'augmentation est particulièrement marquée dans les horizons médians. L'écart de CE pour les horizons 4 et 5 est respectivement de 83,3 dS/m et 109,6 dS/m (tableau II, annexe 2). Cette augmentation de la salinité serait favorisée par la remontée capillaire lors de la saison sèche, en présence d'une nappe très salée (CE = 60 dS/m) située à faible profondeur (1,5 m). La présence d'une nappe phréatique à faible profondeur intensifie la salinisation du sol lors d'un épisode d'évaporation (FAO, 2002).

La salinité a augmenté en surface et elle a diminué en profondeur dans le profil 3 pendant la saison sèche par rapport à la saison humide (figure 68). L'augmentation est plus nette dans les horizons de surface. L'écart de CE pour les horizons 1 et 2 est respectivement de 51,49 dS/m et 28,6 dS/m (tableau III, annexe 2). Cette augmentation de salinité en surface serait liée à une remontée capillaire qui est fortement favorisée par la texture fine ($47,7\% < A < 57,6\%$) de ce profil.

La salinité a augmenté en profondeur dans le profil 4 pendant la saison sèche par rapport à la saison humide (figure 68), surtout au niveau de l'horizon de sub-surface. L'écart de CE pour les horizons 2 et 3 est respectivement de 127,9 dS/m et 42,8 dS/m (tableau IV, annexe 2). L'horizon de surface est marqué par une diminution de salinité (-5,29 dS/m) (tableau IV, annexe 2) pendant la période sèche. Ceci serait provoqué par la rupture du capillaire au niveau de l'horizon de surface. La rupture de ce dernier est due à la présence de croûtes de battance à la surface du sol.

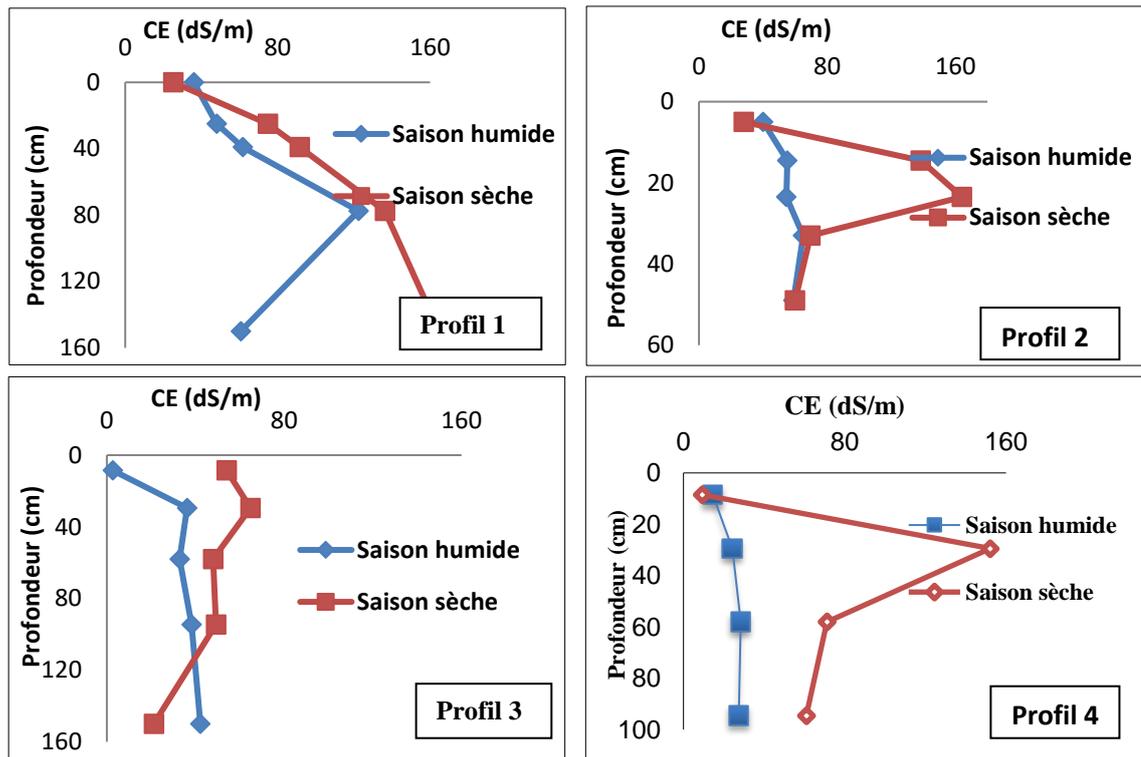


Figure 68. Profils salins des saisons sèche et humide (2012)

La variation saisonnière de la salinité entre la saison humide et la saison sèche de 2012 a révélé l'accroissement de la salinité pendant la période sèche pour l'ensemble des profils. Ceci est dû essentiellement à une remontée capillaire durant la période sèche. Seule la localisation du niveau de salinité maximum diffère entre les profils. La différence du comportement des 4 profils serait provoquée par la différence de texture des horizons, la présence d'une nappe salée à faible niveau piézométrique et à l'état de surface du sol.

La comparaison des profils salins de la saison humide et de la saison sèche est réalisée sur la base d'une CE moyenne du profil calculée selon la formule $\frac{\sum(\text{CE de chaque horizon} \times \text{l'épaisseur de l'horizon})}{\text{épaisseur du profil}}$. Ce calcul porte sur les deux périodes comparées. L'écart de la salinité moyenne des profils est obtenu par différence entre les valeurs de CE de la saison humide de 2012 et celles de CE de la saison sèche de 2012. La vitesse de salinisation mensuelle est obtenue par une division de l'écart par le temps (mois). La durée de la saison humide dans la région de Rélizane est de 5 mois et celle de la saison sèche est de 7 mois. Par conséquent lorsqu'il s'agit d'étudier la vitesse de salinisation entre la saison humide et la saison sèche de 2012 ou de 2013, l'écart est divisé par 7. La vitesse de salinisation entre 2012 et 2013 pour la même saison est obtenue par une division de l'écart par 12 mois.

Le tableau XXXIII montre que les quatre profils ont subi une salinisation entre la saison humide et la saison sèche en 2012. Cette salinisation se produit à une vitesse comprise entre 0,66 et 13 dS/m par mois. Ceci est due à la forte ETP (1223 mm) pendant la période sèche et à la texture fine qui favorisent la remontée capillaire de la nappe très salée (CE = 60 dS/m) qui se situe à faible profondeur (1,5 m), surtout pour les profils 1 et 2. Le maximum de salinité est observé au niveau des horizons qui sont marqués par la rupture des pores capillaires. Nous concluons que le climat très évaporant, conjugué à une granulométrie relativement fine, accentue le phénomène de la salinisation en période sèche. La salinité des sols augmente lorsque le sol se dessèche (FAO, 2002).

La différence de variation de la vitesse de salinisation entre les profils est contrôlée par la granulométrie, la morphologie (fentes de retrait) et la présence ou non d'une nappe phréatique peu profonde et fortement minéralisée.

Tableau XXXIII. Ecart et vitesses moyennes de salinisation des profils entre la saison humide et la saison sèche 2012

Profils	CE moyenne du profil (dS/m) (saison humide 2012)	CE moyenne du profil (dS/m) (saison sèche 2012)	L'écart de CE entre les deux saisons (dS/m)	Vitesse de salinisation (dS/m/mois)
Profil 1	40,82	131,18	90,36	13
Profil 2	55,6	83,67	28	4
Profil 3	36,37	41,05	4,67	0,66
Profil 4	25,86	79,64	53,77	7,68

4.1.2 Comparaison des profils salins de 2013

La figure 69 révèle une augmentation de la salinité pendant la saison sèche par rapport à la saison humide pour tous les profils. Cependant, on constate une légère diminution de la salinité dans l'horizon de surface du profil 3 (-2,48 dS/m) (tableau V, annexe 2). La présence de fentes de retrait de 1cm de largeur, très apparente au niveau de l'horizon de surface (Hadj Miloud, 2010) provoque une rupture des pores capillaires (Van Hoorn, 1995) ce qui empêche donc l'accentuation du phénomène de salinisation en surface.

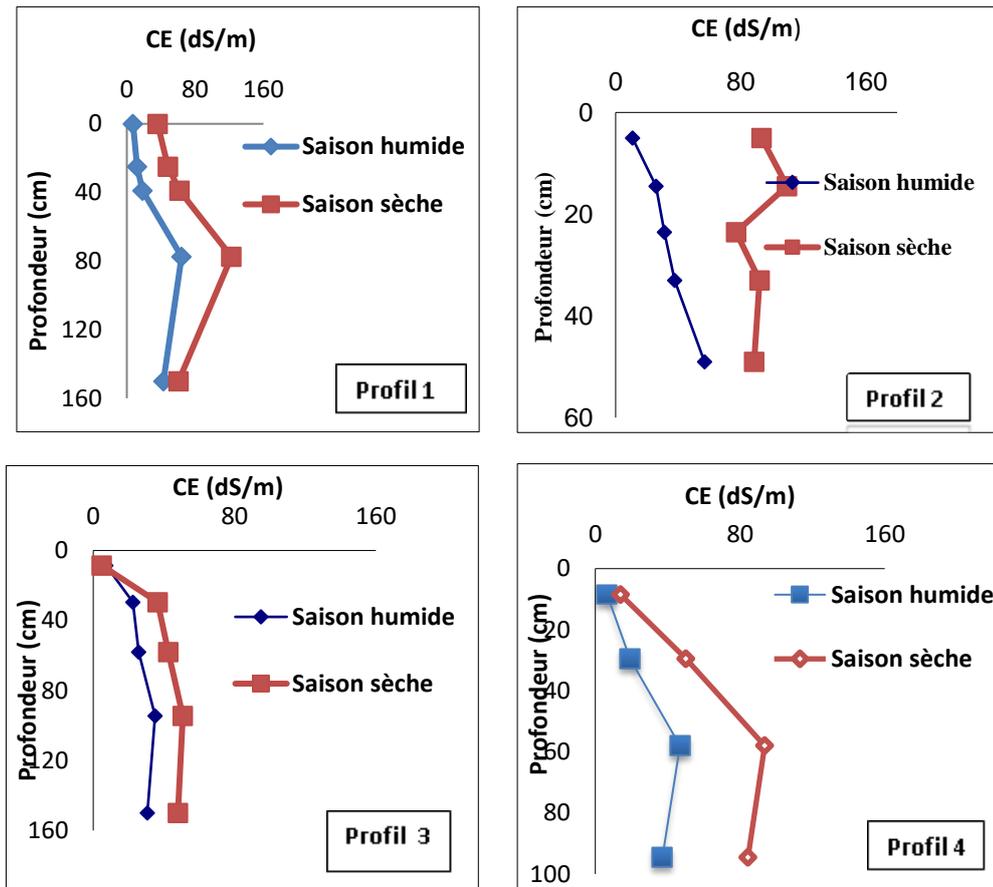


Figure 69. Profils salins des saisons sèche et humide (2013)

Le tableau XXXIV montre que la vitesse de salinisation varie entre 2,17 et 5,7dS/m par mois selon le profil considéré. Cette vitesse est plus élevée pour le profil 4 (5,7 dS/m par mois) à cause probablement de sa texture très argileuse (61,5 % < Argile > 66 %) et donc plus favorable à la remonté capillaire et par conséquent à une salinisation plus importante.

