

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
المدرسة الوطنية العليا للفلاحة
الجزائر- الحراش
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE
EL-HARRACH - ALGER

THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences
Agronomiques Spécialité : Science du sol

THEME

***Contribution à l'étude pédologique et
géochimique des sols salés de l'Eco-
complexe endoréique sétifien***

Présentée par : **LAOUFI Hadjer**

Devant le jury :

Président du jury : M. HARTANI T. Professeur

Directeur de thèse : M. HADJ MILOUD S. Maître de conférences A

Examineurs : M. TOUMI M. Professeur

M. BENSLAMA M. Professeur

Année Universitaire 2024-2025

لحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات

اللهم اجعل اعمالنا كلها صلاة ولوجهاك الكريم يا ربنا خالصة ولا تجعل لنا نفسنا ولا الدنيا ولا

الشيطان منها حظا ولا نصيبا وتقبلها منا يا ارحم الراحمين

اللهم آمين

Dédicaces

À ma chère mère, pilier de ma vie, dont l'amour inconditionnel, les sacrifices et les prières silencieuses m'ont accompagné à chaque étape de mon parcours. Cette thèse est le reflet de votre foi en moi,

À mon cher père,

À mon Cher mari,

À mes trésors Abdelkarim et Mahdi,

À mes frères Ali et Zakaria et mes sœurs Asma et Khalida, à ma belle-sœur Fatima,

À mes chers Ibrahim, Kenouz, Rassim, Iliès, mon ange Youcef et ma princesse Sana.

Je dédie cette thèse

Remerciements

Aujourd'hui, alors que je termine ce long et exigeant parcours doctoral, écrire ces remerciements symbolise pour moi la lumière au bout du tunnel. Ce voyage scientifique n'aurait jamais pu être accompli sans le soutien et la contribution précieuse de nombreuses personnes, que je tiens à honorer ici.

Je souhaite tout d'abord exprimer ma profonde gratitude à Dr Hadj Miloud S., qui, malgré ses nombreux engagements, a accepté de poursuivre l'encadrement de ce travail de thèse. Son engagement était déterminant pour mener ce projet à terme.

Mes sincères remerciements vont également au Pr Daoud Youcef, pour son encadrement exceptionnel, ses conseils avisés et son soutien constant tout au long de mon parcours scientifique depuis l'ingénieur. Son expertise, sa rigueur, et sa patience ont été une source d'inspiration et m'ont permis de surmonter les nombreux défis rencontrés au cours de cette aventure.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude au Pr Hartani T. pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury de soutenance.

Je remercie également Pr Toumi M. et Pr Benselama M., pour avoir consacré leur temps et leur expertise à l'examen de ce travail.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à mon mari Khelifati Omar, pour son soutien indéfectible. Sa précieuse contribution, notamment à travers sa participation active aux travaux sur le terrain et aux nombreuses sorties qui ont jalonné cette recherche, a été d'une aide inestimable. Sa patience, sa compréhension et son encouragement au fil des années m'ont donné la force de persévérer et d'aller jusqu'au bout.

Un remerciement tout particulier va à ma famille et mes proches. Leur soutien moral, tout au long de ces années de travail ont été pour moi une source inestimable de force et de motivation.

Je suis également reconnaissante envers toutes les personnes et institutions qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de cette thèse. Je remercie notamment Dr Jean-Pierre Montoroi et toute l'équipe de l'IRD France, Pr Bahadir Koz de l'Université de Giresun en Turquie, ainsi que Dr Belazoug M., Dr Fellahi Z. et Dr Ait Mechedal M. de l'Université de Bordj Bou Arreridj.

Enfin, ma reconnaissance va à l'équipe du laboratoire de l'ENSA, en particulier Labidi R., ainsi qu'à l'équipe de la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie de l'Université de Bordj Bou Arreridj, notamment Dr. Gahfif W. et Dr. Mekhoukh N.. À mes chères amies Amel et Habiba, votre soutien et vos encouragements constants ont été essentiels. Merci de m'avoir accompagnée tout au long de cette aventure.

Résumé

L'éco-complexe sud-sétifien est l'un des complexes de zones humides les plus vastes et les plus diversifiés du pays. Il est situé dans les hautes plaines du nord-est de l'Algérie, comprend quatre zones humides principales : Sebkhet El Hamiet, Sebkhet Bazer, et Chott El Beida sont inscrites à la Convention Ramsar, tandis que Chott El Frain est actuellement en cours de classement. Ces zones couvrent une superficie totale de 20 611 hectares et présentent des altitudes comprises entre 800 et 1 200 m. Leur biodiversité et leur rôle écologique sont menacés par la salinisation des sols, un processus complexe influencé par des facteurs géologiques, climatiques et hydrogéologiques.

De nombreuses recherches sur les zones humides de Sétif se sont concentrées sur l'hydrogéologie, l'avifaune et la végétation, mais seule une étude a porté sur les sols. Cette étude vise à caractériser les sols de ces zones humides, à évaluer la distribution spatiale et verticale de la salinité, et à analyser les mécanismes géochimiques impliqués dans la salinisation. Elle a été menée sur quatre toposéquences de 200 à 250 mètres, comprenant 34 profils pédologiques. Au total, 105 échantillons ont été prélevés sur l'ensemble des profils, à raison d'un échantillon par horizon pédologique, jusqu'à une profondeur maximale de 200 cm. Les analyses physico-chimiques ont mesuré la texture, le pH, la conductivité électrique (CE), les teneurs en calcaire, en matière organique, et en ions majeurs (Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Cl^- , SO_4^-). Les concentrations des principaux ions de la solution du sol ont permis de déterminer les faciès chimiques, de calculer les indices de saturation pour chaque minéral, ainsi que l'alcalinité résiduelle, grâce à la modélisation géochimique avec PhreeqC.

Les observations de terrain montrent que ces milieux présentent une grande hétérogénéité, tant au sein de chaque profil qu'entre les profils d'une même toposéquence et entre les quatre sebkhas. Les sols sont majoritairement argileux, avec des teneurs élevées en calcaire et une salinité variable allant de non salin à extrêmement salin. Les investigations géochimiques révèlent que le faciès dominant est le faciès chloruré solique, commun au Maghreb et en Afrique du Nord. La salinisation dans les quatre sebkhas est principalement régulée par la précipitation de minéraux tels que la calcite, l'aragonite, la dolomite, le gypse et l'anhydrite, ainsi que par la dissolution des minéraux d'évaporite. L'évolution de l'alcalinité résiduelle calcite (ARc) et l'alcalinité résiduelle généralisée (ARg) montre une voie saline neutre dans les solutions diluées. Toutefois, après la précipitation du gypse et de l'anhydrite, une tendance vers une voie alcaline est observée, signalant un risque potentiel de dégradation des sols. Ces

résultats fournissent des bases pour une gestion durable des milieux salins, essentielle pour préserver les zones humides et adapter les pratiques agricoles aux contraintes pédologiques locales.

Mots clés : Géochimie, salinité, sols, faciès chimique, alcalinité résiduelle, Précipitation, dissolution, zone humide.

Summary

The South-Sétif Eco-Complex is one of the largest and most diverse wetland complexes in the country. It is located in the high plains of northeastern Algeria and includes four main wetlands: Sebket El Hamiet, Sebket Bazer, and Chott El Beida are listed under the Ramsar Convention, while Chott El Frain is in the process of being designated. These areas cover a total area of 20,611 hectares and have altitudes ranging between 800 and 1,200 meters. Their biodiversity and ecological role are threatened by soil salinization, a complex process influenced by geological, climatic, and hydrogeological factors. Many studies on the wetlands of Sétif have focused on hydrogeology, avifauna, and vegetation, but only one study has addressed the soils. This study aims to characterize the soils of these wetlands, to evaluate the spatial and vertical distribution of salinity, and to analyze the geochemical mechanisms involved in salinization. It was conducted on four toposequences of 200 to 250 meters, comprising 34 pedological profiles. In total, 105 samples were collected from all profiles, with one sample per soil horizon, up to a maximum depth of 200 cm. The physicochemical analyses measured the texture, pH, electrical conductivity (EC), limestone content, organic matter, and major ions (Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Cl^- , SO_4^{-}). The concentrations of the main ions in the soil solution allowed for the determination of chemical facies, the calculation of saturation indices for each mineral, as well as residual alkalinity, thanks to geochemical modeling with PhreeqC. Field observations show that these environments are very heterogeneous, both within each profile and between the profiles of the same toposequence and among the four sebkhas. The soils are predominantly clayey, with high limestone content and variable salinity ranging from non-saline to extremely saline. Geochemical investigations indicate that the dominant facies is the solichloride facies, common in the Maghreb and North Africa. Salinization in the four sebkhas is primarily regulated by the precipitation of minerals such as calcite, aragonite, dolomite, gypsum, and anhydrite, as well as by the dissolution of evaporite minerals. The evolution of residual calcite alkalinity (ARc) and generalized residual alkalinity (ARg) shows

a neutral saline pathway in diluted solutions. However, after the precipitation of gypsum and anhydrite, a trend towards an alkaline pathway is observed, indicating a potential risk of soil degradation. These results provide a basis for sustainable management of saline environments, essential for preserving wetlands and adapting agricultural practices to local pedological constraints.

Keywords: Geochemistry, salinity, soils, chemical facies, residual alkalinity, precipitation, dissolution, wetland.

ملخص

المجمع البيئي الجنوبي لسطييف هو أحد أكبر وأحد أكثر مجتمعات المناطق الرطبة تنوعا في البلاد. يقع في السهول العليا شمال شرق الجزائر، ويشمل أربع مناطق رطبة رئيسية: سبخة الحميات، سبخة بازر، وشط البيضة مدرجة في اتفاقية رامسار، بينما شط الفراين في طور التصنيف. تغطي هذه المناطق مساحة إجمالية قدرها 20611 هكتارًا وتتميز بارتفاعات تتراوح بين 800 و1200 متر. تنوعها البيولوجي ودورها البيئي مهدهان بملوحة التربة، وهي عملية معقدة تتأثر بعوامل جيولوجية ومناخية وهيدروجيولوجية. تركزت العديد من الأبحاث حول المناطق الرطبة في سطييف على الهيدروجيولوجيا، الطيور، والنباتات، لكن دراسة واحدة فقط تناولت التربة. تهدف هذه الدراسة إلى وصف تربة هذه المناطق الرطبة، وتقييم التوزيع المكاني والعمودي للملوحة، وتحليل الآليات الجيوكيميائية المتدخلة في عملية التملح. تمت الدراسة على أربع تسلسلات طبوغرافية تتراوح بين 200 إلى 250 مترًا، تشمل 34 مقطعًا للتربة. في المجموع، تم أخذ 105 عينات من جميع مقاطع التربة، بمعدل عينة واحدة لكل أفق، حتى عمق أقصى يبلغ 200 سم. قامت التحليلات الفيزيائية والكيميائية بقياس الملمس، ودرجة الحموضة، والتوصيل الكهربائي (CE)، ومحتويات الكالسيوم، والمواد العضوية، والأيونات الرئيسية Na^+ ، K^+ ، Ca^{++} ، Mg^{++} ، Cl^- ، SO_4^{--} .

سمحت تركيزات الأيونات الرئيسية في محلول التربة بتحديد الوجوه الكيميائية، وحساب مؤشرات التشبع لكل معدن، وكذلك القلوية المتبقية، بفضل النمذجة الجيوكيميائية باستخدام PhreeqC. تظهر الملاحظات الميدانية أن هذه البيئات شديدة التباين، سواء داخل كل مقاطع للتربة أو بين مقاطع التربة في نفس التسلسل الطبوغرافي وبين السبخات الأربعة. التربة هي في الغالب طينية، مع محتويات عالية من الحجر الجيري وملوحة متغيرة تتراوح من غير مالحة إلى مالحة للغاية. تشير التحقيقات الجيوكيميائية إلى أن الواجهة السائدة هي واجهة كلور الصوديوم، الشائعة في المغرب العربي وشمال إفريقيا. التملح في الأربع سبخات يتم تنظيمه بشكل رئيسي عن طريق ترسيب المعادن مثل الكالسيوم، الأراجونيت، الدولوميت، الجبس والأنهدريت، وكذلك عن طريق ذوبان معادن التبخر. تُظهر تطورات القلوية المتبقية

للكالسيت (ARC) والقلوية المتبقية العامة (ARg) مسارًا ملحيًا محايدًا في المحاليل المخففة. ومع ذلك، بعد ترسيب الجبس والأنهدريت، لوحظ اتجاه نحو مسار قلوي، مما يشير إلى خطر محتمل لتدهور التربة. توفر هذه النتائج أساسًا لإدارة مستدامة للبيئات المالحة، وهو أمر ضروري للحفاظ على المناطق الرطبة وتكييف الممارسات الزراعية مع قيود التربة المحلية .

الكلمات المفتاحية: الجيوكيمياء، الملوحة، التربة، الوجه الكيميائي، القلوية المتبقية، الترسيب، الذوبان، الأراضي الرطبة.

Liste des figures

Figure 1. Localisation géographique de l'Eco-complexe Sud-Sétifien	32
Figure 2. Vue par satellite de l'Eco-complexe Sud-Sétifien	33
Figure 3. Précipitations moyennes mensuelles de la station de Sétif (1989-2015)	36
Figure 4. Variation moyenne de la température mensuelle stations Sétif (1989-2015)	37
Figure 5. Diagramme Ombrothermique de la région de Sétif (1989-2015)	38
Figure 6. Extrait de la carte géologique de l'Algérie 2 -ème édition au 1/500 000 (Deleau et Laffitte, 1951)	41
Figure 7. Présentation de la toposéquence de Sebkhet El Hamiet	45
Figure 8. Présentation de la toposéquence de Chott El Frain	45
Figure 9. Présentation de la toposéquence de Sebkhet Bazer	46
Figure 10. Présentation de la toposéquence de Chott El Beida	46
Figure 11. Les photos des profils pédologiques de la toposéquence de Sebkhet El Hamiet	62
Figure 12. Description pédologique de la toposéquence de Sebkhet El Hamiet	63
Figure 13. Les photos des profils pédologiques de la toposéquence de Chott El Frain	70
Figure 14. Description pédologique de la toposéquence de Chott El Frain	71
Figure 15. Les photos des profils pédologiques de la toposéquence de Sebkhet Bazer	79
Figure 16. Description pédologique de la toposéquence de Sebkhet Bazer	80
Figure 17. Les photos des profils pédologiques de la toposéquence de Chott El Beida	88
Figure 18. Description pédologique de la toposéquence de Chott El Beida	89
Figure 19. Graphique des variables étudiées en fonction des axes F1 et F2 (ACP) Sebkhet El Hamiet»	« 97
Figure 20. Graphique des individus en fonction des axes F1 et F2 (ACP) Sebkhet El Hamiet»	« 97
Figure 21. Graphique des variables étudiées en fonction des axes F1 et F2 (ACP) Chott El Frain »	« 108
Figure 22. Graphique des individus en fonction des axes F1 et F2 (ACP) Chott El Frain »	« 108
Figure 23. Graphique des variables étudiées en fonction des axes F1 et F2 (ACP) Sebkhet Bazer »	« 115

Figure 24. Graphique des individus en fonction des axes F1 et F2 (ACP) « Sebkhet Bazer »	115
Figure 25. Graphique des variables étudiées en fonction des axes F1 et F2 (ACP)	122
Figure 26. Graphique des individus en fonction des axes F1 et F2 (ACP)	122
Figure 27. Faciès chimique des solutions des sols des quatre sebkhas	134
Figure 28. Evolution du faciès chimique au cours du phénomène de concentration	135
Figure 29. Evolution de la composition chimique des solutions du sol en fonction de leur concentration « Sebkhet El Hamiet »	141
Figure 30. Evolution de la composition chimique des solutions du sol en fonction de leur concentration « Chott El Frain »	141
Figure 31. Evolution de la composition chimique des solutions du sol en fonction de leur concentration « Sebkhet Bazer »	142
Figure 32. Evolution de la composition chimique des solutions du sol en fonction de leur concentration « Chott El Beida »	142
Figure 33. Evolution de l'indice de saturation des minéraux en fonction de la CE dans Sebkhet El Hamiet	144
Figure 34. Evolution de l'indice de saturation des minéraux en fonction de la CE dans Chott El Frain	145
Figure 35. Evolution de l'indice de saturation des minéraux en fonction de la CE dans Sebkhet Bazer	146
Figure 36. Evolution de l'indice de saturation des minéraux en fonction de la CE dans Chott El Beida	147
Figure 37. Les profils salins dans la toposéquence de Sebkhet El Hamiet	151
Figure 38. Les profils salins dans la toposéquence de Chott El Frain	153
Figure 39. Les profils salins dans la toposéquence de Sebkhet Bazer	154
Figure 40. Les profils salins dans la toposéquence de Chott El Beida	156
Figure 41. Évolution de l'alcalinité résiduelle en fonction du facteur de concentration	161

Liste des tableaux

Tableau I. Répartitions moyennes mensuelles et saisonnières des précipitations en mm pour la série (CMSS ; 1989-2015)	35
Tableau II. Répartitions moyennes mensuelles et saisonnières des températures stations Sétif Période (1989-2015)	36
Tableau III. Valeurs moyennes mensuelles des précipitations et des températures à Sétif (1989-2015)	38
Tableau IV. Localisation géographiques et profondeur des horizons des profils pédologiques de Sebkhet El Hamiet	47
Tableau V. Localisation géographiques et profondeur des horizons des profils pédologiques de Chott El Frain	48
Tableau VI. Localisation géographiques et profondeur des horizons des profils pédologiques de Sebkhet Bazer	49
Tableau VII. Localisation géographiques et profondeur des horizons des profils pédologiques de Chott El Beida	50
Tableau VIII. Statistiques descriptives des paramètres étudiés « Sebkhet El Hamiet »	92
Tableau IX. Corrélation de Pearson entre les différents paramètres « Sebkhet El Hamiet »	94
Tableau X. Coefficients de corrélation des variables centrées réduites avec les facteurs	96
Tableau XI. Test de normalité de Shapiro-Wilk	98
Tableau XII. Test d'homogénéité des variances	99
Tableau XIII. Test robuste d'égalité des moyennes	100
Tableau XIV. Comparaisons multiples (LSD)	101
Tableau XV. Statistiques descriptives des paramètres étudiés « Chott El Frain »	104
Tableau XVI. Corrélation de Pearson entre les différents paramètres « Chott El Frain »	105
Tableau XVII. Coefficients de corrélation des variables centrées réduites avec les facteurs	107
Tableau XVIII. Tests de normalité de Shapiro-Wilk	109
Tableau XIX. Test d'homogénéité des variances	110
Tableau XX. Analyse de la variance ANOVA	110
Tableau XXI. Statistiques descriptives des paramètres étudiés « Sebkhet Bazer »	111
Tableau XXII. Corrélation de Pearson entre les différents paramètres « Sebkhet Bazer »	112

Tableau XXIII. Coefficients de corrélation des variables centrées réduites avec les facteurs	114
Tableau XXIV. Test de normalité de Shapiro-Wilk	116
Tableau XXV. Tests statistiques de Kruskal-Wallis	117
Tableau XXVI. Statistiques descriptives des paramètres étudiés « Chott El Beida »	118
Tableau XXVII. Corrélation de Pearson entre les différents paramètres « Chott El Beida »	120
Tableau XXVIII. Coefficients de corrélation des variables centrées réduites avec les facteurs	120
Tableau XXIX. Test de normalité de Shapiro-Wilk	123
Tableau XXX. Test d'homogénéité des variances	124
Tableau XXXI. Analyse de la variance ANOVA	124
Tableau XXXII. Comparaisons multiples (LSD)	125
Tableau XXXIII. Produits de solubilité des différents minéraux étudiés	143

Liste des tableaux annexe

Annexe I. Les types de climat selon l'indice d'aridité de De Martonne	197
Annexe II. Résultats des analyses physico-chimiques « Sebkhet El Hamiet »	198
Annexe III. Résultats des analyses physico-chimiques « Chott El Frain »	199
Annexe IV. Résultats des analyses physico-chimiques « Sebkhet Bazer »	200
Annexe V. Résultats des analyses physico-chimiques « Chott El Beida »	201
Annexe VI. Résultats du bilan ionique « Sebkhet El Hamiet »	202
Annexe VII. Résultats du bilan ionique « Chott El Frain »	203
Annexe VIII. Résultats du bilan ionique « Sebkhet Bazer »	204
Annexe IX. Résultats du bilan ionique « Chott El Beida »	205
Annexe X Cosinus carrés des variables « Sebkhet El Hamiet »	206
Annexe XI Corrélation entre variables et facteurs « Sebkhet El Hamiet »	206
Annexe XII Contribution des variables « Sebkhet El Hamiet »	207
Annexe XIII Cosinus carrés des observations « Sebkhet El Hamiet »	208
Annexe XIV Coordonnées des observations « Sebkhet El Hamiet »	209
Annexe XV Cosinus carrés des variables « Chott El Frain»	210
Annexe XVI Corrélation entre variables et facteurs «Chott El Frain»	210
Annexe XVII Contribution des variables «Chott El Frain»	211

Annexe XVIII Cosinus carrés des observations «Chott El Frain»	212
Annexe XIX Coordonnées des observations «Chott El Frain»	213
Annexe XX Cosinus carrés des variables « Sebkhet Bazer »	214
Annexe XXI Corrélation entre variables et facteurs « Sebkhet Bazer»	214
Annexe XXII Contribution des variables «Sebkhet Bazer»	215
Annexe XXIII Cosinus carrés des observations « Sebkhet Bazer»	216
Annexe XXIV Coordonnées des observations «Sebkhet Bazer»	217
Annexe XXV Cosinus carrés des variables « Chott El Beida »	218
Annexe XXVI Corrélation entre variables et facteurs «Chott El Beida»	218
Annexe XXVII Contribution des variables «Chott El Beida»	219
Annexe XXVIII Cosinus carrés des observations «Chott El Beida»	220
Annexe XXIX Coordonnées des observations «Chott El Beida»	221
Annexe XXX. Facteurs de concentration et indices de saturation « Sebkhet El Hamiet »	222
Annexe XXXI. Facteurs de concentration et indices de saturation « Chott El Frain »	223
Annexe XXXII. Facteurs de concentration et indices de saturation « Sebkhet Bazer »	224
Annexe XXXIII. Facteurs de concentration et indices de saturation « Chott El Beida »	225
Annexe XXXIV. Calcul des alcalinités résiduelles « Sebkhet El Hamiet »	226
Annexe XXXV. Calcul des alcalinités résiduelles « Chott El Frain »	227
Annexe XXXVI. Calcul des alcalinités résiduelles « Sebkhet Bazer »	228
Annexe XXXVII. Calcul des alcalinités résiduelles « Chott El Beida »	229