Tableau XXXIV. Ecart et vitesses moyennes de salinisation des profils entre la saison humide et la saison sèche 2013

Profils	CE moyenne du profil (dS/m) (saison humide 2013)	CE moyenne du profil (dS/m) (saison sèche 2013)	Ecart de CE entre les deux saisons (dS/m)	Vitesse de salinisation (dS/m/mois)
Profil 1	40,38	73,41	33,03	4,7
Profil 2	37,46	76,5	39	5,6
Profil 3	28,32	43,5	15,19	2,17
Profil 4	33,27	73,16	39,88	5,7

4.2. Comparaison des profils salins entre les saisons humides 2012 et 2013

L'observation de la figure 70 des profils 1, 2, 3 et 4 révèle une différence de comportement des profils salins selon le profil considéré. En effet :

- la salinité a diminué en surface (-16,27 dS/m) (tableau VI, annexe 2) et elle a augmenté en profondeur dans le profil 1 pendant la saison humide 2013 par rapport à la saison humide 2012, une augmentation moyenne de 6,05 dS/m.
- La salinité a diminué dans le profil 2 en 2013 par rapport à la même saison humide 2012, une diminution moyenne de 22,3 dS/m (tableau VII de l'annexe 2).
- La salinité a augmenté sensiblement en surface (4,6 dS/m) dans le profil 3 en 2013, et elle a diminué en profondeur avec une diminution moyenne de 7,55 dS/m (figure 70 et tableau VIII de l'annexe 2).
- La salinité a diminué sensiblement en surface (-7,98 dS/m) et elle a augmenté en profondeur avec une moyenne de 14,05 dS/m dans le profil 4 pendant la saison humide 2013 par rapport à la saison humide 2012 (tableau IX de l'annexe 2).

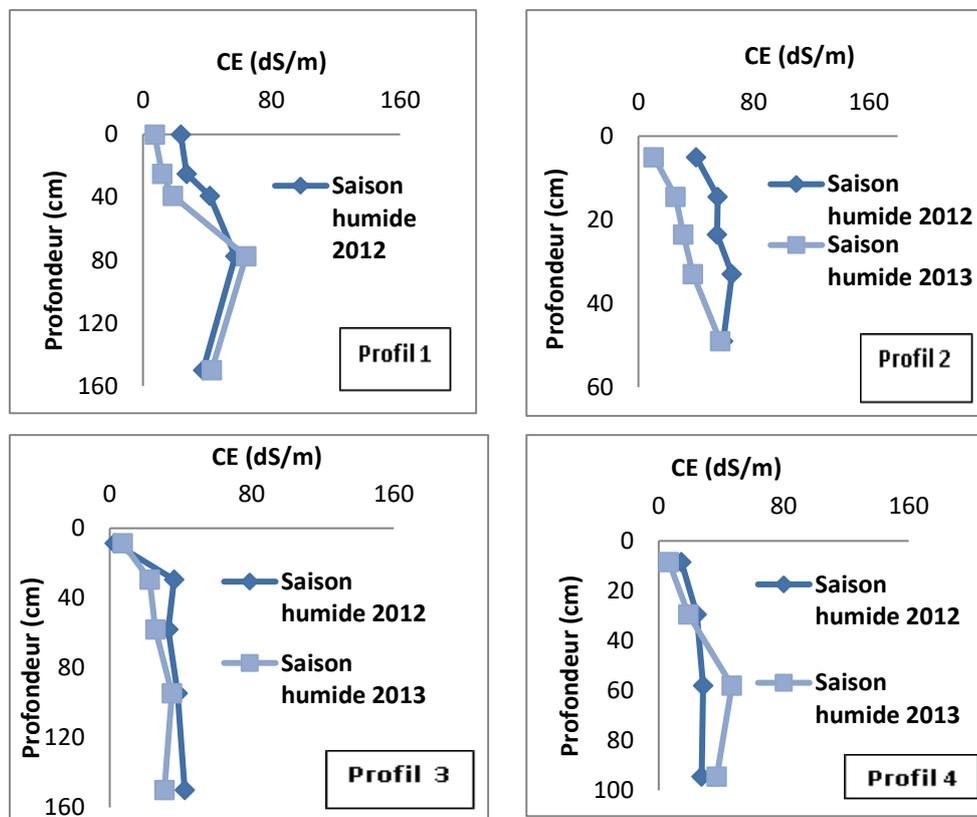


Figure 70. Profils salins des saisons humides 2012 et 2013

Toutefois, le tableau XXXV montre que les profils 1, 2 et 3 accusent une désalinisation moyenne entre la saison humide 2012 et la saison humide 2013. Cette désalinisation se produit à une vitesse moyenne comprise entre 0,037 et 0,67 dS/m par mois. Par ailleurs, il faut noter que l'écart pluviométrique entre les saisons humides 2012 et 2013 est de 24,5mm. Cet écart est en faveur de la saison humide de 2013. Ceci aurait permis de lixivier d'avantage des sels pendant la saison humide de 2013.

Par contre, le profil 4 enregistre une légère salinisation entre la saison humide 2012 et la saison humide 2013. Cette augmentation de la salinité s'est produite à une vitesse moyenne de 0,62 dS/m par mois. Le profil 4 se démarque ainsi des autres profils par un accroissement de sa salinité en 2013 éventuellement à cause de sa texture qui est assez argileuse ($61,5 \% \leq \text{Argile} \leq 66 \%$). Ceci rend difficile l'évacuation des sels solubles en dehors du profil pendant la période pluvieuse, et provoque leur accumulation dans la partie médiane ou à la base du profil. Quoi qu'il en soit, les quatre profils se sont comportés de façons différentes. Probablement à cause des conditions de la station (micro-relief, différence de profondeur de la nappe et occupation des sols) qui auraient eu une influence particulière.

Il est connu qu'une épaisse croûte de surface est un indice morphologique de dégradation du sol (Valentin et Janeau, 1990). Elle diminue l'infiltration des eaux en profondeur et augmente le ruissellement (Sweeney et al., 1988 ; Rapp et al., 2000, Douaoui, 2004 ; Saidi et al., 2004). Cette croûte de battance est très épaisse dans le profil 4 comparativement à celles des autres profils.

Tableau XXXV. Ecart et vitesses moyennes de salinisation des profils entre les saisons humides 2012 et 2013

Profils	CE moyenne du profil (dS/m) (saison humide 2012)	CE moyenne du profil (dS/m) (saison humide 2013)	Ecart de CE entre les deux saisons (dS/m)	Vitesse de salinisation (dS/m/mois)
Profil 1	40,83	40,38	-0,44	-0,037
Profil 2	55,61	37,46	-18,15	-1,51
Profil 3	36,38	28,32	-8,05	-0,67
Profil 4	25,86	33,27	7,42	0,62

4.3. Comparaison des profils salins entre les saisons sèches 2012 et 2013

- La figure 71 montre une différence de comportement des profils salins selon le profil considéré. En effet, la salinité a augmenté en surface (10,08 dS/m) et elle a diminué au niveau des autres horizons avec une moyenne de -43,7 dS/m dans le profil 1 pendant la saison sèche 2013 par rapport à la saison sèche 2012 (figure 71 et tableau X de l'annexe 2). La salinité a augmenté en surface (65,2 dS/m) (figure 71 et tableau XI de l'annexe 2) et en profondeur du profil 2 avec une moyenne de 25,55 dS/m et elle a diminué au niveau de sa partie médiane avec une moyenne de 58 dS/m (figure 71). Cependant, la salinité a diminué en surface (-49 dS/m) et en sub-surface (-28,3 dS/m) et elle a augmenté en profondeur (26,7 dS/m) dans le profil 3 pendant la saison sèche 2013 par rapport à la saison sèche 2012 (figure 71 et tableau XII de l'annexe 2). En fin, la salinité a augmenté en surface (4,73 dS/m) et en profondeur (23 dS/m), par contre elle a diminué dans la partie médiane (-102,2 dS/m) du profil 4 pendant la saison sèche 2013 par rapport à la saison sèche 2012 (figure 71 et tableau XIII de l'annexe 2).

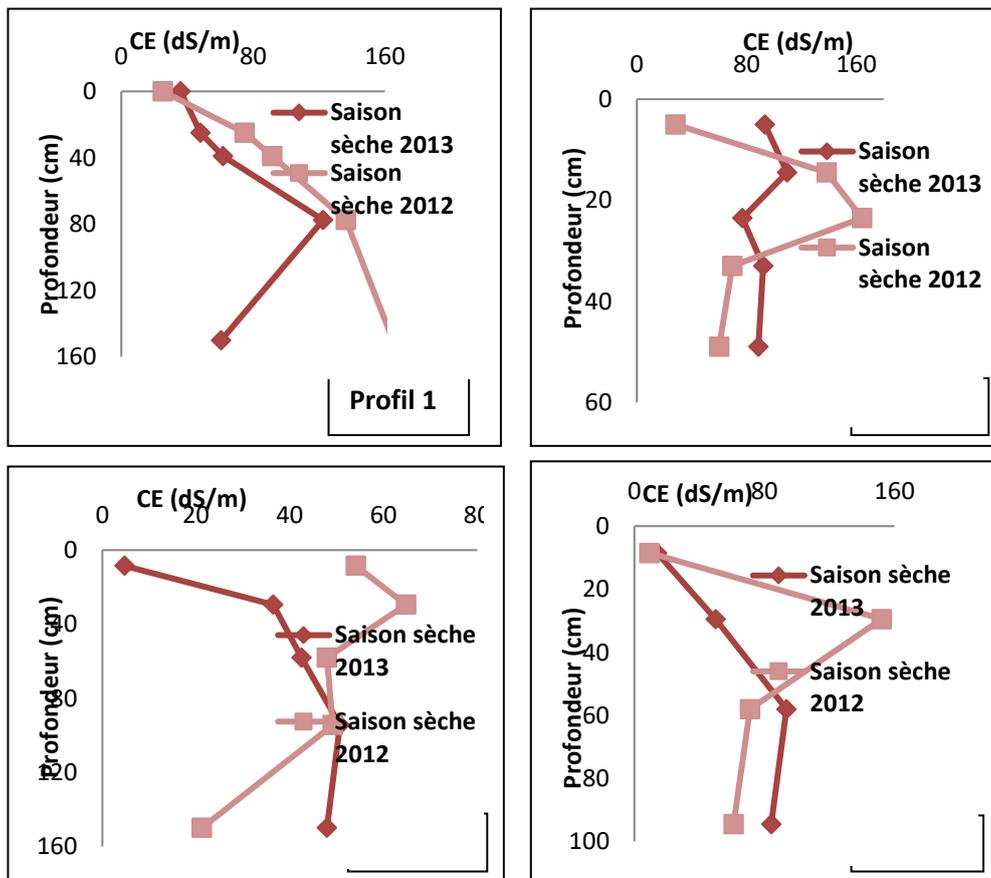


Figure 71. Profils salins des saisons sèches 2012 et 2013

Le tableau XXXVI révèle que les sols 1 et 4 ont subi une désalinisation moyenne de leurs profils entre la saison sèche 2012 et la saison sèche 2013. Cette désalinisation s'est produite à une vitesse moyenne comprise entre 0,57 et 0,48 dS/m par mois. Elle serait due au fait que le profil 1 et le profil 4 se localisent dans un endroit où la nappe salée (CE = 14 dS/m) est relativement profonde (3 à 4m). Par contre, pour la même période, les profils 2 et 3 ont enregistré une légère salinisation. Cette augmentation de la salinité s'est produite à une vitesse comprise entre 0,2 et 0,64 dS/m par mois à cause de la présence d'une nappe peu profonde (1,5m) et très salée. CE est de 60 dS/m pour la nappe du profil 2 et de 30 dS/m pour celle du profil 3.