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre I. Synthèse bibliographique.....	5
1. Introduction	5
2. Les sols salins et les sols sodiques.....	5
2.1. Les processus de salinisation et de sodisation des sols	7
2.2. Salinisation en zones arides et semi-arides	7
2.3. Impact du climat sur la salinisation et la sodisation.....	9
2.4. Effets de la salinité et de la sodicité sur les propriétés physiques du sol	10
2.5. La distribution verticale de la salinité des sols.....	12
2.6. Mise en valeur des sols salins et des sols sodiques	14
3. Les zones humides salées	14
3.1. Définition et caractéristiques des zones humides et des lacs salés	14
3.2. Répartition des zones humides en Algérie	16
3.3. La salinisation dans les zones humides	17
3.4. Relation salinité- végétation - matière organique dans les zones humides.....	19
3.5. Importance et menaces des zones humides en Algérie	20
3.6. Rôle agronomique et menaces alourdie sur les zones humides salines.....	22
4. Les processus géochimiques de la salinisation des sols en zone humide sous climat semi-aride.....	25
4.1. Rôle de l'évaporation dans la précipitation des minéraux	25
4.2. Le mécanisme de précipitation et de dissolution des minéraux	26
4.3. Origine et évolution des eaux souterraines salées.....	29
Chapitre II. Présentation générale de l'Eco-complexe Sud-Sétifien	32
1. Situation géographique de la zone d'étude.....	32
1.1. Sebkhet El Hamiet.....	33

1.2.	Chott El Frain	33
1.3.	Sebkhet Bazer.....	33
1.4.	Chott El Beida	34
2.	Le Climat	34
2.1.	Les précipitations	35
2.2.	La température.....	36
2.3.	Quotient pluviométrique d’Emberger	38
2.4.	L’évapotranspiration potentielle	38
3.	Le cadre géologique, géomorphologique et hydrogéologique	39
3.1.	La géologie.....	39
3.1.1.	Terrains peu ou pas tectonisés	39
3.1.2.	Quaternaire.....	39
3.1.3.	Mio-Pliocène.....	39
3.1.4.	Terrains tectonisés	40
3.2.	La géomorphologie	40
3.3.	L’hydrogéologie.....	40
4.	La faune et la flore des zones humides de l’éco-complexe Sud-Sétifien	42
4.1.	La flore	42
4.2.	La faune.....	43
	Chapitre III. Matériel et méthodes	44
1.	Matériel d’étude.....	44
1.1.	Echantillonnage sur le terrain.....	44
2.	Méthodes d’étude	50
2.1.	Analyses physico-chimiques des échantillons de sol.....	50
2.2.	Analyse et traitement des données	51
	Chapitre IV. Caractérisation pédologique des sols de l’Eco-complexe Sud-Sétifien.....	54
1.	Introduction	54

2.	La toposéquences de Sebkhet El Hamiet.....	54
3.	La toposéquence de Chott El Frain.....	64
4.	La toposéquence de Sebkhet Bazer	72
5.	La toposéquence de Chott El Beida.....	81
6.	Conclusion.....	90
Chapitre V. Étude comparative des sols à travers une approche statistique		91
1.	Introduction	91
2.	Analyses statistiques des données de Sebkhet El Hamiet	91
2.1.	Statistiques descriptives	91
2.2.	Etude des corrélations Pearson.....	93
2.3.	Analyse en composante principale.....	95
2.4.	Test de normalité de Shapiro-Wilk	98
3.	Tests d'homogénéité des variances	98
3.1.	Test d'égalité des moyennes « test de Welch »	99
3.2.	Comparaisons multiples (LSD).....	100
4.	Analyses statistiques des données de Chott El Frain.....	103
4.1.	Statistiques descriptives	103
4.2.	Etude des corrélations Pearson.....	103
4.3.	Analyse en composante principale.....	104
4.4.	Test de normalité de Shapiro-Wilk	106
4.5.	Test d'homogénéité des variances	109
4.6.	Analyse de la variance (ANOVA)	110
5.	Analyses statistiques des données de Sebkhet Bazer	110
5.1.	Statistiques descriptives	110
5.2.	Etude des corrélations Pearson.....	111
5.3.	Analyse en composante principale.....	113
5.4.	Test de normalité de Shapiro-Wilk	116

5.5.	Tests statistiques de Kruskal-Wallis	116
6.	Analyses statistiques des données de Chott El Beida.....	117
6.1.	Statistiques descriptives	117
6.2.	Etude des corrélations Pearson.....	118
6.3.	Analyse en composante principale.....	119
6.4.	Test de normalité de Shapiro-Wilk	123
6.5.	Test d'homogénéité des variances.....	123
6.6.	Analyse de la variance ANOVA	124
6.7.	Comparaisons multiples (LSD).....	124
7.	Synthèse et discussion	126
8.	Conclusion.....	129
Chapitre VI. Approche géochimique de l'étude de la salinisation des sols.....		132
1.	Introduction	132
2.	Le facies chimique des solutions des sols	132
2.1.	Le facies chimique à Sebkhet El Hamiet	132
2.2.	Le facies chimique à Chott El Frain.....	133
2.3.	Le facies chimique à Sebkhet Bazer	133
2.4.	Le facies chimique à Chott El Beida.....	133
2.5.	Evolution du faciès chimique au cours du phénomène de concentration	134
3.	Evolution de la composition chimique des solutions en fonction de leur concentration	136
3.1.	Comportement du sodium	137
3.2.	Comportement du calcium	137
3.3.	Comportement des sulfates	138
3.4.	Comportement du potassium.....	138
3.5.	Comportement du magnésium	138
3.6.	Comportement de l'alcalinité.....	138
4.	Les tests de saturation vis- à-vis des minéraux susceptible de précipiter.....	143

4.1.	L'état de saturation des solutions de sols dans Sebket El Hamiet	143
4.2.	L'état de saturation des solutions de sols dans Chott El Frain.....	144
4.3.	L'état de saturation des solutions de sols dans Sebket Bazer	145
4.4.	L'état de saturation des solutions de sols dans Chott El Beida.....	146
5.	La distribution verticale de la salinité dans le profil (Profils salins).....	149
5.1.	Etude de la distribution verticale de la salinité à Sebket El Hamiet	150
5.2.	Etude de la distribution verticale de la salinité à Chott El Frain.....	152
5.3.	Etude de la distribution verticale de la salinité à Sebket Bazer	153
5.4.	Etude de la distribution verticale de la salinité à Chott El Beida.....	155
6.	L'alcalinité résiduelle et l'alcalinité résiduelle généralisée.....	158
7.	Conclusion.....	164
	Conclusion générale.....	165
	Références bibliographiques.....	169
	Annexe	197

Introduction générale

Introduction générale

D'après un rapport publié par la FAO en 2000, la superficie mondiale des sols continentaux concernés par la salinité englobant les sols salins et sodiques s'élève à 831 millions d'hectares (Martinez-Beltran et Manzur, 2005). Ces sols salins se trouvent dans au moins 75 pays du monde (Szabolcs, 1994). Ils représentent un défi majeur, non seulement pour les écosystèmes naturels, mais également pour l'agriculture et la sécurité alimentaire dans de nombreuses régions.

Dans les régions arides, la salinisation et la sodisation sont des processus courants, pouvant être attribués soit à des conditions naturelles, soit à des activités anthropiques. Les causes naturelles incluent le climat, la structure géologique et la composition des roches, la topographie, les formes du relief, la profondeur et la minéralisation des eaux souterraines et la pédologie (Issanova et al., 2017). Les causes humaines quant à elles, sont principalement liées à l'utilisation agricole des terres, en particulier l'agriculture irriguée avec des eaux plus ou moins chargées en sels, conjuguée à une mauvaise pratique d'irrigation (Gorji et al., 2015 ; Stavi et al., 2021).

La salinisation affecte plus de 20 % des terres agricoles irriguées et endommage les écosystèmes agricoles (Ghassemi et al., 1995 ; Qadir et al., 2007 ; Wicke et al., 2011 ; Scudiero et al., 2017 ; Yuan et al., 2019). Cette problématique a des répercussions profondes sur la productivité agricole et la durabilité environnementale ; particulièrement dans les zones arides. Les sols salins sont fréquents dans les régions arides et semi-arides du monde, bien qu'ils puissent aussi se développer dans les régions à climat humide (Issanova et al., 2017).

La salinisation en zones arides, se définit comme le transport des sels d'une nappe phréatique chargée en sel vers la surface du sol par capillarité due à l'évaporation (Yu et al., 2014). Ce phénomène entraîne une teneur en sel excessivement élevée, affectant considérablement la qualité du sol, la croissance végétale, la biodiversité et le rendement des cultures (Cassel et al., 2015 ; Ma et al., 2017 ; Chi et al., 2018 ; Ma et al., 2018 ; Wang et al., 2018).

Dans le bassin méditerranéen, la superficie occupée par les zones humides est estimée à 21 000 km² ; dont 11 600 km² sont constitués de lacs salés (Khaznadar et al., 2009). L'Algérie, située dans ce bassin, présente des conditions climatiques et physiographiques diverses, qui favorisent

la présence de nombreuses zones humides, parmi lesquelles 50 sont répertoriées par la Convention de Ramsar sur les zones humides d'importance internationale (Boumezbour, 2004).

Les hautes plaines de l'Est algérien, caractérisées par un climat semi-aride, abritent une vingtaine de zones humides jouant un rôle clé dans la conservation de nombreuses plantes endémiques rares et la migration des oiseaux d'eau (Koull et al., 2016). Elles offrent également des services écologiques essentiels tels que la recharge des eaux souterraines, la rétention des sédiments et des substances toxiques et le contrôle des inondations. Ces zones humides sont localement connues sous le nom de Sebka ou Chott.

À l'échelle mondiale, on observe une extension considérable des terres fragilisées par la salinité en raison du changement climatique, de l'élévation du niveau de la mer et de l'affaissement des terres côtières (Hallegatte et al., 2013). À l'avenir, un climat plus chaud entraînera des changements dans le cycle hydrologique (Sterling et al., 2013 ; Vautard et al., 2014) ; augmentant significativement la salinité des sols et l'expansion des zones touchées par ce problème. L'augmentation de l'évapotranspiration devrait accroître la salinisation des eaux souterraines peu profondes, en particulier dans les zones arides et semi-arides (Bates et al., 2008).

Les connaissances sur la prévention, l'atténuation et la récupération de la salinité et de la sodicité des sols ont considérablement progressé au fil du temps (Stavi et al., 2021). Cependant, les changements climatiques, avec des températures en hausse et une fréquence croissante des sécheresses dans les régions plus humides, ainsi que l'assèchement et l'expansion des zones arides dans le monde (Cook et al., 2014 ; Huang et al., 2017a), rendent la salinisation et la sodisation des sols un défi mondial (Stavi et al., 2021).

Cette salinisation entraîne une dégradation sévère des ressources en sol à l'échelle mondiale (Issanova et al., 2017 ; Scudiero et al., 2017 ; Wang et al., 2018) et locale (Koull et Chehema, 2016 ; Medjani et al., 2017 ; Abdenmour et al., 2019b ; Semar et al., 2019 ; Abdenmour et al., 2021). Cette dégradation constitue une véritable menace pour les propriétés physico-chimiques du sol (Besser et al., 2017 ; Ayadi et al., 2018) et impacte négativement de nombreuses fonctions écologiques et non écologiques vitales.

Plusieurs études à l'échelle nationale ont été consacrées aux sols salés en régions arides, abordant divers aspects tels que la géochimie, la classification des sols et le suivi de la

dynamique de la salinité (Laoufi, 2010 ; Ouamer-Ali et al., 2018 ; Ait Mechedal et al., 2018 ; Hadj-Miloud et al., 2018).

Toutefois, une étude approfondie des processus géochimiques influençant la chimie du sol dans les zones humides des hauts plateaux de l'est de l'Algérie est d'une importance capitale. Afin de pallier à ces insuffisances, cette recherche peut fournir des informations précieuses sur les mécanismes qui conduisent à la salinisation des sols dans ces régions arides. La compréhension des réactions chimiques qui se produisent lorsque le sol et l'eau entrent en contact est crucial, afin d'identifier les facteurs qui influencent la chimie et l'évolution du sol. Cette connaissance permettra de formuler des stratégies efficaces de conservation des zones humides ; ainsi que des pratiques durables de gestion des ressources en sol dans la région.

Cette étude est guidée par trois principaux objectifs :

1. Contribuer à la caractérisation pédologique approfondie de quatre zones humides de l'Eco-complexe Sud-Sétifien : Sebkhet El Hamiet, Chott El Frain, Sebkhet Bazer et Chott El Beida ; trois d'entre elles étant d'importance internationale. Cette caractérisation permet de mieux comprendre les spécificités pédologiques propres à chaque zone.
2. Étudier la variation de la salinité dans cette zone d'un point de vue quantitatif et qualitatif en analysant la distribution des niveaux de salinité horizontalement dans le paysage ; et verticalement en fonction de la profondeur du sol.
3. Réaliser une étude géochimique approfondie de la salinité des sols dans les quatre zones humides. Cette analyse inclut la détermination des faciès géochimiques dominants ; l'exploration des niveaux de saturation des minéraux susceptibles de précipiter dans cet environnement ; ainsi que l'identification et l'analyse des voies géochimiques de salinisation moyennant des approches analytiques géochimiques utilisant le modèle d'équilibre PhreeqC. Cette analyse détaillée apportera une base solide pour comprendre les mécanismes de salinisation.

Ce travail est structuré en six chapitres :

D'abord une introduction qui présente le contexte général et la problématique liée à la salinisation des sols. Elle fixe les principaux objectifs de la présente recherche et justifie le choix du contexte d'étude.

Le premier chapitre est une synthèse bibliographique. Ce chapitre dresse un état de l'art des connaissances sur la salinité des sols, les sols salés en zones humides, et la géochimie des milieux salés ; en rassemblant les travaux et théories existants pour fournir un cadre théorique à l'étude.

Le second chapitre est une présentation générale de l'Eco-complexe Sud-Sétifien. Ce chapitre décrit la zone d'étude en détail : localisation géographique, caractéristiques climatiques, géologiques, hydrogéologiques et géomorphologiques ; afin de contextualiser l'environnement de recherche.

Le troisième chapitre s'intéresse au matériel et les méthodes utilisées dans ce travail. Il expose la méthodologie utilisée dans l'étude ; incluant les procédures d'échantillonnage sur le terrain, les analyses des sols réalisées en laboratoire, ainsi que les techniques de traitement et d'analyse des données.

Le quatrième chapitre est une caractérisation des sols de l'Eco-complexe Sud-Sétifien.

Le cinquième chapitre s'intéresse à l'étude comparative des sols à travers une approche statistique. Ce chapitre analyse les propriétés physico-chimiques des sols des quatre sebkhas en utilisant les différentes approches.

Le sixième chapitre est consacré à l'étude géochimique de la salinité des sols de la région en question.

Ce document de thèse se conclut par une synthèse des principaux résultats obtenus et les suites à donner à cette recherche.

***Chapitre I. Synthèse
bibliographique***

Chapitre I. Synthèse bibliographique

1. Introduction

La salinité et la sodicité sont parmi les processus les plus destructeurs des sols dans les zones arides et semi-arides (Ranjbar et Jalali, 2016). Ces phénomènes affectent l'état chimique, physique et biologique des sols, réduisant ainsi la production agricole et menaçant la sécurité alimentaire. De ce fait, la gestion et la réduction des impacts de la salinisation et de la sodicité nécessitent une compréhension approfondie des mécanismes sous-jacents, ainsi que l'application de pratiques agricoles durables et les technologies de l'agriculture de précision pour restaurer et protéger les sols affectés (Rengasamy, 2006 ; Qadir et al., 2014). Dans ce chapitre nous aborderons les notions fondamentales sur la salinité des sols et la géochimie des milieux salés dans un contexte particulier qui est les zones humides salés.

2. Les sols salins et les sols sodiques

La World Reference Base for Soil Resources (IUSS Working Group WRB, 2022) identifie deux groupes de sols de référence.

Le premier groupe de référence lié à la salinisation est celui « des Solonetz », qui se distingue par un processus de sodisation marqué. Ces sols contiennent un horizon diagnostique « natric », qui apparaît à une profondeur maximale de 100 cm depuis la surface. Cet horizon est une variante de l'horizon « argic », enrichi en argiles par rapport aux couches supérieures. En plus de cette caractéristique, l'horizon natric a une teneur élevée en sodium échangeable, avec un ESP d'au moins 15 %. Dans certains cas, la concentration en magnésium échangeable peut aussi être significative.

Le second groupe, « les Solonchaks », est défini par un processus de salinisation plus prononcé. Ces sols présentent un horizon diagnostique « salic », situé à une profondeur maximale de 50 cm depuis la surface. Cet horizon se caractérise par une forte concentration de sels relativement solubles, supérieurs à ceux du gypse. Son critère principal est une CE (conductivité électrique à 25°C) d'au moins 15 dS/m, ou, si le pH de l'extrait de pâte saturée est supérieur à 8,5, une CE d'au moins 8 dS/m.

Les sols salés sont caractérisés par la présence de sels hydrosolubles, notamment le sodium, le potassium, le chlorure et le sulfate. Certains ions, comme le K^+ et le SO_4^{2-} , agissent comme éléments nutritifs pour les plantes, tandis que le Na^+ et le Cl^- ne le sont pas. Par conséquent, la salinité du sol porte souvent sur le Na^+ et le Cl^- (Qadir et al., 2007 ; Stavi et al., 2021).

Par ailleurs, la salinité des sols constitue une cause majeure de la désertification des sols méditerranéens, suite aux activités humaines telles que l'extension de l'irrigation non réglementée avec des eaux salées.

L'abondance en gypse et en équivalent de carbonate de calcium, rapportée par Mees et al. (2012), Domínguez-Beisiegel et al. (2013b), ou par Herrero et Castañeda (2013), plus les quantités non déterminées d'autres composants, par exemple la matière organique et le quartz ou d'autres minéraux détritiques, réduisent la proportion et le rôle des argiles minéralogiques (Herrero et Castaneda, 2009 ; Casby-Horton et al., 2015) dans les sols. Le SAR reflète les quantités relatives de Na^+ par rapport aux antagonistes Ca^{++} et Mg^{++} , qui peuvent influencer la tolérance au sel des plantes (Herrero et Castañeda, 2015).

Cependant, dans différentes parties du monde, diverses terminologies ont été utilisées pour désigner les sols sodiques et salins-sodiques, telles qu'alcali, alcali noir, solonetz et slick-spot. Les sols alcalins se caractérisent par une forte sodicité ($ESP > 15$) et un pH élevé ($pH > 8,3$), contenant des ions carbonate soluble (CO_3^{2-}) de bicarbonate (HCO_3^-) et de Na^+ . Les concentrations de Na^+ y sont supérieures aux niveaux correspondants de chlorure (Cl^-) et de sulfate (SO_4^{2-}), soit un rapport $Na^+ / (Cl^- + SO_4^{2-})$ supérieur à 1 (Stavi et al., 2021). Alternativement, le rapport $(2CO_3^{2-} + HCO_3^-) / (Cl^- + 2SO_4^{2-})$ est supérieur à 1 dans la phase de solution du sol (Chhabra, 2005).

Ces sols sont caractérisés par la dominance de Na^+ et $CO_3^{2-} + HCO_3^-$ et ont tendance à avoir des salinités faibles et des valeurs de pH élevées, ce qui entraîne un gonflement et une dispersion de l'argile (Gupta et al., 1984). Les sols sodiques peuvent être salins ou non salins (Qadir et al., 2007).

La salinité et la sodicité impactent la croissance des plantes en affectant l'absorption d'eau, la disponibilité des nutriments, imposent une toxicité aux plantes (Ayers et Westcot, 1985 ; Litalien et Zeeb, 2020), et détériorent les conditions physiques du sol (Driessen et al., 2001 ; Stavi et al., 2021).

2.1. Les processus de salinisation et de sodisation des sols

Les sols affectés par le sel se caractérisent par des niveaux excessifs de sels solubles (salinité) et/ou de Na^+ en solution ainsi que sur le complexe d'échange de cations (sodicité). Les sels et le Na^+ proviennent soit de l'altération des minéraux parentaux soit des activités anthropiques, impliquant la gestion inappropriée des terres et des ressources en eau (Qadir et al., 2007).

La salinisation constitue un facteur limitant majeur pour la production agricole dans les zones arides (Sparks, 2003 ; Li et al., 2012 ; Daliakopoulos et al., 2016). L'eau souterraine salée peut atteindre les couches supérieures du sol, apportant des sels à ces couches superficielles. Dans ces régions, les sols mal drainés favorisent une évaporation excessive, entraînant des dépôts de sel à la surface du sol (Mateo-Sagasta et Burke, 2011 ; Van Beek et Tóth, 2012 ; Daliakopoulos et al., 2016).

2.2. Salinisation en zones arides et semi-arides

À l'échelle mondiale, la salinisation des sols est une préoccupation croissante, en particulier dans les zones arides et semi-arides. Ghassemi et al. (1995) rapportent que dans les années 1990, 20 % des terres irriguées étaient affectées par la salinisation, avec des taux particulièrement élevés en Égypte (33 %) et en Iran (29 %). Les plus grandes surfaces de terres irriguées salinisées se trouvaient en Inde et en Chine, représentant respectivement 17 % et 15 % de leur superficie cultivée, avec 7 millions d'hectares en Inde et 6,7 millions d'hectares en Chine.

Les recherches récentes montrent une augmentation continue de la salinisation des sols au cours des dernières décennies. Ivushkin et al. (2019), dans leur étude par télédétection, ont cartographié la progression des terres salines mondiales, constatant une augmentation de la superficie des terres affectées par la salinité, de 915,5 millions d'hectares en 1986 à 1 069,3 millions d'hectares en 2016. D'autres études, telles que celles de Shrivastava et Rajesh (2015) et Singh (2015), révèlent que 33 % des terres irriguées et 20 % des terres agricoles mondiales sont affectées par la salinisation.