Tableau XXXVI. Ecart et vitesses moyennes de salinisation des profils entre les saisons sèches 2012 et 2013

Profils	CE moyenne du profil (dS/m) (saison sèche 2012)	CE moyenne du profil (dS/m) (saison sèche 2013)	Ecart de CE entre les deux saisons (dS/m)	Vitesse de salinisation (dS/m/mois)
Profil 1	131,2	73,4	-57,77	-4,8
Profil 2	83,7	91,4	7,7	0,64
Profil 3	41,05	43,5	2,4	0,2
Profil 4	79,7	73,15	-6,5	-0,54

5. Discussion

Les résultats ont montré que tous les sols se sont salinisés lors de la saison sèche par rapport à la saison humide aussi bien en 2012 qu'en 2013. En effet, tous les profils sont marqués par une vitesse de salinisation de l'ordre de 0,66 à 13 dS/m/mois en 2012 et de 2,17 à 5,7 dS/m/mois en 2013. Cette salinisation serait due à la remontée capillaire, aux différents niveaux de salinité de la nappe et à la variation de sa profondeur. Le système de drainage étant défaillant, le climat très évaporant de cette région (ETP = 1500 mm/an) et la texture généralement argileuse constituent des facteurs qui favorisent la remontée des sels et leur accumulation dans le sol.

En 2012, la salinité est relativement plus importante en profondeur pour les profils 1 et 2 pendant la saison sèche par rapport à la saison humide. Ceci est dû à la présence d'une nappe peu profonde est très salée. Les profils 3 et 4 présentent une salinité relativement plus élevée dans la partie supérieure du profil. Ces deux derniers profils sont marqués par des taux d'argiles assez élevés (66 % > Argile > 47 %) en faveur d'une remontée capillaire, provoquant ainsi une salinisation.

En 2013, la concentration saline maximale est enregistrée pendant la saison sèche dans les horizons médians des profils 1, 3 et 4. Seul le profil 2 est marqué par un maximum de salinité dans la partie supérieure du sol. Ce dernier se situe dans les zones basses, dites « La Gaa » qui est décrite par Boulaine (1957) comme étant une dépression fermée, couverte par des formations récentes très argileuses. Il existe de petits cours d'eau qui constituent des artères permettant une circulation d'eau vers le centre de la dépression où les eaux stagnent pratiquement durant toute l'année provoquant ainsi une hydromorphie et une salinisation importantes des sols (Boulaine, 1957). Ceci explique la présence de nombreuses taches d'oxydoréduction dans l'ensemble des horizons de ce profil (Hadj Miloud, 2010). De ce fait, il existe un sens d'écoulement de l'eau qui se dirigerait vers le profil 2. Ce profil est caractérisé par une très forte salinité ($10,7 \text{ (dS/m)} < CE < 64,2 \text{ (dS/m)}$). Le fonctionnement salin de ce profil est régi par son fonctionnement hydrique.

L'évolution temporelle de la salinité entre la saison sèche de 2012 et celle de 2013 a mis en évidence deux situations :

- La salinité a diminué dans les profils 1 et 4 en 2013 par rapport à 2012 avec une vitesse de désalinisation comprise entre 0,48 et 0,57 dS/m/mois.
- La salinité a augmenté dans les profils 2 et 3 en 2013 par rapport à 2012 avec une vitesse de salinisation variant entre 0,2 et 0,64 dS/m et par mois.

Cette différence de comportement serait liée à leur texture, situation topographique, profondeur de la nappe, degré de salinité de la nappe et à l'état de surface du sol. En revanche, pendant les saisons sèches 2012 et 2013, le maximum de salinité dans le profil se situe dans la partie médiane des profils 1, 3 et 4 et dans la partie supérieure du profil 2. Cette différence du niveau de localisation maximal des sels serait due aux caractéristiques morphologiques spécifiques de différents horizons. L'accumulation des sels dans la partie médiane des profils 1, 3 et 4 serait due à une rupture du capillaire dans les parties les plus basses de ces profils par rapport au profil 2. Par ailleurs, Van Hoorn (1981) a montré que, dans certains cas des sols argileux, la remontée capillaire peut être réduite à cause des fissures qui se forment lors du dessèchement et qui provoquent une rupture du système capillaire.

L'évolution temporelle de la salinité entre la saison humide de 2012 et celle de 2013 a révélé également deux situations. Par rapport à 2012, la salinité des profils 1, 2 et 3 a diminué en 2013 avec une vitesse de désalinisation oscillant entre 0,037 et 0,67 dS/m par mois. Par contre, la

salinité dans le profil 4 a augmenté en 2013 avec une vitesse de salinisation de 0,62 dS/m et par mois. Par ailleurs, pendant la période humide de 2013, la dynamique des sels indique que le maximum de salinité se localise dans la partie médiane de tous les profils sauf le profil 2. Ceci serait dû à une lixiviation partielle des sels des horizons de surface pendant la période pluvieuse (Servant, 1975). Cependant, les résultats obtenus par Hadj Miloud (2010) ont montré que les horizons de profondeur des profils étudiés ont une perméabilité hydraulique lente à assez lente ($0,2 \leq \text{perméabilité (cm/h)} \leq 1,25$). Ceci rend difficile l'évacuation des sels au-delà de la partie médiane du profil. CE de ces horizons est très forte d'où une floculation des particules, mais à la moindre pluie, ces sols deviennent instables. La dilution de la solution du sol rend les forces de rétention du sodium plus importantes par rapport aux forces de répulsion (Sumner, 1993 ; Halliwell et al., 2001) qui provoque une dispersion des éléments texturaux qui détruit la porosité interstitielle (Amezketta et Aragues, 1995), et qui se manifeste par une obturation des pores et par conséquent le sol s'imperméabilise. D'après Halitim (1988), à partir d'un seuil de 10 % d'ESP, la perméabilité hydraulique chute rapidement. Il faut rappeler que les horizons médians sont tous sodiques ($23,75 \leq \text{ESP (\%)} \leq 47,37$) quelles que soient la saison et l'année considérée, ce qui explique leur médiocre stabilité structurale (Hadj Miloud, 2010). L'intensité de la lixiviation dépendrait des propriétés d'infiltration des sols et est contrôlée par une texture relativement fine et par une structure affectée par la sodicité. De même, le magnésium sous forme échangeable occupe jusqu'à 44,89 % (horizon Anz du profil 3) de la capacité d'échange cationique de ces sols. Ceci peut contribuer à la diminution de la perméabilité hydraulique de ces sols, et donc à une accumulation des sels dans leurs parties inférieures. En effet, les différents travaux ont montré que le magnésium provoque une dégradation des propriétés physiques des sols. Boulaine (1957) et Durand (1960) ont constaté qu'un taux élevé de magnésium échangeable en présence des chlorures (Saidi, 2004) dans les sols du Bas-Chélif engendre une dégradation structurale suivie d'une imperméabilisation. Les sols étudiés contiennent des teneurs non négligeables en magnésium sous forme soluble variant entre 4 % et 45 % de la somme des cations de la solution du sol. De même, les chlorures constituent l'anion prédominant dans la solution du sol pour l'ensemble des profils ($56 \% < \text{Cl}^- > 90 \%$). En fin, la défaillance du système de drainage empêche l'évacuation des sels solubles en dehors du profil, et provoque leur accumulation dans la partie médiane ou à la base du profil (Daoud, 1993 ; Valles et al., 1983).

La salinisation du profil 2 en 2013 serait liée à sa position topographique basse qui constitue un milieu d'accueil des sels solubles provenant d'autres endroits. Cette augmentation de la salinité

est parfois due à l'élévation du niveau piézométrique de la nappe qui est très salée (CE = 60 dS/m). La présence de taches d'oxydoréduction dans les horizons de profondeur constitue un trait morphologique et pédogénétique important de ces sols et témoigne de la présence d'une nappe à faible profondeur (Hadj Miloud, 2010).

D'une manière générale, la salinité a augmenté dans tous les profils pendant la saison sèche par rapport à la saison humide en 2012 et 2013. La salinité a diminué dans les profils 1 et 4 et elle a augmenté dans les profils 2 et 3 en saison sèche 2013 par rapport à la même saison de 2012.

Les différents profils salins révèlent une variation hétérogène de l'évolution de la salinité entre 2012 et 2013, au regard des gradients de salinisation au niveau des différents profils salins. L'observation de ce gradient de salinisation en saison humide de 2013 par rapport à 2012 révèle une salinisation relativement plus importante en profondeur pour tous les profils. Les profils 1, 3, et 4 sont affectés par une salinisation relativement plus importante dans leurs parties médianes en saison sèche 2013 comparativement à la même période en 2012. Seul le profil 2 présente une salinisation relativement plus importante au niveau de la partie supérieure du profil. Cette variation de la salinité est à mettre en relation avec les caractéristiques morphologiques spécifiques de chaque horizon (Daoud, 1993). D'une manière générale, les profils étudiés se caractérisent par une structure polyédrique moyenne à grossière dans l'horizon de surface qui devient rapidement prismatique grossière et massive vers la base (Hadj Miloud, 2010). Cette variation structurale influence directement les propriétés physiques et hydrodynamiques de ces sols et par conséquent elle conditionne la dynamique des sels dans le sol.

La variation saisonnière de la salinité des Solonchaks pourraient provoquer une variation taxonomique au cours des saisons. L'application de MFIS sur les Solonchaks de Rélizane a pour objectif d'étudier l'effet de ces variations saisonnières de la salinité sur la taxonomie des Solonchaks et de leur degré d'appartenance vis-à-vis des Calcisols et des Gypsisols.

6. Classification des profils par MFIS

Il s'agit de classer les quatre profils étudiés par MFIS. Ce système de classification a été appliqué aux sols étudiés en tenant compte de la modification saisonnière de certains de leurs critères diagnostiques établis par WRB. Ces critères diagnostiques ont été évalués à la fin des deux saisons humides et à la fin des deux saisons sèches des années 2012 et 2013 pour les références des Solonchaks, des Calcisols et des Gypsisols selon le concept WRB. La

détermination de Is, Ic et Ig de chaque profil pour chacune des quatre périodes de mesures permet d'évaluer dans quelle mesure l'horizon salique des quatre sols s'éloigne ou se rapproche du concept central des Solonchaks, des Calcisols et des Gypsisols en fonction de la saison considérée.

Les résultats du calcul de Is, Ic et Ig sont mentionnés dans le tableau XXXVII et leurs statistiques dans le tableau XXXVIII.