Les projections pour 2050 estiment que 50 % des superficies agricoles mondiales seront touchées par la salinisation à divers degrés (Jamil et al., 2011), avec une extension des sols sodiques (Qadir et al., 2007 ; Stavi et al., 2021). La salinisation et la sodicité des sols sont des contraintes environnementales majeures qui ont des impacts négatifs graves sur la productivité

agricole et la durabilité des terres dans les régions arides et semi-arides. Plusieurs études (Suarez, 2001 ; Pitman et Lauchli, 2002 ; Qadir et al., 2006) soulignent que ces phénomènes sont des facteurs majeurs de dégradation des terres, menaçant la sécurité alimentaire et la durabilité des systèmes agricoles à l'échelle mondiale.

La salinisation des sols en zones arides et semi-arides d'Algérie est un phénomène majeur, avec une grande variété de sols salins, notamment les sols salins, gypseux et calcaires. Remili (2019) rapporte que les sols salins sont particulièrement présents dans la région saharienne et dans des zones comme la Vallée d'Oranie, la Vallée d'El Menia, et les hautes plaines au sud de Sétif et de Constantine, notamment près des Chotts et des Sebkhass. Selon les travaux de Halitim (1985) plus de 95 % des sols dans ces régions sont de nature calcaire, gypseuse ou salsodique, ce qui fait des sels un élément omniprésent dans les paysages arides de l'Algérie.

Les sols gypseux se rencontrent principalement dans les dépressions telles que les Chotts, où ils sont en partie recouverts de couches de sable éolien riches en gypse et en silice, accompagnées d'une végétation adaptée aux conditions gypseuses et halophiles (Djili et Daoud, 2000). Ces zones présentent des croûtes salines en surface, dont l'épaisseur varie de quelques millimètres à un mètre, avec une variation de la couleur des croûtes en fonction des fluctuations du niveau des nappes phréatiques. En période sèche, des bosses à structure lamellaire recouvertes d'une croûte saline vitreuse se forment, particulièrement dans les zones subdésertiques, où les sols sont fortement salins et souvent argileux.

L'étude de Hamdi-Aissa et al. (2004) révèle que la salinité des sols dans ces régions est influencée par des processus géochimiques complexes. Lors de l'évaporation, des minéraux comme la calcite, le gypse et l'halite précipitent, et dans des environnements hyperarides, des minéraux spécifiques comme la basanite et l'hexahydrate peuvent se former. Cela distingue ces écosystèmes arides des autres, en raison de la présence de minéraux caractéristiques de conditions extrêmes.

Douaoui et al. (2004) et Douaoui (2005), dans leurs travaux sur les sols irrigués du bas Chélif, ont observé que l'augmentation de la sodicité diminue la perméabilité des sols et favorise la dispersion des particules. Toutefois, ils notent que la réduction de la sodicité ne permet pas une réversibilité totale des propriétés structurelles, bien que les cycles de d'humectation et dessiccation puissent améliorer la structure du sol. Cela souligne la sensibilité des sols à la salinité, nécessitant des pratiques de gestion adaptées pour maintenir la qualité des sols.

Les travaux de Daoud et Halitim (1994) et Ziza et al. (2012) sur l'agriculture saharienne révèlent que l'irrigation avec des eaux chargées en sel entraîne une salinisation rapide des sols, ce qui diminue les rendements des cultures, notamment du blé. Ces recherches soulignent l'importance de mettre en place des stratégies de gestion de l'eau, de drainage et des pratiques agricoles appropriées pour réduire la salinisation.

Les recherches menées par Djamaï (2007) sur le lac Fetzara et par Laoufi (2010) sur le bas Chélif concernant les processus géochimiques de la salinisation des sols révèlent que le faciès chimique dominant est le faciès chloruré sodique. Selon ces études, trois processus principaux contrôlent la salinisation : la précipitation et dissolution des minéraux, les échanges ioniques, et les réactions d'oxydo-réduction. Par ailleurs, les auteurs indiquent que la salinité suit une voie saline neutre. Ce résultat est également confirmé par Ouamer-Ali et al. (2018) dans le bas Chélif et par Abdennour et al. (2021) à Biskra.

2.3. Impact du climat sur la salinisation et la sodisation

Contrairement aux climats humides, où les cations et les anions sont généralement lessivés du sol et transportés vers des terrains plus bas ou des aquifères souterrains (Metternicht et Zinck, 2008), les climats arides, semi-arides et subhumides présentent des dynamiques différentes. Dans ces climats, les cations tendent à rester dans le complexe d'échange du sol ou à précipiter sous forme de minéraux secondaires lorsque la concentration ionique atteint la saturation d'un sel donné.

Les sels les moins solubles, tels que le carbonate de calcium (CaCO_3), le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et la magnésite (MgCO_3), précipitent facilement dans des conditions arides et semi-arides. Cette précipitation augmente la proportion relative d'ions Na^+ en solution, remplaçant ainsi certains ions Ca^{++} et Mg^{++} échangeables par Na^+ sur le complexe d'échange (Bui, 2017). Ce processus entraîne une augmentation de l'ESP (Exchangeable Sodium Percentage) et conduit à la sodisation des sols.

Dans des conditions arides, l'évaporation tend à concentrer la solution aqueuse, permettant la précipitation de sels plus solubles que le gypse. Ces sels incluent les carbonates de sodium (trona, nahcolite, thermonatrite), les sulfates de sodium (par exemple, thenardite), les sulfates de magnésium (par exemple, epsomite), le chlorure de potassium (sylvite), les chlorures de magnésium (par exemple, bischofite) et le chlorure de sodium (halite). Ces sels, plus solubles

que le gypse, sont appelés « sels solubles » et constituent les minéraux diagnostiques définissant les sols salins (IUSS Working Group WRB, 2022 ; Stavi et al., 2021).

L'évaporation joue un rôle crucial dans l'enrichissement en sels des eaux souterraines lorsque le niveau de la nappe phréatique est bas et que les conditions climatiques favorables à l'évaporation dépassent les précipitations, tandis que le lessivage des sels accumulés est absent ou faible (Cary et al., 2015). Ce phénomène est particulièrement prononcé dans les bassins fermés en régions arides et semi-arides (Wagner, 2011 ; Herrera et al., 2016).

Dans ces bassins fermés, les eaux souterraines salées évoluent via une combinaison de dissolution et de précipitation de minéraux facilement solubles tels que la calcite, l'halite et le gypse le long des trajectoires d'écoulement et d'évaporation. Au cours du processus d'évaporation, l'eau passe de l'état liquide à l'état de vapeur, ce qui entraîne une augmentation significative de la salinité des eaux souterraines dans le bassin central (Richter et Kreitler, 1993 ; Li et al., 2020).

2.4. Effets de la salinité et de la sodicité sur les propriétés physiques du sol

Le sodium et d'autres ions sont des produits de l'altération de minéraux primaire. Cette altération libère des cations et des anions solubles tels que : Ca^{++} , K^+ , Mg^{++} , Na^+ ; et HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{--} (Sverdrup et Warfvinge, 1988 ; Stavi et al., 2021).

Dans les sols sodiques, une concentration élevée de Na^+ peut déplacer des cations tels que Ca^{++} et Mg^{++} et prend leur place sur le complexe adsorbant, entraînant une dégradation structurelle significative des argiles. Le sodium échangeable, étant hydrolysé, affaiblit les liaisons entre les particules du sol, provoquant un gonflement et une dispersion accrues, augmentant ainsi la susceptibilité à l'érosion hydrique et éolienne (Paix et al., 2013). En séchant, ces sols deviennent denses et compacts, formant des croûtes qui empêchent l'enracinement et l'émergence des semis. Les sols riches en argile montmorillonitique se fissurent.

La genèse de certains sols conduit à des horizons sodiques, souvent avec une structure en colonnes, réduisant leur capacité de stockage d'eau, leur aération, et augmentant la résistance au cisaillement, les rendant sujets à l'érosion par tunnel (DNR, 1997 ; Daliakopoulos et al., 2016).

La sodicité affecte principalement la fraction argileuse, caractérisée par des particules de moins de 2 µm de diamètre. En suspension aqueuse, la charge négative sur les particules d'argile est neutralisée par des ions hydratés de charge opposée, formant une double couche diffuse. L'épaisseur de cette couche dépend des cations échangeables et de la concentration en électrolytes de la solution du sol (Van Olphen, 1977).

Lorsque deux colloïdes d'argile se rapprochent, leurs doubles couches diffuses se chevauchent, activant des forces de répulsion électrique, ou "pression de gonflement". Ce processus diminue lorsque la concentration en électrolytes et la valence des cations échangeables augmentent. Par exemple, la montmorillonite dominée par Na⁺ gonfle librement dans des solutions électrolytiques diluées, tandis que des cations divalents tels que Ca⁺⁺ réduisent le gonflement (Blackmore et Miller, 1961 ; Shainberg et Letey, 1984 ; Sposito, 1984). Les cations divalents se lient plus fortement aux composés argileux chargés négativement que les cations monovalents, ces derniers, particulièrement le Na⁺, formant des nuages positivement chargés plus importants, favorisant la dispersion de l'argile (Stavi et al., 2021).

La dégradation des sols sodiques passe par plusieurs étapes. Initialement, les agrégats secs sont solides, mais l'application d'eau provoque une humidification et des réactions d'hydratation, entraînant des forces répulsives entre les particules d'argile et une réduction de leur attraction. Cela conduit à l'éclatement et au gonflement des agrégats (Rengasamy et Sumner, 1998 et Douaoui, 2005). La dispersion des particules d'argile crée une structure instable, réduisant l'infiltration de l'eau et augmentant l'érosion (Nelson et Oades, 1998).

Les agrégats en surface sont plus vulnérables aux processus de dégradation en raison de l'absorption rapide de l'eau, de la libération de l'air emprisonné, et de l'impact mécanique de l'eau appliquée par l'irrigation ou les précipitations (Oster et Jayawardane, 1998). La désintégration des agrégats du sol et la dispersion des particules d'argile mènent à la formation de croûtes structurales, réduisant l'infiltration et augmentant le ruissellement et l'érosion. Le durcissement affecte l'ensemble du profil du sol, créant des conditions compactes et dures (Qadir et al., 2007).

La sodisation détériore la structure du sol, réduisant l'infiltration de l'eau et la pénétration de l'air dans le profil du sol, limitant ainsi la disponibilité en eau et en oxygène pour les plantes ainsi que pour l'ensemble du réseau alimentaire du sol (Communautés européennes, 2009). De

plus, des teneurs élevées en Na^+ peuvent affecter négativement la nutrition des plantes (Alexandre et al., 2018).

En outre, la salinité est fréquemment liée à une humidité prolongée et à l'absence de couverture végétale, ce qui accroît la sensibilité des sols à l'érosion (Renaud et al., 2015 ; Li et al., 2020). Les sols salés subissent une perte de matière organique due à la diminution de la fertilité et des activités microbiennes et enzymatiques (Singh, 2015), ce qui réduit la production de biomasse et affecte la distribution et la stabilité des agrégats du sol (Six et al., 2000). Ces changements augmentent la dispersion des particules d'argile et les taux d'érosion, aggravant ainsi les pertes de matière organique (Paix et al., 2013 ; Daliakopoulos et al., 2016).

La dégradation des sols résultant de la salinité et/ou de la sodicité est une contrainte environnementale majeure ayant des impacts négatifs sévères sur la productivité agricole et la durabilité, notamment dans les régions arides et semi-arides du monde en général (Tanji, 1990 ; Suarez, 2001 ; Pitman et Lauchli, 2002 ; Qadir et al., 2006) et d'Algérie en particulier (Daoud et Halitim, 1994 ; Douaoui, 2005 ; Djamaï, 2007 ; Laoufi, 2010 ; Hadj Miloud et al., 2018 ; Ouamer-ali et al., 2018 ; Iddi, 2019).

2.5. La distribution verticale de la salinité des sols

Une vaste littérature explore la surveillance des zones humides salines par le biais de capteurs à distance. Cependant, Li et al. (2013) ont souligné que peu de littérature est disponible sur la variabilité tridimensionnelle des sols, particulièrement en zones humides salines. Ils précisent que ces technologies ne fournissent pas d'informations sur la distribution verticale de la salinité. De plus, elles ne permettent pas de mesurer directement la salinité du sol, car la réponse des capteurs est souvent perturbée par la végétation, les efflorescences, l'humidité du sol ou d'autres facteurs variables. Les techniques d'induction électromagnétique, quant à elles, présentent des limitations pratiques, notamment dans les zones boueuses où les nappes phréatiques sont peu profondes, comme c'est souvent le cas dans les zones humides (Metternicht et Zinck, 2003 ; Herrero et Castañeda, 2015). D'où la nécessité de réaliser des études de terrain pour avoir une information précise sur les mouvements des sels dans ces milieux particuliers.

Dans la littérature il existe plusieurs méthodes de surveillance de la salinité en zones humides salées (Hachemi et al., 2020). Les capteurs à distance soulignent plusieurs limitations notables.

En effet, ces méthodes ne fournissent pas d'informations sur la distribution verticale de la salinité. De plus, la réponse des capteurs est influencée par la couverture végétale, les efflorescences salines, l'humidité du sol et d'autres facteurs variables. Les techniques d'induction électromagnétique présentent également des inconvénients pratiques, notamment dans les zones boueuses avec des nappes phréatiques peu profondes, comme c'est le cas pour les zones humides. Pour cela des études sur le terrain sont essentielles pour confirmer les données proximales et celles détectées à distance (Metternicht et Zinck, 2008). L'étude de la variabilité tridimensionnelle en matière de salinité des sols est cruciale pour obtenir des preuves irréfutables en matière d'alertes environnementales (Li et al., 2013 ; Herrero et Castañeda, 2015).

Plusieurs facteurs peuvent provoquer des variations de la conductivité électrique (CE) des sols en zones humides, tels que les précipitations, les fluctuations du niveau de la nappe phréatique et les ruissellements de surface salés causés par des matériaux salins affleurant dans les zones élevées du paysage.

La distribution quantitative de la salinité permet de définir indépendamment les types de sol (Servant, 1973, 1975). Le profil salin peut servir à la fois de descripteur du niveau de salinité le long du profil pédologique et d'indicateur de la dynamique des solutions salines sous l'influence des facteurs environnementaux (Servant, 1976). Selon cet auteur, quatre formes principales peuvent être distinguées : la Forme A, où la distribution saline est maximale dans l'horizon superficiel, typique des sols nus ou à faible couverture végétale avec des textures moyennes, limoneuses ou limono-sableuses ; la Forme B, où la distribution saline est marquée à une profondeur moyenne, observée sous les pelouses et prairies des terrains salés maritimes ou continentaux ; la Forme D, où la salinité augmente régulièrement avec la profondeur, présente en hiver comme en été dans les zones salées maritimes ou continentales, indiquant un processus de salinisation contrariée si la salinité est élevée, ou un processus permanent de désalinisation ; et la Forme C, intermédiaire entre A et B/D, avec un maximum de salinité en surface (0-5 cm ou 0-10 cm) correspondant à la reprise du processus ascendant de salinisation après une période de désalinisation, et un autre maximum à plus d'un mètre de profondeur, observé dans les secteurs salés inondables en dehors des périodes d'inondation.

2.6. Mise en valeur des sols salins et des sols sodiques

Les sols sodiques et salins-sodiques peuvent être améliorés en remplaçant l'excès de sodium sur le complexe adsorbant par du calcium. Pour ce faire, une source de Ca^{++} est fournie, et le sodium déplacé est ensuite lessivé hors de la zone racinaire grâce à l'application d'un excès d'eau d'irrigation. Ce processus nécessite non seulement des quantités suffisantes d'eau, mais également un écoulement adéquat à travers le profil du sol. Des systèmes de drainage, qu'ils soient naturels ou artificiels, sont essentiels pour assurer la gestion durable de l'eau de drainage (Rhoades et Loveday, 1990 ; Oster et al., 1999).

Dans de nombreux sols sodiques et salins-sodiques, la calcite (CaCO_3) est présente à différentes profondeurs du profil du sol. La calcite peut provenir du matériau parental ou se former in situ par précipitation, souvent sous forme de revêtements sur les particules du sol. Cependant, sa solubilité relativement faible (0,14 mmol /l) signifie que sa dissolution naturelle ne fournit pas suffisamment de Ca^{++} pour améliorer le sol à des pressions partielles de CO_2 typiques de l'atmosphère. La dolomite, un autre minéral contenant du calcium, est également fréquente, mais elle est encore moins soluble que la calcite. D'autres minéraux carbonatés, plus solubles comme la vaterite, l'aragonite ou les hydrates de CaCO_3 , ne se forment généralement pas dans les sols (Suarez et Rhoades, 1982).

Pour cela, l'amélioration des sols sodiques s'effectue principalement par l'application du le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), amendement chimique, largement utilisé car il fournit une source soluble de Ca^{++} , permettant ainsi de remplacer efficacement l'excès de Na^+ dans le complexe d'échange du sol. D'autres amendements, tels que l'acide sulfurique (H_2SO_4), sont employés pour augmenter la vitesse de dissolution de la calcite et libérer davantage de Ca^{++} dans la solution du sol (Rhoades et Loveday, 1990 ; Oster et al., 1999). Cette pratique séculaire de gestion des sols sodiques par l'utilisation d'amendements chimiques, en particulier le gypse, est répandue dans le monde entier.

3. Les zones humides salées

3.1. Définition et caractéristiques des zones humides et des lacs salés

Selon Remili (2019), les grandes dépressions endoréiques d'Afrique du Nord sont souvent désignées par les termes « Chotts » ou « Sebkhas ». En Afrique du Sud, aux États-Unis et en

Australie, on les appelle « Salt pans » ; en Amérique du Sud, « Salinas » ou « salares » ; au Mexique, « Playa » ; et en Asie, leurs appellations varient selon la région, par exemple « Kévin » en Iran et « Nor » en Mongolie (Joly, 2006). En géographie française, les termes arabes « Sebkhah » et « Chott » ont été intégrés avec des significations spécifiques. Coque et al. (1972) indiquent que le terme « sebkha » fait référence à un lac salé, avant d'être défini plus précisément comme une cuvette à fond plat, sujette à des inondations temporaires et dépourvue de végétation. Le « Chott », quant à lui, désigne une steppe halophile qui entoure la sebkha, servant de pâturage pour les chameaux. Cependant, Stone (1967) décrit les sebkhas comme des lacs salés, tandis que Dubost (2002) décrit le Chott comme une zone saline entourant la sebkha, la partie humide de la dépression.

Le terme « sebkha », d'origine arabe, est employé dans le Sahara pour désigner des dépressions fermées en forme de cuvette, inondées périodiquement et où les sels s'accumulent. Selon Schultz et al. (2002), ce mot est largement utilisé en Afrique du Nord, en Amérique du Nord, au Proche-Orient et en Afrique de l'Ouest. En Afrique du Sud, on les appelle également « Trémies » (Direy, 1960). Au Maghreb, le terme « Chott » est couramment utilisé pour décrire ces formations (Incorvaia, 2004). Aubert (1976) précise que, durant la saison sèche, les Chotts en Afrique du Nord sont des étendues salées recouvertes de croûtes salines, alors que pendant la saison des pluies, seuls les bords boueux et moins salés restent visibles. Malgré des différences dans leurs définitions, ces zones (Chott, Sebkhah, Garaet) sont généralement considérées par les géographes, scientifiques et biologistes comme des dépressions fermées équivalentes à des lacs salés.

La convention de Ramsar 1971 (Ramsar, 2013), définit les zones humides comme : « des étendues de marais, de fagnes, de tourbières, ou d'eaux naturelles ou artificielles, permanentes ou temporaires, où l'eau est stagnante ou courante, douce, saumâtre ou salée, y compris des étendues d'eau marine dont la profondeur à marée basse n'excède pas six mètres ».

Les lacs salés, présents dans toutes les régions continentales d'Asie, d'Amérique, d'Australie, d'Europe et d'Afrique, occupent environ 30 % de la surface terrestre mondiale (Gratzfeld, 2004). Il s'agit d'écosystèmes aquatiques intérieurs (Donaire, 2000) sans connexion avec l'environnement marin ou étaient autrefois connectés à la mer mais se sont asséchés avant d'être de nouveau inondés par des sources non marines (Williams, 2002). De nombreux lacs salés sont des bassins endoréiques d'origine tectonique, bien que certains puissent déborder

périodiquement pendant des moments de niveaux d'eau élevés causés par des pluies intermittentes (Britton et Crivelli, 1993).

Les lacs salés, tels que les chotts et sebkhas, sont communs dans les régions sèches du monde où l'évaporation est élevée et les précipitations sont rares (précipitations annuelles moyennes entre 25 et 200 mm) et semi-arides (précipitations annuelles entre 200 et 500 mm) (Williams, 1998). Ils peuvent être des plans d'eau permanents ou temporaires (Williams, 2001).

Les chotts et sebkhas sont des écosystèmes particuliers. La forte salinité des eaux et des sols, due principalement à une évaporation intense, de faibles précipitations et un drainage limité, constitue une contrainte pour le développement des espèces végétales. Cependant, une végétation steppique halophile a réussi à s'adapter à ces conditions. Depuis longtemps, les terres entourant les sebkhas ont constitué de bons pâturages pour l'élevage grâce aux espèces résistantes (Dresch, 1954). Bien que la diversité végétale soit limitée, la couverture végétale peut parfois être dense, avec des espèces et des groupements résistants à la salinité et à la sécheresse (Si Bachir, 2008). Les espèces les plus courantes appartiennent aux familles des Chénopodiacées et Zygophyllacées, qui poussent sur des sols salés et légèrement secs.

3.2. Répartition des zones humides en Algérie

L'Algérie possède un grand nombre de chotts, des lacs salés répartis du sud tunisien jusqu'au massif de l'Atlas au nord (Chown et al., 1992 ; Samraoui et al., 2006). En 2009, les sites classés Ramsar en Algérie étaient au nombre de 42, couvrant une superficie de 2,959 millions d'hectares, dont environ 45,23 % (soit 2,07886 millions d'hectares) sont des lacs salés (Koopmanschap et al., 2011). Géographiquement, les chotts algériens se situent entre l'Atlas Tellien au nord et l'Atlas Saharien au sud, s'étendant également dans les régions de l'Erg Occidental et de l'Erg Oriental. Ils se distribuent d'est en ouest, notamment dans le complexe de chotts de l'est des hauts plateaux (Oum El Bouaghi), le chott Hodna, le Zahres Chergui et Gherbi au centre, ainsi que le chott Chergui, la sebkha de Naâma, la sebkha d'Oran et les salines d'Arzew à l'ouest. Dans le Sahara septentrional, on trouve aussi le Grand Erg Oriental, le chott Melghir et le chott Merouane au nord-est du Sahara, ainsi que les chotts de Ain Beida, Oum Raneb, Sidi Amrane et Safioune dans la région de Ouargla. D'autres, comme la sebkha El Melah, se trouvent dans la zone du Grand Erg Occidental, près de Ghardaïa. La taille et la profondeur de ces chotts varient fortement : leur superficie atteint parfois plusieurs milliers d'hectares, le plus grand s'étendant sur 55 150 ha et le plus petit sur 76 ha. En période hivernale,

ils peuvent atteindre plusieurs mètres de profondeur, mais celle-ci diminue considérablement en saison sèche, variant de 20 cm à plus de 4 m (D.G.F, 2004).