XXXVII. Résultats obtenus par MFIS

Années	Saisons	Profils	(Is)	(Ic)	(Ig)
2012	Saison humide	P1	0,43	0,25	0,17
		P2	0,50	0,20	0,15
		P3	0,43	0,21	0,17
		P4	0,27	0,18	0,15
	Saison sèche	P1	0,83	0,21	0,15
		P2	0,78	0,20	0,15
		P3	0,49	0,18	0,15
		P4	0,80	0,18	0,16
2013	Saison humide	P1	0,47	0,21	0,16
		P2	0,44	0,23	0,17
		P3	0,29	0,18	0,15
		P4	0,39	0,20	0,17
	Saison sèche	P1	0,51	0,21	0,15
		P2	0,78	0,20	0,15
		P3	0,49	0,18	0,15
		P4	0,52	0,20	0,17

XXXVIII. Paramètres statistiques des indices des trois sols références

Paramètres	Is	Ic	Ig
Maximum	0,83	0,25	0,17
Minimum	0,27	0,18	0,15
Ecart-type	0,18	0,02	0,009
Moyenne	0,53	0,2	0,16
C.V (%)	33	9	6

Les tableaux XXXVII et XXXVIII révèlent que les valeurs des indices des trois sols références sont variables d'un sol à l'autre. Les variations des valeurs des Ig (C.V = 6 %) et des Ic (C.V = 9 %) à travers les saisons sont faibles. Ce constat suggère que les valeurs de Ig et Ic sont relativement stables dans le temps et par conséquence, les critères diagnostiques des Calcisols et des Gypsisols paraissent peu affectés par l'impact des modifications saisonnières sur les

caractéristiques des sols. Par contre, la variation des Is est relativement élevée en regard de leur coefficient de variation (C.V = 33 %). De ce fait, ce résultat signifie que les critères diagnostiques relatifs aux Solonchaks sont relativement impactés par les caractéristiques climatiques saisonnières.

Le test de Kruskal-Wallis (tableau XXXIX) qui permet la comparaison des trois indices simultanément révèle que les différences entre les indices des trois sols étudiés sont statistiquement significatives. Le χ^2 observé (40,58) est nettement supérieur au χ^2 critique (5,99) à un ddl de 2 au seuil de probabilité de 5 %. De ce fait, nous concluons que, quelles que soient la saison et l'année considérées, les indices obtenus par MFIS représentent des sols différents.

Tableau XXXIX. Résultats du test statistique de Kruskal-Wallis

Paramètres	Valeurs
χ^2 observé	40,48
χ^2 critique	5,99
p-value (bilatérale)	< 0,0001
ddl	2
probabilité	0,05

6.1. Classification saisonnière des profils

La classification saisonnière des profils est illustrée par la figure 72 qui révèle les faits suivants :

- Quel que soit l'année ou la saison considérée, Is est toujours nettement plus fort que Ic et Ig. Cependant, la variation des indices montre que les valeurs de Is sont plus élevés pendant les saisons sèches par rapport aux saisons humides. Les valeurs maximales de Is sont de 0,83 pour la saison sèche de 2012 et de 0,78 pour celle de 2013. En revanche, sa valeur maximale pour la saison humide de 2012 est de 0,5 et celle de 2013 est de 0,47. Ce résultat s'explique par le fait que Is varie en fonction de CE, de l'épaisseur de l'horizon diagnostique et du produit de ces deux paramètres. Ces derniers sont plus élevés pendant la saison sèche d'où un accroissement de Is durant cette période.
- Ic varie faiblement au cours des différentes saisons de 2012 et 2013. Les valeurs maximales de cet indice sont de 0,25 pour la saison humide de 2012 et de 0,23 pour celle de 2013. Concernant les saisons sèches de 2012 et 2013, la valeur maximale de Ic est de 0,21. Cette faible variation de Ic dans le temps est due au fait que les critères inhérents au calcul de Ic par MFIS ne varie pas.

- I_g varie très faiblement au cours des saisons de 2012 et 2013. La valeur maximale de cet indice est de 0,17 pour les deux saisons humides de 2012 et 2013. Cependant, la valeur maximale de I_g est de 0,16 pour la saison sèche de 2012 et de 0,17 pour celle de 2013. Toutefois, nous pouvons conclure que I_g ne varie pas au cours des saisons. Ceci est due au fait que les critères sur lesquelles se base MFIS pour le calcul de I_g , ne varient pas dans le temps.

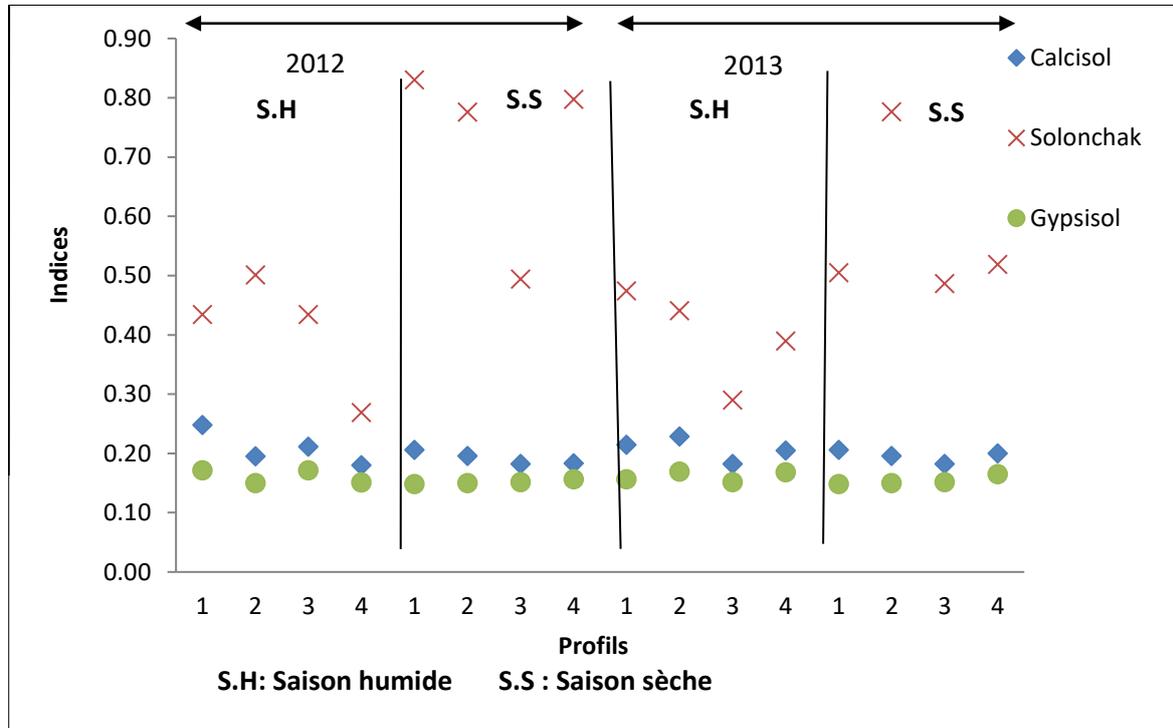


Figure 72. Classification des profils par MFIS

Les résultats obtenus montrent que MFIS est en faveur des Solonchaks ($0,27 < I_s < 0,83$). Nous pouvons dire également que les Solonchaks étudiés ont un degré d'appartenance relativement plus élevé avec les Calcisols qu'avec les Gypsisols ($0,27 < I_s < 0,83$; $0,18 < I_c < 0,25$; $0,15 < I_g < 0,17$). Ce degré d'appartenance des Solonchaks avec les Calcisols est plus important pendant les saisons humides ($0,27 < I_s < 0,50$; $0,18 < I_c < 0,25$; $0,15 < I_g < 0,17$) (figure 72). Ceci est dû à la diminution de la salinité pendant la saison humide, et par conséquent le sol a tendance à se rapprocher beaucoup plus aux Calcisols. Au cours de la saison humide de 2012, le profil 4 ($I_s = 0,27$) avait un degré d'appartenance plus élevé avec les Calcisols qu'avec les Gypsisols ($I_c = 0,18$; $I_g = 0,15$) comparativement aux autres profils (figure 72). De même, le profil 3 présente un degré d'appartenance plus élevé avec les Calcisols pendant la saison humide de 2013 ($I_s = 0,29$; $I_c = 0,18$; $I_g = 0,15$) (figure 72). Ce résultat s'explique par le fait que les profils 3 et 4 sont les moins salés par rapport aux

autres. Quoi qu'il en soit, le degré d'appartenance des Solonchaks vis-à-vis des Gypsisols demeure faible ($I_g < 0,17$) quelles que soient la saison et l'année considérées.

Toutefois, cette expérimentation a été réalisée sur des Solonchaks très salés. De ce fait, une petite ou grande modification de CE n'affecte pas la taxonomie. De même, ces sols sont très peu pourvus en gypse et en calcaire, et que la variation temporelle de ces deux paramètres n'a pas été prise en considération. Par conséquent, sur le plan taxonomique, ces sols se rapproche ou s'éloignent des Solonchaks uniquement en fonction de CE. Ainsi, quelle que soit la saison considérée les indices sont toujours dans l'ordre $I_s > I_c > I_g$.

Conclusion

Les profils étudiés présentent des niveaux très élevés de salinité et de sodicité. L'évaluation de la salinité des sols en 2012 et 2013 durant deux saisons différentes a révélé que ce paramètre évolue différemment d'un profil à un autre entre les saisons humides et les saisons sèches des deux années. Les sols sont plus salés en été qu'en hiver, ce qui est conforme avec la bibliographie national et international.

Les relations statistiques confirment la forte liaison de CE au Na^+ et Cl^- de la solution du sol. De même, l'ESP est fortement liée à la salinité et au SAR.

La classification des sols par MFIS est en faveur des Solonchaks. Cette classification a montré également que ces Solonchaks ont un degré d'appartenance relativement plus élevé avec les Calcisols qu'avec les Gypsisols, surtout lors de la saison humide.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le premier objectif de cette recherche consiste en l'utilisation d'un système expert basé sur le système d'inférence floue de Mamdani (MFIS) pour déterminer le degré d'appartenance des Solonchaks aux Calcisols et aux Gypsisols classés selon le système WRB. L'expérimentation a été menée d'abord sur 194 Solonchaks répartis sur l'ensemble du nord de l'Algérie et, ensuite, sur 4 Solonchaks situés dans les plaines de Rélizane. Le deuxième objectif consiste à étudier l'évolution saisonnière de la salinité des Solonchaks dans la région de Rélizane. Ceci a pour but de cerner une éventuelle variation taxonomique saisonnière des Solonchaks de la région en question. Cette recherche a été réalisée sur une période de deux années et en quatre campagnes (deux saisons humides et deux saisons sèches). Il s'agit également d'étudier une éventuelle variation taxonomique des Solonchaks au cours de différentes saisons, par l'utilisation de MFIS.

MFIS a mis en évidence que les 194 Solonchaks (WRB) étudiés sont constitués de 61,9 % de Solonchaks, 36,6 % de sols intergrades et de 1,5 % de sols répartis entre Calcisols et Gypsisols. Les sols intergrades se subdivisent en trois groupes, le groupe des Solonchak-Calcisol (29,9 %) qui est le plus dominant, le groupe des Solonchak-Gypsisol (5,2 %), et le groupe des Solonchak-Calcisol-Gypsisol (< 2 %) qui est le moins représenté. Ces résultats démontrent clairement la précision de MFIS dans la mesure où il nous permet la quantification des sols intergrades. MFIS permet de compenser l'incertitude par un calcul du degré d'appartenance, et ceci n'est pas sans effet sur la cartographie des sols. Cette méthode est potentiellement intéressante pour examiner la variabilité des sols dans des paysages complexes. En outre, MFIS est une classification continue et numérique, elle serait mieux adaptée au continuum écologique. La quantification de la classification des sols par MFIS facilite l'intégration des classes de sols aux technologies d'agriculture de précision.