La diversité des zones humides en Algérie résulte de sa position géographique et de ses conditions climatiques variées, avec plus de 254 sites répertoriés. La région du Nord-Ouest et les hautes plaines steppiques se caractérisent par une grande variété de plans d'eau, comprenant des lacs salés comme les chotts et des eaux douces peu profondes comme les dayas. La partie nord-est du pays abrite de nombreux lacs salés tel que Sebkhet El Hamiet, Chott el Frain, Sebkhet Bazer et Chott El Beida qui représente notre zone d'étude, des lacs d'eau douce, des marais, des ripisylves et des plaines d'inondation, tandis que le Sahara recèle des oasis et des sites remarquables alimentés par des sources d'eau permanentes appelées gueltas, présentes dans les réseaux hydrographiques des massifs montagneux du Tassili et du Hoggar.

3.3. La salinisation dans les zones humides

Les saumures des lacs salés proviennent principalement de trois sources : la précipitation directe, l'écoulement de surface ou l'eau souterraine. Les eaux souterraines peuvent être issues de systèmes météoriques locaux ou régionaux, de l'eau interstitielle des sédiments, ou encore de fluides basaux et hydrothermaux provenant de grandes profondeurs. En particulier dans les chotts et sebkhas, les eaux interstitielles sont souvent plus concentrées que les eaux de surface, car elles interagissent constamment avec les minéraux et les roches, modifiant ainsi leur composition chimique par rapport à celle des eaux sources.

L'évaporation de ces eaux entraîne la concentration des minéraux dissous, formant des évaporites. Alors que les formations salines actuelles sont principalement constituées d'évaporites continentales, au fil des éons géologiques, de vastes volumes d'évaporites se sont accumulés dans d'immenses bassins, en raison de processus tectoniques, eustatiques et d'hydrogéochimie spécifique (Tremblay et al., 2007). Dans ces régions, les sels tels que les borates, nitrates et carbonates de sodium se déposent particulièrement dans les bassins endoréiques, propres aux zones sahariennes semi-arides à arides. Parmi les minéraux évaporitiques les plus fréquents, on trouve le gypse, l'anhydrite et la halite.

Plusieurs types de formations géologiques servent de source aux sels solubles. Les eaux de ruissellement et de drainage, chargées en éléments solubles, descendent vers les zones basses des bassins versants. À partir de là, deux scénarios peuvent se produire :

- Si le bassin versant a un exutoire, les sels se déplacent plus bas, comme c'est le cas dans les zones agricoles.

- Si le bassin versant est endoréique, une sebkha se forme dans la zone la plus basse, comme la sebkha de N'goussa. Ce phénomène se manifeste toute l'année dans les secteurs arides des chotts sahariens, tels que les chotts Merouane, Melghir et Baghdad, qu'ils soient d'origine naturelle ou causés par l'irrigation.

D'un point de vue géochimique, au fur et à mesure que les solutions d'eaux de surface, souterraines ou interstitielles se concentrent, elles suivent la voie saline neutre. En augmentant le facteur de concentration, certains sels précipitent dans un ordre défini (calcite, gypse, etc.), le NaCl se précipitant en dernier lieu.

Dans les régions arides et semi-arides, notamment les chotts et sebkhas, le lessivage et le transport des sels dissous vers les couches profondes sont limités, tandis que l'évapotranspiration élevée favorise la concentration des sels dans le sol. L'accumulation de sels solubles dans les sols irrigués résulte de plusieurs facteurs, tels que l'irrigation avec des eaux de mauvaise qualité, un lessivage insuffisant, un drainage inefficace, un taux élevé d'évaporation et des remontées de nappes phréatiques. Lorsqu'un excès de sels solubles s'accumule dans les sols, un échange se produit entre les ions Na^+ et les ions Ca^{++} et Mg^{++} fixés sur les minéraux argileux, entraînant un phénomène d'alcalinisation. Il faut une quantité significative de Na^+ pour que cette adsorption se produise sur les argiles. Lorsque la solubilité de Ca^{++} et Mg^{++} est dépassée en raison de l'évaporation, ces ions précipitent. Au-delà d'un seuil de 15 % de Na^+ échangeable, les sols deviennent alcalins, dégradant ainsi leurs propriétés physiques.

Dans les zones humides, l'évaporation est la principale cause de la salinisation des sols (Guan et Liu, 2003 ; Zarroca et al., 2011). Ce phénomène est aggravé par des sécheresses fréquentes et des précipitations irrégulières (Zovko et al., 2018 ; Yuan et al., 2019). La salinisation des sols en zones humides est également due au transport des sels d'une nappe phréatique salée vers la surface par capillarité, ce qui est facilité par l'évaporation (Yu et al., 2014). Cela entraîne une teneur excessive en sels, affectant la qualité du sol, la croissance des plantes, la biodiversité et le rendement des cultures (Bui, 2013 ; Aragüés et al., 2014 ; Cassel et al., 2015 ; Ma et al., 2017 ; Chi et al., 2018a ; Ma et al., 2018 ; Wang et al., 2018).

La salinité des sols a un impact majeur sur la végétation des zones humides, modifiant les types de végétation selon le gradient de salinité des sols (Wang et al., 2007). Ce phénomène menace la santé des écosystèmes des zones humides, en affectant à la fois le sol et la végétation (Chen et al., 2012 ; Yu et al., 2014). De plus, la salinité des sols varie en fonction des saisons, en raison de facteurs naturels et humains changeants (Adrover et al., 2017 ; Walter et al., 2018). Les conditions climatiques, les apports fluviaux, les inondations, les niveaux des eaux souterraines et les pratiques agricoles varient d'une saison à l'autre, entraînant des fluctuations saisonnières de la salinité des sols dans les zones humides (Mhaimed et al., 2013 ; Yu et al., 2013 ; Liu et al., 2014 ; Chi et al., 2018a ; Salehin et al., 2018 ; Yuan et al., 2019).

Les zones humides des régions arides et semi-arides sont particulièrement vulnérables à la salinisation primaire et secondaire en raison de leur topographie basse, propice à l'accumulation des écoulements d'eau de surface. Les processus de salinisation dans ces régions sont influencés par les dynamiques entre les eaux souterraines et de surface. Pendant les périodes de sécheresse, les eaux souterraines peu salées peuvent avoir des effets bénéfiques, en remplaçant l'eau de surface évaporée et en maintenant une salinité modérée. Cependant, lorsque les eaux souterraines sont salines et que le niveau de la nappe phréatique augmente à la suite de changements dans l'utilisation des terres ou de régulations fluviales, la salinité en surface peut être considérablement affectée (Jolly et al., 2008).

3.4. Relation salinité- végétation - matière organique dans les zones humides

La salinité et la sodicité des sols influencent considérablement la croissance des plantes par divers mécanismes. Directement, elles affectent l'absorption d'eau par les plantes, réduisent la disponibilité des nutriments essentiels et exercent une toxicité potentiellement délétère pour les plantes (Litalien et Zeeb, 2020). Indirectement, ces facteurs contribuent à la dégradation des propriétés physiques du sol, entravant ainsi la croissance des racines et l'infiltration de l'eau (Driessen et al., 2001 ; Stavi et al., 2021).

Des niveaux élevés de salinité sont souvent accompagnés par une augmentation des concentrations de contaminants inorganiques tels que le sulfate (Avrahamov et al., 2014), le bore (Deng et al., 2009), le fluorure (Li et al., 2019), le sélénium (Ait Mechedal et al., 2024 ; Santucci et al., 2016) et l'arsenic (Rango et al., 2013).

Certains ions présents dans le sol, tels que le potassium (K^+) et le sulfate (SO_4^{2-}), sont bénéfiques pour les plantes en tant qu'éléments nutritifs. En revanche, des ions comme le sodium (Na^+) et le chlorure (Cl^-) sont souvent responsables de la salinité problématique du sol, lorsque leurs concentrations sont relativement élevées.

Sur le terrain, la salinisation se manifeste visiblement par l'apparition de croûtes de sel blanches, des efflorescences salines à la surface du sol, d'une texture du sol pelucheuse. Elle affecte également la végétation en provoquant des changements dans l'écologie végétale le long des gradients de salinité, par la croissance spontanée des halophytes (Wang et al., 2007). Elle se manifeste aussi par une germination hétérogène ou quasiment absente, des brûlures foliaires et une réduction de la vigueur des plantes. Une détérioration des zones touchées après les précipitations et un engorgement en eau, qui est dû à une obstruction des pores (Shahid et al., 2018a).

La présence des sels hydrosolubles dans la solution du sol augmente le potentiel osmotique, réduisant ainsi le potentiel hydrique du sol, et le rapprochant de celui des racines des plantes. Ce phénomène ralentit l'absorption d'eau par les racines, entraînant un stress hydrique pour les plantes. Bien que les racines puissent activer le pompage d'eau du sol, ce processus requiert une dépense énergétique significative, ce qui affecte négativement la production de la biomasse (Ayers et Westcot, 1985 ; Stavi et al., 2021).

3.5. Importance et menaces des zones humides en Algérie

Les zones humides figurent parmi les écosystèmes les plus riches et les plus productifs au monde (Brander et al., 2006). En Algérie, la grande variabilité des conditions climatiques et géologiques favorise une diversité d'écosystèmes aquatiques, tels que les lacs, les rivières, les chotts et les sebkhas. Toutefois, ces environnements sont soumis à des perturbations écologiques, mettant en évidence l'importance de reconnaître leurs fonctions et leur valeur écologique.

D'une part, les zones humides méditerranéennes sont très exposées à la dégradation (Morgan et Boy, 1982). Localisées majoritairement dans des régions arides et semi-arides (Williams, 1998), elles représentent environ 30 % des terres émergées (Gratzfeld, 2004). Depuis 1971, le traité international Ramsar sensibilise le public à leur valeur écologique. Ces milieux jouent un rôle capital en fournissant des services écosystémiques essentiels tels que la régulation des

cycles de l'eau, la recharge des nappes phréatiques et l'atténuation des inondations. Les chotts en Afrique du Nord, y compris en Algérie, servent de bassins de décharge pour les systèmes aquifères, aidant à maintenir les niveaux d'eau et à prévenir la désertification, tout en abritant une grande diversité de crustacés, d'oiseaux migrateurs et de plantes halophytes (Demnati et al., 2020).

D'autre part, ces zones sont des sites d'extraction de minéraux importants comme le sel (Remili, 2019) et le carbonate de sodium, utilisés dans l'industrie alimentaire et pharmaceutique (Williams, 2002).