Les résultats ont révélé que toutes les relations entre I_s , I_c et I_g pris séparément et chaque critère diagnostique de WRB sont statistiquement significatives ($0,49 < r < 0,77$; $P < 0,05$) sauf pour l'épaisseur de l'horizon diagnostique (E) ($0,01 < r < 0,06$; $P > 0,05$). Les corrélations entre I_s , I_c et I_g pris deux à deux sont également significatives ($0,32 < r < 0,7$; $P < 0,05$). De ce fait, ces corrélations peuvent être exploitées pour l'établissement des fonctions de pédotransfert, ce qui permet la prédiction des indices obtenus par MFIS. Concernant l'étude de l'évolution saisonnière de la salinité des Solonchaks de Rélizane, les principaux résultats obtenus montrent que les quatre profils étudiés sont surtout marqués par

de très fortes salinités pendant la période humide ($6,55 \text{ dS/m} < \text{CE} < 64,1 \text{ dS/m}$) et la période sèche ($9,24 \text{ dS/m} < \text{CE} < 164,8 \text{ dS/m}$). La sodicité est également élevée pour les périodes humide ($9,5 \% < \text{ESP} < 39 \%$) et sèche ($15,56 \% < \text{ESP} < 47,37 \%$). Le faciès chimique chloruré-sodique est largement dominant.

Concernant la variation de la salinité entre la saison humide et la saison sèche de 2012 et celle de 2013 les résultats ont révélé que CE a augmenté pendant la période sèche pour l'ensemble des profils. Cette salinisation se produit à une vitesse comprise entre 0,66 et 13 dS/m par mois pour l'année 2012, et une vitesse qui varie entre 2,17 et 5,7dS/m par mois pour celle de 2013. Seul le profil 3 a subi une légère désalinisation dans l'horizon de surface (-2,48 dS/m).

Par ailleurs, l'évolution de la salinité entre la saison humide 2012 et celle de 2013 montre que les profils 1, 2 et 3 se désalinisent à une vitesse moyenne comprise entre -0,037 et -0,67dS/m par mois. Par contre, le profil 4 accuse une salinisation pendant cette période à une vitesse moyenne de 0,62 dS/m par mois, à cause de sa texture qui est très argileuse ($61,5 \% \leq \text{Argile} \leq 66 \%$).

En revanche, l'évolution de la salinité entre la saison sèche 2012 et la saison sèche 2013 révèlent une différence de comportement des profils salins selon le profil considéré. En effet, les profils 1 et 4 ont subi une désalinisation pendant cette période. Elle se produit à une vitesse moyenne comprise entre -0,48 et -0,57 dS/m par mois. Par contre, les profils 2 et 3 ont enregistré une légère salinisation, avec une vitesse moyenne comprise entre 0,2 et 0,64 dS/m par mois.

D'une façon générale, la composition granulométrique, la situation topographique, la profondeur de la nappe, le degré de salinité de la nappe, l'état de surface du sol et les caractéristiques morphologiques spécifiques de chaque horizon jouent un rôle prépondérant dans la différence de comportement des profils étudiés.

Sur le plan taxonomique, l'application de MFIS sur les quatre profils a révélé que les indices de Solonchaks sont toujours nettement plus élevés que ceux des Calcisols et des Gypsisols ($0,27 < \text{Is} < 0,83$). En revanche, les indices des Calcisols ($0,18 < \text{Ic} < 0,25$) et des Gypsisols ($0,15 < \text{Ig} < 0,17$) varient faiblement au cours des différentes saisons de 2012 et 2013. Par ailleurs, les résultats obtenus montrent que MFIS est en faveur des Solonchaks. Ces derniers ont un degré d'appartenance relativement plus élevé avec les Calcisols qu'avec les Gypsisols.

En conclusion, les résultats obtenus par cette recherche ont montré que la classification des sols par MFIS permet un niveau de perception assez précis comparativement à la classification conventionnelle, surtout pour la détermination des sols intergrades par des valeurs numériques.

En perspective de ce travail, l'association de la logique floue à d'autres méthodes de l'intelligence artificielle, telle que le réseau de neurones artificielles (neuro-floue) pourrait aboutir à des résultats plus précis dans le cadre d'une agriculture de précision.

Il serait intéressant de poursuivre cette recherche par l'application de MFIS à un panel de sols différents pour quantifier la pureté des classes et leurs intergrades.

Références Bibliographiques

Liste bibliographique

- ABRAHAM A., ABDUSSELAM A., ASHRAF A., 2015.** Fuzzy logic-based attenuation relationships of strong motion earthquake records. *Expert Systems with Applications*, 42, 1287–1297.
- A.G.I.D., 2003.** Situation actuelle des grands périmètres irrigués et perspectives. 25 p.
- AIT MECHEDAL M., 2014.** Évolution temporelle de la salinité des sols du bas cheliff. Magister, ENSA, Alger, 74p.
- AMBARISH G., MOHAPATRA S., KUMAR L., 2016.** Neural Network Pattern Classification and Weather Dependent Fuzzy Logic Model for Irrigation Control in WSN Based Precision Agriculture. *Procedia Computer Science*, 78, 499 – 506.
- AHUMADA A., ALTUNKAYNAK A., ASHRAF A., 2015.** Fuzzy logic based attenuation relationships of strong motion earthquake records. *Expert Systeme with Applications*, 42, 1287–1297.
- ALLAKHVERDIEV S., ATSUSHI S., YOSHITAKA N., MASAMI I., 2000.** Ionic and Osmotic Effects of NaCl-Induced Inactivation of Photosystems I and II in *Synechococcus* s. *Plant physiologie*, 123, 1047–1056.
- AMEZKETA E., ARAGUES R., 1995.** Hydraulic conductivity, dispersion and osmotic explosion in arid- zone soils leached with electrolyte solutions. *Soil Science*, 159, 287-295.
- AUBERT G., 1975.** Les sols sodiques en Afrique du nord. *Annales de l’I.N.A. Alger*, N° 6, pp. 185-195
- BAIZE D., GIRARD M.C., 1995.** Référentiel pédologique. INRA, 220 p.
- BAIZE D., GIRARD M.C., 2008.** Référentiel pédologique. INRA, 405 p.
- BHARGAVI P., 2010.** Soil Classification by Generating Fuzzy rules. *International Journal on Computer Science and Engineering*, 2, 8, 2571-2576.
- BOULAIN J., 1956.** Carte des sols des plaines du Chélif. Thèse d’état de l’Université d’Alger, 582p.
- BOULAIN J., 1957.** Etude des sols des Plaines du Chélif. Thèse d’Etat de l’Université d’Alger, 582p.
- BOT A., NACHTERGAELE, F., YOUNG, A. 2000.** Land resource potential and constraints at regional and country levels. *World Soil Resources Report N° 90*. Rome : FAO of UN.
- CARRÉ F., JACOBSON M., 2009.** Numerical classification of soil profile data using distance metrics, *Geoderma*, 148, 336–345.
- CHABANE S., BENREDA Z., 1997.** Inventaire des sols salés d’Algérie ANRH pédologie, 22p.
- CHEVERRY C., 1974.** Contribution à l’étude pédologique des polders du lac Tchad. Dynamique des sels en milieu continental subaride. Dans des sédiments argileux et organiques. Thèse Doctorat, Université Louis Pasteur Strasbourg, 175 p.
- COMMONWEALTH SCIENTIFIC AND INDUSTRIAL RESEARCH ORGANISATION. 2015.** Australian classification system. Available online at:http://www.clw.csiro.au/aclep/asc_re_on_line/soilhome.htm, accessed on August, 2015.

- C.P.C.S., 1967.** Classifications des sols. Lab Geol.-Pedol., E.N.S.A., Paris-Grignon, 87 p.
- COUTINET S., 1965.** Méthode d'analyses utilisables pour les sols salés, calcaires et gypseux. *Agronomie tropicale*, 12, pp. 1242-1253.
- DAOUD Y., 1983.** Contribution à l'étude de la dynamique des sels dans un sol irrigué du périmètre de Haut Cheliff (Algérie). Thèse doc. ING., RENNE, 194 p.
- DAOUD Y., CHEVERRY C., ROBERT M., 1993.** Rôle physico-chimique du magnésium dans les sols sales des plaines du Cheliff (Algérie). *Soil Science*, 31, 4, pp. 151 – 160.
- DAOUD Y., 1993.** Contribution à l'étude des sols des plaines du Chélif. Le phénomène de salinisation, conséquences sur les propriétés physiques des sols argileux. Thèse Doct. d'Etat. INA Alger, 233p.
- DAOUD Y., HALITIM A., 1994.** Irrigation et salinisation au Sahara algérien. *Sècheresse*, 31, 4, 281-299.
- DEMIREL T., CEREN ÖNER S., TÜZÜN S., DEVECI M., 2018.** Choquet integral-based hesitant fuzzy decision-making to prevent soil erosion. *Geoderma*, 313, 276-289.
- DERDOUR H., 1981.** Contribution à l'étude de l'influence du sodium échangeable sur le comportement des sols aux compactages, Thèse Magister INA, Alger, 46 p.
- DJAMAI R., 2007.** Contribution à l'étude de salinité des sols et des eaux du système endoréique lac Fetzara (nord-est Algérien) approche géochimique et évolution spatio-temporelle des phénomènes. Thèse de Doctorat, INA, Alger, 177 p.
- DJILI K., DAOUD Y., AYACHE N., 1999.** Analyse de la distribution du calcaire dans les sols de l'Algérie septentrionale. *Etude et Gestion des Sols*, 6, 201-213.
- DJILI K., 2000.** Contribution a la connaissance des sols du Nord de l'Algérie : Création d'une banque de données informatises et l'utilisation d'un système d'information géographique pour la spatialisation et la vectorisations des données pédologique. Thèse doc. INA. Alger. 384 p.
- DOUAOUI A., 2004.** Infiltrabilité et érodibilité des sols salinisé de la plaine du Bas Chélif (Algérie). Mesures au laboratoire sous simulateur de pluie. *EGS*, 11, 379-392.
- DOUAOUI A., 2005.** Variabilité spaciale de la salinité et relation avec certain caractéristiques des sols de la plain du bas Chélif approche de la géostatistique et de la télédétection. Thèse de doctorat d'état en agronomie, INA, Alger. 255 p.
- DROUBI A., 1976.** Géochimie des sels et des solutions concentrées par évaporationModèle thermodynamique de simulation - Application aux sols salés du Tchad. *Mémoire des Sciences Géologiques*, 46, 177 p.
- DROUBI A., FRITZ B., GAC J.Y., TARDY Y., 1980.** Generalized residual alkalinityconcept: application to prediction of the chemical evolution of natural waters by evaporation. *Américan Journal of Science*, 280, 560-572.
- DUBOIS D., PRADE, H. 1980.** Fuzzy Sets and Systems: Theory and Application, Academic, Sand Diego.
- DUCHAUFOR P., 1998.** Réflexions sur les classifications des sols. *Etude et Gestion des Sols*, 5, 201–205.
- DUPUIS M., 1969.** Dosage des carbonates dans les fractions granulométriques de quelques sols calcaires et dolomitiques, *Ann. Agron.*, 20, 61-88, Paris.

- DURAND J.H., 1954.** Les sols d'Algérie (Pédologie n° 2). Dir Hyd. Alger., 244p.
- DURAND J.H., 1956.** Les sols de la station d'étude des sols salins de Hamadenas. Quelques aspects de la station d'étude des sols salins des Hamadenas et de ses activités. Terre et eaux. 28, 2-17.
- DURAND J.H., 1960.** Contribution à l'étude des sols irrigués. L'évolution des sols sous l'influence de l'irrigation. Travaux des sections pédologie et agrologie, bulletin n°6, 13 p.
- DURAND J.H., 1963.** Les croûtes calcaires et gypseuses en Algérie : formation et âge. Bull. Soc. Géol. France, 7, 959-968.
- DURAND J.H., 1983.** Les sols irrigables (Etude pédologique). Presses Universitaires de France. Paris. 322p.
- EKKEHARD H., WARNER D., 1999.** Algebraic operations on a class of Mamdani-controllers. Fuzzy Sets and Systems, 101, 253-259.
- ELAALEM M., 2013.** A Comparison of parametric and fuzzy multi-criteria methods for evaluating land suitability for Olive in Jeffara Plain of Libya. Procedia, 5, 405-409.
- ESFANDIARPOUR I., SALEHI M., H., KARIMI A., 2013.** Correlation between Soil Taxonomy and World Reference Base for Soil Resources in classifying calcareous soils: (a case study of arid and semi-arid regions of Iran). Geoderma, 197-198, pp. 126-136.
- FAJARDO M., MCBRATNEY A., WHELAN B. 2015.** Fuzzy clustering of Vis-NIR spectra for the objective recognition of soil morphological horizons in soil profiles. Geoderma, 263, 244-253.
- FAO, 1990.** Management of gypsiferous soils. F.A.O., Bull. N° 62 Rom. 81 p.
- FAO, 2002.** Capacity building for drainage in north Africa. Doc. FAO., Rome, 21 p.
- FAO, 2017a.** Les Systèmes Numériques [en ligne]. Disponible : www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-classification/numerical-systems/en/.
- FAO, 2017b.** Système universel de classification des sols [en ligne]. Disponible : www.fao.org/soils-portal/etude-des-sols/classification-des-sols/classification.
- FERDINAND 2016.** Les limites de la logique floue [en ligne]. Disponible : www.ferdinandpiette.com/blog/2011/08/la-logique-floue-interets-et-limites/.
- FRANZEN D., 2005.** Managing Daline Soils in Nord Dakota [en ligne]. Disponible : www.ext.nodak.edu.
- GACEM F., 2015.** Etude spatiale et temporelle de la salinité dans les sols de la plaine de mina (Relizane). Thèse de Magister. Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem, 158 p.
- GODJEVAC J., 1999.** Idées nettes sur la logique floue. Presse polytechnique universitaire Romande. Suisse.
- GOKCEOGLU C.A., 2002.** Fuzzy triangular chart to predict the uniaxial compressive strength of the Ankara agglomerates from their petrographic composition. Eng Geol, 66(1-2):39-51.

- GUOLIANG OU., SHUKUI TAN., MIN ZHOU., SHASHA LU., GANG WU., 2017.** An interval chance-constrained fuzzy modeling approach for supporting land-use planning and eco-environment planning at a watershed level. *Journal of Environmental Management*, 204, 651-666.
- HADDAJ D., 1970.** Influence des méthodes culturales sur la dégradation structurale des sols du périmètre irrigué du haut Chélif. Mémoire d'ingénieur, INA, 86p.
- HADJ MILOUD S., 2010.** Morphologie et propriétés des Solonchaks références de la mina, Ecole Doctorale : Science du sol, ENSA, 120 p.
- HALITIM A., 1973.** Etude expérimentale de l'amélioration des sols sodiques d'Algérie en vue de leur mise en valeur. Thèse doc 3^{ème} cycl, Université de Renne, 170 p.
- HALITIM A., 1985.** Contribution à l'étude des sols arides (Hautes plaines steppiques de l'Algérie). Morphologie, distribution et rôle des sels dans la genèse et le comportement des sols. Thèse Université de Renne. 384 p.
- HALITIM A., ROBERT M., 1987.** Interactions du gypse avec les autres constituants du sol. Analyse microscopique de sols gypseux en zone aride (Algérie) et études expérimentales. Ed. A.F.E.S. France, pp. 179-186.
- HALITIM A., 1988.** Sols des régions arides d'Algérie. Edition O.P.U., Alger, 384 p.
- HALLIWELL D.J., BARLOW M., NASH D. M., 2001.** A review of the effect of wastewater sodium on soil physical properties and their implication of irrigation systems. *Aust. J. of Soil Res.*, 1259-1267.
- HAMDI-AISSA B., 2001.** Le fonctionnement actuel et passé des sols du Nord Sahara (cuvette de Ouargla). Approche micromorphologique, géochimique et minéralogique et organisation spatiale. Thèse Doc. INA Paris-Grignon, 310 p.
- HAMDI-AISSA B., VALLES V., AVANTURIER A., RIBOZI O., 2004.** Soils and brine geochemistry and mineralogy of hyperarid desert playa, Ouargla basin, Algerian sahara. *Arid land Research and Rehabilitation*, 18, 103-126.
- HARTEMINK A. E., KRASILNIKOV P., BOCKHEIM G., 2013.** Soil maps of the world. *Geoderma*, 207, 256–267.
- HARTEMINK A. E., 2015.** The use of soil classification in journal papers between 1975 and 2014. *Geoderma Regional*, 5, 127–139,
- HEIL J., HARING V., BERAND M., STUMPE B., 2019.** Advantages of fuzzy k-means over k-means clustering in the classification of diffuse reflectance soil spectra: A case study with West African soils. *Geoderma* 337, 11-21.
- HUGHES P., MCBRATNEY A., MINASNY B. 2014.** Members end points and extragrades in numerical soil classification. *Geoderma*, 226-227, 365–375.
- HUGHES PH., MCBRATNEY A., HUANG J., MINASNY B., 2017.** Creating a novel comprehensive soil classification system by sequentially adding taxa from existing systems. *Geoderma Regional*, 11, 123-140.
- INSID., 2006.** La salinité des terres agricoles dans le périmètre de la Mina approche méthodologique et premiers resultants. Alger. 66 p.
- IUSS WORKING GROUP WRB, 2006.** World Reference Base for Soil Resources, 2nd Edition. World Soil Resources Reports 13. FAO, Rome.

IUSS WORKING GROUP WRB, 2014. World reference base for soil resources. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome.

JAMAGNE M. 1999. Compte rendu succinct des travaux. 16^{ème} Congrès Mondial de la Science du Sol, Montpellier, 20 au 26 Août 1998. France. Etude et Gestion des Sols, 6, 1.

JANG, J.S., ANFIS, R. 1993. Adaptive-network-based fuzzy inference systems. IEEE Trans. Syst. Man and Cybern, 23, 665–685.

JING-CHENG H., GUO-HE H., HUA Z., ZHONG L., 2013. Optimal Land Use Management for Soil Erosion Control by Using an Interval-Parameter Fuzzy Two-Stage Stochastic Programming Approach. Environmental Management 52, 621–638.

JONES A., MONTANARELLA L., JONES R., 2005. Soil Atlas of Europe, Joint Research Centre, Ispra, Italy.

KAUFMAN A., GUPTA M., 1991. Fuzzy Mathematical Models in Engineering and Management Science. North-Holland. Amsterdam, 356pp.

KAUFMANN M., TOBIAS S., SCHULIN R., 2009. Quality evaluation of restored soils with a fuzzy logic expert system. Geoderma 151, 290–302.

KAUFMANN M., MEIER A., STOFFEL K., 2015. IFC-Filter: Membership function generation for inductive fuzzy classification. Expert Systems with Applications xxx.

KLIR G., FOLGER T., 1988. Fuzzy Sets, Uncertainty and Information. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

LARSEN P.M., 1980. Industrial application of fuzzy logic. International Journal of Man Machine Studies, 12, 3-10.

LEGROS J.P., 2006. Mapping of the Soil. Enfield: Science Publishers, 411 p.,

LEGROS J.P., 2007. Les grands sols du Monde. Presses polytechniques et universitaires romandes, 574 p.

LIBOHOVA Z., 2010. Terrain attribute soil mapping for predictive continuous soil property maps. Ph.D. Thesis. West Lafayette: Purdue University, 122 p.

LILIANA P., 2002. Characterization of naturally fractured reservoirs from conventional well logs. Master of science. University of Oklahoma. Oklahoma. 156 p.

LTIFI W., 2008. Bilan d'eau et des sels dans les périmètres irrigués Kalaat l'Andalous, laboratoire du centre de gestion du ressource en eau, (CGRE) de L'INAT, Mastère, Tunisie, 120 p.

MAMDANI, E.H., 1975. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy controller. Int J Man Mach Stud, 7, 1–13.

MAMDANI E.H., 1977. Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis. IEEE Transactions on Computers, 26, 1182–1191.

M.A.P. (Ministère de l'Agriculture et de la Pêche), 1998. La salinité des terres agricoles: situation et problématique, 30 p.

MARLET S., JOB J.O., 2006. Processus et gestion de la salinité des sols. In : Tiercelin, J.R. Traité d'irrigation, seconde édition. Tec. et Doc. Lavoisier, 797 – 822.

- MASMOUDI A., 2003.** Irrigation et salinisation dans certains oasis de la wilaya de Biskra. Séminaire sur la préservation des oasis. Université de Ouargla.
- MATHIEU L., THOREZ J., EK C., 1976.** Place et signification des croûtes et encroûtements calcaires dans les profils de sols et dans les paysages d'Afrique du nord-ouest. Ann. De l'I.N.A. El Harrach, VI, 1, 81- 138.
- MAZAHERI S.A., MCBRATNEY A.B., KOPPI A.J., 1997.** Sensitivity of memberships to 450 attribute variation around selected centroids and intergrades in the continuous Australian Great Soil Groups classification system. Geoderma, 77, 155–168.
- MCBRATNEY A.B., DEGRUIJTER J., 1992.** A continuum approach to soil 447 classification 448 by modified fuzzy k-means with extragrades. Journal of Soil Science 43, 159–175.
- MCBRATNEY A., ODEH I.A., 1997.** Application of fuzzy sets in soil science: fuzzy logic, fuzzy measurements and fuzzy decisions. Geoderma, 77, 85–113.
- MCBRATNEY A., M INASNY B., STEPHEN R., CATTLE R., WILLEM VERVOORT R., 2002.** From pedotransfer functions to soil inference systems. Geoderma, 109, 41-73.
- MCBRATNEY A.B., MENDON M.L., SANTOS B., MINASNY B. 2003.** On digital soil mapping. Geoderma, 117, 3–52.
- MCDONALD, BNEDER, 1990.** Etude de l'avant projet détaillé des extensions de Guerouaou et de Sebkah Benziane et du réaménagement du Bas chécliff.
- MCKAY J., 2010.** Evaluation of the transferability of knowledge-based soil-landscape model. In: BOETTINGER, J.L (eds.). Digital soil mapping: bridging research, environmental application, and operation. London: Springer, 165-177.
- MENEZES M., GODINHO SILVA H., RAY OWENS PH., CUIT N., 2013.** Digital soil mapping approach based on fuzzy logic and field expert knowledge. Agro-technologie, 37, 287 – 298.
- METTERNICHT I., 1998.** Fuzzy classification of JERS-1 SAR data: an evaluation of its performance for soil salinity mapping. Ecological Modelling, 111, 61–74.
- MICHELI E., VINCE L.V., PHILLIP R., OWENS B., MCBRATNEY A., HEMPEL J., 2016.** Testing the 443 pedometric evaluation of taxonomic units on soil taxonomy. Geoderma, 264, 340–349.
- MINASNY B., MCBRATNEY, A. 2006.** A conditioned Latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information. Computers and Géosciences, Oxford, 32, 1378–1388.
- MOJIRI A., JALALIAN A., HONARJOO N., 2011.** Comparison between keys to soil taxonomy and WRB to classification of soils in Segzi plain, Iran. Journal Applied Science, 3, 579–583.
- MOKEDDEM D., 2010.** Contrôle Flou des Processus Biotechnologiques à Base d'Algorithmes Génétiques. Thèse Doc. Université Ferhat Abbes. Sétif. 145 p.
- MOUHOUCHE B., BOULASSEL M., 1999.** Contribution à une meilleure maîtrise des pertes en eau d'irrigation et de la salinisation des sols en zones arides. Séminaire sur la salinisation des terres agricoles en Algérie. Chlef. 12 –131.

MOORE A.W., RUSSELL J.S., WARD W.T., 1972. Numerical analysis of soils: a comparison of three soil profile models with field classification. *Journal of Soil Science*, 23, 193–209.

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

NEGOITA C., 1985. Expert Systems and Fuzzy Systems. Benjamin Cummings, 465 Redwood City, CA. pesticide in an unsaturated layered soil profile using fuzzy set theory. *Applied Mathematical Modelling*, 33, 770–782.

OSTOVARI Y., ASGARI K., CORNELIS W., BEIGI-HARCHEGANI H., 2015. Simple methods for estimating field capacity using Mamdani inference system and regression -tree. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 61, 54-69.

OZGER M., 2009. Comparison of fuzzy inference systems for stream flow prediction. *Hydraulic Science Journal*, 54, 261–273.

OUARDI J., 2006. Dégradation des sols et de la nappe des périmètres irrigués du Tadla marocain par salinisation et sodisation. Thèse Doctorat., Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc ; 155 p.

POUGET M., 1968. Contribution à l'étude des côûtes et encroûtement gypseux de nappe dans le sud Tunisien. *Cahier ORSTOM Série pédologie*, 3-4, 309-365.

QI F. 2006., Fuzzy soil mapping based on prototype category theory. *Geoderma*, 136, 774–787.

QUINN T.; ZHU A.X., BURT J.E., 2005. Effects of detailed soil spatial information on watershed modeling across different model scales. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Amsterdam, 7, 324–338.

RAHMOUNI A., 2010. Morphologie et propriétés des Gypsisols références du Hodna. Ecole Doctorale : Science du sol, ENSA, Alger, 141 p.

RAJAPRAKASH S., JAICHANDRAN R., PONNUSAMY R., 2017. Fuzzy Logic Controller for Effective Irrigation Based on Field Soil Moisture and Availability of Water. *Journal of Adv Research in Dynamical & Control Systems*. 9, 213-235.

RAPP I., SCAINBERG I., BANI A., 2000. Evaporation and crust impedance-Role in seedling emergence. *Soil Science*, 165, 354-364.

RAYNER J. H., 1966. Classification of soils by numerical methods. *Journal of Soil Science*, 17, 79–92.

ROSS J. T., 1995. Fuzzy Logic with Engineering Applications. New York: McGraw-Hill, Inc. 593 p.

RUELLAN A., 1976. Morphologie et répartition des sols calcaires dans les régions méditerranéennes et désertiques. *Ann. Agr. (INA)*, 1, 11-39.

SAIDI D., 1992. Etude expérimentale de la stabilité structurale des sols des plaines du Chélif, Thèse de Magister, INA, Alger, 138 p.

SAIDI D., 2004. Influence de la phase saline sur les propriétés physiques des matériaux argileux du Bas Cheliff. Doctorat d'état, INA, 181 p.

- SALAH D., 2012.** Morphologie et propriétés des Calcisols références des hautes plaines sétifiennes. Ecole Doctorale : Science du sol, ENSA, Alger, 78 p.
- SAOUD M., 2014.** Evolution spatiale de la salinité des sols du Bas-Chélif. Magister, ENSA, 84 p.
- SCULL P., 2003.** Predictive soil mapping: a review .Progress in Physical Geography. London, 27, 171-197.
- SERVANT J., 1975.** Contribution à l'étude pédologique des terrains halomorphes. Thèse de doctorat d'état, Université du Languedoc, 194 p.
- SHARIFIFAR A., GHORBANI H., SARMADIAN F., 2016.** Soil suitability evaluation for crop selection using fuzzy sets methodology. Acta agriculturae Slovenica, 10, 32-35.
- SHI X., WARNER Z., WANG H. J., 2010.** Cross-reference for relating genetic soil classification of China with WRB at different scales. Geoderma, 155, 344–350.
- SHI, X. 2013.** Arc Sie user's guide [en ligne]. Disponible sur <http://www.arsie.com/index.htm>.
- SIMLER R., 2012.** Manuel pour Diagrammes. 40 p.
- SOIL CLASSIFICATION WORKING GROUP, 1998.** The Canadian system of soil classification. Agriculture and Agri-Food Canada, Ottawa, ON. Publ. 1646 (revised) 187 pp.
- SONMEZ H., GOKCEOGLU C., ULUSAY R., 2003.** An application of fuzzy sets to the geological strength index (GSI) system used in rock engineering. Eng Appl Artif Intell, 16, 251–69.
- SUGENO M., KANG G.T., 1988.** Structure identification of fuzzy model. Fuzzy Sets Syst., 28: 15–33.
- SUMNER ME., 1993.** Sodic Soil-New perspectives. Aust. J. of Soil Res., 12, 301-322.
- SWEENEY M.C., HESHAAM A., LE MASTERS G.S., NORTON L. D., 1988.** Micro morphological and selected physical proprieties of bar and residue covered soil surface. Soil Tillage Res., 12 :301-322.
- TABORDA SILVEIRA C., OKA-FIORI C., CORDEIRO SANTOS L., EVARISTO SIRTOLI A., 2013.** Soil prediction using artificial neural networks and topographic attributes. Geoderma, 195, 165-172.
- TAGHIZADEH-MEHRJARDI, R., NABIOLLAHI, K., KERRY, R. 2016.** Digital mapping of soil organic carbon at multiple depths using different data mining techniques in Baneh region, Iran. Geoderma, 266 : 98–110.
- TAKAGI T., SUGENO, M., 1985.** Fuzzy identification of systems and its applications to modelling and control. IEEE Trans. Syst. Man Cybern. 15, 116–132.
- TAMAKAWA T., 1986.** High speed fuzzy controller hardware system. Proc. 2nd Fuzzy System Symp, 122–130.
- TCHEMTCHELI M., 1990.** Incidences sur la salinité des sols de la plaine du Haut Chélif (Algérie). Morphologie, géochimie des sols et des eaux. Thèse de Doctorat d'état. Louis Pasteur Strasbourg, France, 257 p.
- TOUAF L. 2002.** Evaluation du niveau de salinité des sols du Nord de l'Algérie. Mémoire de magister, INA, Alger, 171 p.

- TOOMANIAN N., JALALIAN KARIMIAN A., 2003.** Application of the WRB (FAO) and US taxonomy systems to gypsiferous soils in Northwest Isfahan, Iran. *Journal of Agricultural Science and Technology*, vol. 5, pp. 51–66.
- TRIANAFILIS J., WARD W.T., ODEH I.O.A., MCBRATNEY, A.B., 2001.** Creation and interpolation of continuous soil layer classes in the Lower Namoi Valley. *Soil Science Society of America Journal* 65, 403–413.
- SOIL SURVEY STAFF, 1967.** Supplement to the soil Classification System. U.S.D.A. Washington, DC. 200013.
- USDA., 1999** – Soil Taxonomy, a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. 2nd ed. Agriculture handbook, 436, Washington D.C.
- U.S.S.L., 1954.** Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils. U.S.D.A. Handbook, VIII, 60, 160 p.
- UYUMAZ A., ALTUNKAYNAK A., OZGER M., 2006.** Fuzzy logic model for equilibrium scour downstream of a Dams vertical gate. *Journal of Hydraulic Engineering*, 10, 1069–1075.
- VALENTIN C., JANEAU J. L., 1990.** Les risqué de dégradation structurale de la surface des sols en savane humide (Côte d’Ivoire). *Cah. ORSTOM, séri. Pédo.*, 25, 41-52.
- VALLES V., VALLES A. M., DOSSO M., 1983.** Irrigation des sols salés et doses de lessivage. *Cahiers de l’ORSTOM, série pédologie*, 20, 119-127.
- VALLES V., BERTRAND R., BOURGEAT F., N’DIAYE M. K., 1989.** Le concept d’alcalinité résiduelle généralisée et l’irrigation des sols sodiques : Application aux sols du Kouroumari (Mali) et de la vallée de l’oued Medjerdah (Tunisie). *Agronomie Tropicale*, 44, 157-163.
- VALLES V., REZAGUI M., AUQUE L., SEMADI A., ROGER L., ZOUGGARI H., 1997.** Geochemistry of saline soils in two arid zones of the Mediterranean basin.
- VAN HOORN J.W., 1981.** Salt movement leaching requirement. *Agric. Water Manag.*, 4, 409-428.
- VAN HOORN J.W., 1995.** Développement de la salinité du sol dans la zone racinaire. *Compte rendus de l’Académie d’Agriculture de France*. 81, 2, 61-88.
- VERMA P., SINGH P., GEORGE K., 2009.** Uncertainty analysis of transport of water and and pesticide in an unsaturated layered soil profile using fuzzy set theory. *Applied Mathematical Modelling*, 33, 770–782.
- VISCARRA R., BEHRENS T., BEN-DOR E., 2016.** A global spectral library to characterize the world's soil. *Earth-Science Reviews*, 155, pp. 198-230.
- VLIET J.V., HAGEN-ZANKER A., HURKENS J., DELDEN H.V., 2013.** A fuzzy set approach to assess the predictive accuracy of land use simulations. *Ecological Modelling*, vol. 261-262, pp. 32–42.
- YUANYUAN CHAI, LIMIN JIA, ZUNDONG Z., 2009.** Mamdani Model based Adaptive Neural Fuzzy Inference System and its Application. *International Journal of Computational Intelligence* 5, 22-29.
- ZADEH L., 1965.** Fuzzy sets. *Journal of Information and Control*, 8, 338–353.
- ZADEH L., 1978.** Fuzzy Set as a basis for theory of possibility. *Fuzzy Sets System*. 1, 3-28.

ZÁDOROVÁ T., PENÍŽEK V., 2011. Problems in correlation of Czech national soil classification and World Reference Base 2006. *Geoderma*, 167, 54–60.

ZARE ABYANEH H., BAYAT VARKESHI M., GOLMOHAMMADI, G., 2016. Soil temperature estimation using an artificial neural network and co-active neuro-fuzzy inference system in two different climates. *Arab Journal of Geosciences*, 9, 7-37.

ZERAATPISHEH M., SHAMSOLLAH A., COLBY W., BRUNGARD, FINKE P., 2019. Disaggregating and updating a legacy soil map using DSMART, fuzzy c-means and k-means clustering algorithms in Central Iran *Geoderma*, 340, 249-258.

ZHANG C., GUO P., 2018. A fuzzy linear fractional programming approach with double-sided fuzziness for optimal irrigation water allocation. *Agricultural Water Management*, 199, 105-119.

ZHU A.X., BAND, L.E., 1994. A knowledge-based approach to data integration for soil mapping. *Canadian Journal of Remote Sensing*, Kanatan, 20, 408– 418.

ZHUA A., LAWERENCE E., 1996. Band, Barry D, Thomas D, Nimlosd J. 1996. Automated soil inference under fuzzy logic. *Ecological Modelling* : 2, 123-145.

ZIMMERMANN J., 2001. Fuzzy set theory and its applications. 4th ed. London: 492 Kluwer Academic Publishers.

Annexe1

Tableau I : Classification obtenue par MFIS

Profils	Is	Ic	Ig												
1	0.23	0.14	0.19	40	0.18	0.15	0.25	79	0.50	0.16	0.53	118	0.34	0.50	0.16
2	0.45	0.30	0.17	41	0.48	0.17	0.45	80	0.53	0.18	0.17	119	0.36	0.38	0.17
3	0.47	0.27	0.16	42	0.20	0.48	0.15	81	0.18	0.29	0.15	120	0.33	0.50	0.16
4	0.47	0.16	0.16	43	0.50	0.18	0.14	82	0.18	0.27	0.15	121	0.35	0.27	0.17
5	0.17	0.50	0.15	44	0.51	0.19	0.16	83	0.19	0.26	0.15	122	0.36	0.39	0.17
6	0.18	0.50	0.15	45	0.51	0.19	0.15	84	0.18	0.22	0.15	123	0.18	0.50	0.15
7	0.17	0.15	0.15	46	0.56	0.24	0.18	85	0.16	0.17	0.14	124	0.19	0.49	0.15
8	0.17	0.15	0.15	47	0.77	0.17	0.15	86	0.19	0.19	0.15	125	0.18	0.14	0.17
9	0.18	0.48	0.15	48	0.20	0.18	0.15	87	0.23	0.18	0.14	126	0.51	0.51	0.14
10	0.30	0.47	0.17	49	0.23	0.20	0.15	88	0.26	0.18	0.16	127	0.23	0.46	0.16
11	0.19	0.15	0.21	50	0.24	0.24	0.15	89	0.26	0.15	0.50	128	0.23	0.16	0.16
12	0.38	0.17	0.22	51	0.26	0.22	0.15	90	0.33	0.21	0.16	129	0.46	0.18	0.20
13	0.42	0.19	0.37	52	0.22	0.19	0.15	91	0.43	0.23	0.17	130	0.19	0.46	0.16
14	0.17	0.50	0.14	53	0.23	0.19	0.15	92	0.46	0.22	0.16	131	0.17	0.14	0.16
15	0.50	0.51	0.50	54	0.24	0.19	0.15	93	0.50	0.18	0.14	132	0.38	0.17	0.24
16	0.18	0.33	0.16	55	0.20	0.49	0.15	94	0.50	0.20	0.14	133	0.18	0.17	0.15
17	0.22	0.22	0.15	56	0.20	0.48	0.15	95	0.50	0.18	0.14	134	0.25	0.15	0.23
18	0.36	0.48	0.16	57	0.19	0.21	0.15	96	0.23	0.24	0.15	135	0.24	0.17	0.16
19	0.40	0.47	0.18	58	0.20	0.21	0.15	97	0.26	0.23	0.15	136	0.18	0.48	0.15
20	0.20	0.48	0.15	59	0.20	0.18	0.14	98	0.32	0.27	0.15	137	0.31	0.25	0.16
21	0.19	0.15	0.19	60	0.21	0.19	0.15	99	0.50	0.31	0.15	138	0.15	0.16	0.15
22	0.31	0.44	0.17	61	0.18	0.50	0.15	100	0.50	0.21	0.14	139	0.35	0.17	0.21
23	0.30	0.46	0.16	62	0.20	0.21	0.15	101	0.52	0.21	0.15	140	0.16	0.16	0.15
24	0.33	0.44	0.19	63	0.21	0.18	0.15	102	0.17	0.24	0.14	141	0.22	0.23	0.15
25	0.22	0.42	0.18	64	0.22	0.20	0.14	103	0.17	0.19	0.15	142	0.22	0.23	0.15
26	0.45	0.41	0.18	65	0.31	0.20	0.15	104	0.19	0.25	0.15	143	0.27	0.24	0.16
27	0.50	0.48	0.15	66	0.23	0.21	0.18	105	0.17	0.50	0.15	144	0.35	0.29	0.17
28	0.51	0.48	0.15	67	0.43	0.30	0.28	106	0.20	0.40	0.17	142	0.22	0.23	0.15
29	0.49	0.31	0.16	68	0.19	0.19	0.15	107	0.15	0.16	0.15	143	0.27	0.24	0.16
30	0.50	0.45	0.18	69	0.26	0.16	0.15	108	0.18	0.28	0.15	144	0.35	0.29	0.17
31	0.79	0.46	0.26	70	0.18	0.31	0.16	109	0.15	0.15	0.18	145	0.2	0.24	0.16
32	0.28	0.50	0.15	71	0.18	0.22	0.15	110	0.25	0.16	0.15	146	0.26	0.38	0.18
33	0.44	0.49	0.17	72	0.20	0.17	0.15	111	0.28	0.16	0.18	147	0.16	0.49	0.18
34	0.49	0.50	0.15	73	0.27	0.15	0.20	112	0.43	0.45	0.18	148	0.21	0.19	0.18
35	0.20	0.29	0.15	74	0.28	0.15	0.20	113	0.50	0.14	0.17	149	0.21	0.2	0.15
36	0.25	0.47	0.16	75	0.29	0.15	0.21	114	0.69	0.18	0.18	150	0.23	0.26	0.16
37	0.29	0.37	0.17	76	0.32	0.16	0.21	115	0.21	0.14	0.15	151	0.17	0.26	0.15
38	0.29	0.37	0.16	77	0.49	0.15	0.19	116	0.34	0.49	0.16	152	0.21	0.41	0.18
39	0.21	0.42	0.23	78	0.15	0.16	0.50	117	0.36	0.25	0.18	153	0.17	0.51	0.14

Profils	Is	Ic	Ig
154	0.18	0.14	0.19
155	0.40	0.18	0.22
156	0.45	0.18	0.21
157	0.29	0.24	0.16
158	0.35	0.22	0.18
159	0.18	0.19	0.15
160	0.17	0.20	0.15
161	0.16	0.16	0.15
162	0.25	0.25	0.15
163	0.18	0.14	0.18
164	0.24	0.23	0.15
165	0.17	0.16	0.15
166	0.18	0.16	0.15
167	0.21	0.16	0.15
168	0.18	0.16	0.15
169	0.19	0.19	0.15
170	0.31	0.19	0.18
171	0.15	0.14	0.16
172	0.18	0.16	0.15
173	0.18	0.16	0.15
174	0.18	0.17	0.15
175	0.16	0.15	0.16
176	0.17	0.14	0.17
177	0.21	0.17	0.15
178	0.19	0.18	0.15
179	0.79	0.14	0.19
180	0.18	0.20	0.15
181	0.19	0.33	0.16
182	0.20	0.18	0.15
183	0.16	0.17	0.15
184	0.37	0.19	0.17
185	0.42	0.21	0.18
186	0.30	0.38	0.17
187	0.36	0.37	0.17
188	0.27	0.23	0.16
189	0.28	0.23	0.15
190	0.28	0.23	0.15
191	0.28	0.23	0.15
192	0.28	0.24	0.15
193	0.79	0.20	0.15
194	0.28	0.17	0.15

Annexe2

**Tableau I. Ecart de la CE entre la saison sèche et humide (2012)
du profil 1**

Horizons	CE (dS/m)
Anz	1,7
BCnz	47,7
Cnz	50,1
Cgnz1	78,9
Cgnz2	127,5

**Tableau II. Ecart de la CE entre la saison sèche et humide (2012)
du profil 2**

Horizons	CE (dS/m)
Anz	-12
ABnz	83,3
Cgnz1	109,6
Cnz2	4,6
Cgnz3	1

**Tableau III. Ecart de la CE entre la saison sèche et humide (2012)
du profil 3**

Horizons	CE (dS/m)
Anz	51,49
Bgnz1	28,46
Bgnz 2	15
Bgnz3	11
Cgnz	-21

**Tableau IV. Ecart de la CE entre la saison sèche et humide (2012)
du profil 4**

Horizons	CE (dS/m)
Anz	-5,29
Bgnz1	127,9
Bgnz 2	42,8
Cnz	33,6

**Tableau V. Ecart de la CE entre la saison sèche et humide (2013)
du profil 3**

Horizons	CE (dS/m)
Anz	-2,48
Bgnz1	14,1
Bgnz 2	16,7
Bgnz3	15,7
Cgnz	17,2

**Tableau VI. Ecart de la CE entre les saisons humides (2012 et 2013)
du profil 1**

Horizons	CE (dS/m)
Anz	-16,27
BCnz	-15,18
Cnz	-23,01
Cgnz1	6,7
Cgnz2	5,4

**Tableau VII. Ecart de la CE entre les saisons humides (2012 et 2013)
du profil 2**

Horizons	CE (dS/m)
Anz	-29,4
ABnz	-29,2
Cgnz1	-23,5
Cnz2	-27,2
Cgnz3	-2,2

**Tableau VIII. Ecart de la CE entre les saisons humides (2012 et 2013)
du profil 3**

Horizons	CE (dS/m)
Anz	4,6
Bgnz1	13,8
Bgnz 2	7,1
Bgnz3	-3,2
Cgnz	-11,9

**Tableau IX. Ecart de la CE entre les saisons humides (2012 et 2013)
du profil 4**

Horizons	CE (dS/m)
Anz	-7,98
Bgnz1	-5,23
Bgnz 2	18,4
Cnz	9,7

**Tableau X. Ecart de la CE entre les saisons sèches de 2012 et 2013
du profil 1**

Horizons	CE (dS/m)
Anz	10,8
BCnz	-26,8
Cnz	-29,9
Cgnz1	-13,8
Cgnz2	-104,2

**Tableau XI. Ecart de la CE entre les saisons sèches de 2012 et 2013
du profil 2**

Horizons	CE (dS/m)
Anz	65,2
ABnz	-28,8
Cgnz1	-87,2
Cnz2	22,5
Cgnz3	28,6

**Tableau XII. Ecart de la CE entre les saisons sèches de 2012 et 2013
du profil 3**

Horizons	CE (dS/m)
Anz	-49,37
Bgnz1	-28,3
Bgnz 2	5,4
Bgnz3	1,5
Cgnz	26,7

**Tableau XIII. Ecart de la CE entre les saisons sèches de 2012 et 2013
du profil 4**

Horizons	CE (dS/m)
Anz	4,73
Bgnz1	-102,2
Bgnz 2	22,4
Cnz	23,3