Les zones humides telles que les chotts et les sebkhas fournissent de nombreux services écosystémiques essentiels à l'agriculture et à la biodiversité. Elles jouent un rôle crucial dans les fonctions biogéochimiques en régulant les pollutions azotées diffuses lorsque les conditions sont favorables (Pinay et al., 2000). L'absorption de l'azote par les végétaux et la dénitrification, bien que variables dans le temps et l'espace, sont caractéristiques du cycle de l'azote en milieu humide. Clément (2010) a démontré que la performance de la dénitrification peut différer au sein d'une même zone humide en fonction des différents types de sols présents. Elle joue un rôle aussi dans la lutte contre les organismes nuisibles, le cycle des éléments nutritifs, le stockage du carbone et la recharge des nappes phréatiques (Verhoeven et Setter, 2010).

Selon Belagoune et Boutoutaou (2013), l'Algérie, est confronté à des inondations et crues particulièrement destructrices, notamment dans les régions arides et semi-arides. Les inondations des cours d'eau dans ces zones sont moins bien connues ; elles se caractérisent par leur soudaineté, souvent déclenchées par des averses ou des orages. La durée des crues varie de quelques minutes à quelques heures, mais les dégâts humains et matériels qu'elles causent restent importants. En outre, les zones humides agissent à l'échelle du bassin versant comme régulateurs du débit des cours d'eau (Durand et al., 2000). Elles ralentissent l'eau en période de fortes précipitations, évitant ainsi des crues intenses et rapides, et protègent les personnes et les biens des potentielles inondations. Elles contribuent également à la recharge des nappes d'eau souterraines. Lorsque leur capacité de stockage est dépassée, l'eau s'écoule vers l'aval, soutenant les débits d'étiage en période sèche et avantageant la faune, la flore, et l'agriculture par une alimentation continue en eau. Les modifications de ces espaces par des pratiques inadéquates (réseaux de fossés, drainages) impactent leurs fonctions et peuvent avoir des répercussions en aval, notamment sur la qualité et la quantité d'eau (Durand et al., 2000 ; Merot et al., 2000).

Environ 49 % des sites de zones humides protègent contre les inondations ou stockent les eaux de crue, et 21 % facilitent le cycle des éléments nutritifs (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Elles contribuent à la purification de l'eau, la régulation locale du climat, la stabilisation des berges et la protection contre les tempêtes. Ces fonctions écologiques sont essentielles pour maintenir la productivité agricole tout en protégeant l'environnement, soulignant l'importance des zones humides pour une agriculture durable et résiliente.

3.6. Rôle agronomique et menaces alourdie sur les zones humides salines

La salinité et la sodicité représentent deux des processus les plus destructeurs pour les sols, particulièrement dans les régions arides et semi-arides (Ranjbar et Jalali, 2016). Pour minimiser ces impacts, une agriculture durable s'impose, tenant compte des interactions entre les systèmes agricoles et les zones humides. La demande croissante en produits alimentaires, la perte continue de zones humides et leur biodiversité, le changement climatique, la pénurie d'eau, et la pollution des sols constituent des défis majeurs à relever pour la protection de ces milieux.

La reconnaissance de la valeur écologique et économique des zones humides doit être intégrée dans les politiques de gestion des terres. Afin de garantir la pérennité de ces écosystèmes, en continuant à fournir des services essentiels, de soutenir la biodiversité et d'améliorer la résilience des systèmes agricoles face aux changements climatiques (Ramsar, 2013).

Elles contribuent directement à la production agricole en fournissant de la nourriture et des ressources en eau pour l'irrigation agricole et l'aquaculture. Elles fournissent également des pâturages pour le bétail. En Algérie, les chotts sont utilisés pour le pâturage ovin et camelin, soutenant ainsi les communautés locales (Demnati et al., 2020). Selon le service d'information sur les sites Ramsar, RSIS, environ 37 % des zones humides fournissent du fourrage pour le bétail.

Cependant, les zones humides subissent des pressions considérables en raison des pratiques agricoles, affectant plus de 50 % des zones humides d'importance internationale (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). La demande croissante en produits alimentaires, la perte continue de zones humides et leur biodiversité, le changement climatique, la pénurie d'eau, et la pollution des sols sont des défis majeurs à relever pour la protection de ces milieux (Verhoeven et Setter, 2010).

Le drainage, et l'extraction d'eau sont les principales causes de dégradation. L'agriculture intensive entraîne une pollution par les engrais, les pesticides et les effluents d'élevage, augmentant les risques d'eutrophisation et de contamination. La conversion des terres pour l'agriculture contribue également aux émissions de gaz à effet de serre. Les zones humides, qui stockent environ 30 % du carbone du sol mondial, sont drainées, libérant ainsi du CO₂ et réduisant leur capacité de stockage du carbone (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). En Algérie, les chotts sont affectés par la dérivation des flux d'eau, la pollution industrielle, et l'urbanisation. Le ruissellement des eaux agricoles contenant des pesticides et des engrais chimiques contribue à la pollution des eaux souterraines et des chotts, augmentant ainsi les niveaux de salinité et de métaux lourds (Williams, 2002). Les variations climatiques exacerbent la vulnérabilité des zones humides, entraînant des fluctuations extrêmes des niveaux d'eau et affectant la biodiversité (Demnati et al., 2020).

Les sels solubles se dissolvent le long des trajectoires d'écoulement des eaux souterraines. Dans les zones de recharge en haute altitude, lorsque les précipitations s'infiltrent dans le sol, elles rencontrent des roches contenant des sels solubles, rendant l'eau saline. Les eaux souterraines salines peuvent ensuite s'écouler à la surface ou se déplacer horizontalement et/ou latéralement pour devenir partie intégrante d'un système d'écoulement d'eau souterraine douce (Richter et Kreitler, 1993). L'évaporation ultérieure de l'eau salée à la surface entraîne le développement de plaines salées recouvertes de croûtes de gypse et d'halite, c'est le cas dans les sebkhas et les chotts. Dans les systèmes d'écoulement des eaux souterraines, les sels solubles tels que l'halite et le gypse se dissolvent par circulation, augmentant progressivement la salinité globale (Li et al., 2020).

Dans les sebkhas, le mouvement de l'eau joue un rôle crucial dans le processus de salinisation. Ces zones humides, caractérisées par des écoulements limités ou intermittents, subissent une accumulation de sels à la surface ou dans les couches superficielles du sol. L'eau, souvent riche en sels dissous, transporte ces éléments depuis les régions voisines ou les nappes phréatiques vers la sebkha. La direction et l'intensité de ces flux déterminent la quantité de sels acheminée, qui s'accumule progressivement au centre de la sebkha sous l'effet d'une évaporation marquée, typique des climats arides. Cette évaporation favorise la cristallisation des sels, augmentant ainsi leur concentration dans le sol à mesure que l'eau s'évapore. Par ailleurs, l'orientation des flux d'eau provoque une répartition inégale des sels, entraînant une salinité hétérogène au sein

de la sebkha. Cette variabilité impacte les caractéristiques des sols et restreint la diversité végétale aux espèces les plus résistantes à la salinité (Kraiem, 2015 ; Remili, 2019).

Pour minimiser ces impacts négatifs, et assurer la durabilité de l'agriculture, il est impératif de protéger et de gérer efficacement ces zones humides, prenant en compte les interactions entre les deux systèmes. Cela inclut la mise en œuvre de pratiques agricoles respectueuses de l'environnement, telles que la réduction de l'utilisation de produits chimiques et la conservation des ressources en eau (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Encourager des mesures immédiates pour aborder les problèmes les plus pressants auxquels sont confrontées ces zones est essentiel pour garantir une agriculture plus durable et résiliente (De Groot et al., 2012).

Toutefois, dans de nombreuses régions, l'expansion et l'intensification de l'agriculture répondent à la demande alimentaire croissante. Au cours des cent dernières années, les terres agricoles et les pâturages sont passés de 27,2 % à 46,5 % de la superficie totale des terres (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). L'intensification agricole au cours des vingt dernières années a exacerbé ce phénomène. L'intensification des activités agricoles a conduit à une augmentation significative de l'extraction d'eau pour l'irrigation et de la pollution due à l'usage intensif d'engrais et de pesticides. Cette demande accrue en eau et ces pratiques ont des répercussions directes sur les zones humides, entraînant une dégradation de leurs fonctions écologiques et une perte de biodiversité.

Cette transformation du paysage agricole a eu des conséquences profondes sur les zones humides. Depuis 1970, l'étendue des zones humides naturelles a reculé de 35 % dans les régions où les données sont disponibles (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

En conclusion, la transition vers une agriculture durable est non seulement nécessaire pour répondre aux défis environnementaux actuels, mais aussi pour garantir la santé et la fonctionnalité des zones humides. Il est recommandé de s'attaquer aux problèmes pressants auxquels sont confrontées les zones humides dans l'agriculture pour garantir une agriculture plus durable. Pour cela, il est essentiel de modifier les pratiques et les systèmes agricoles tout en répondant aux besoins d'une population mondiale croissante et en assurant une production alimentaire suffisante face aux changements environnementaux rapides.

4. Les processus géochimiques de la salinisation des sols en zone humide sous climat semi-aride

Dans les chotts et les sebkhas, l'évaporation joue un rôle capital dans la précipitation des minéraux et la salinisation des sols (Warren, 2016). C'est un paramètre essentiel dans le cycle géochimique des minéraux, qui peut modifier le paysage et influencer la composition chimique de la solution du sol. L'évaporation intense, souvent supérieure aux précipitations, provoque une accumulation accrue de sels solubles dans la solution du sol. La compréhension de ces processus est essentielle pour comprendre le phénomène de salinisation des sols dans cet environnement.

Ce qui suit explore les mécanismes par lesquels l'évaporation contribue à la précipitation des minéraux et examine les implications géochimiques de ces processus dans le contexte de la salinisation des sols.

4.1. Rôle de l'évaporation dans la précipitation des minéraux

L'évaporation est un processus physique où un liquide se transforme en gaz par transfert moléculaire (Coleman, 2000), tandis que la condensation représente l'inverse de ce phénomène. Ces deux processus se produisent lorsque le liquide n'est pas en équilibre avec sa phase gazeuse.

Divers paramètres physiques et chimiques peuvent influencer le taux d'évaporation. Par exemple, l'absence de circulation d'air, une zone de captage pluviométrique supérieure à la zone d'évaporation, ou une réduction de l'énergie solaire incidente sur la surface de l'eau peuvent diminuer l'évaporation effective. De plus, une pression de vapeur réduite, en raison de la salinité, et une augmentation de la concentration locale en humidité contribuent également à cette réduction.

L'évaporation effective d'une masse d'eau saline en surface est estimée à environ 1400 mm par an. Cependant, si de la saumure est pulvérisée sur une fosse pleine, ce taux peut atteindre environ 1800 mm par an (128 %), tandis que dans une fosse vide, l'évaporation est d'environ 900 mm par an (61 %). Ce chiffre est conservateur, car la vaporisation capterait plus d'énergie des roches chauffées sur le mur de la fosse, entraînant une évaporation effective de 600 mm par an (43 %) dans une fosse presque vide.

Lorsqu'une eau de composition chimique donnée s'évapore, la concentration des éléments en solution augmente. Si aucune précipitation ni dissolution ne se produit pendant ce processus, la molalité totale des éléments en solution s'élève avec le facteur de concentration. L'augmentation de la force ionique de la solution modifie les coefficients d'activité, le pH, ainsi que la distribution des espèces aqueuses simples ou complexes. Toutefois, l'augmentation des concentrations des espèces aqueuses n'est pas proportionnelle.

L'évaporation joue un rôle crucial dans l'enrichissement en sels des bassins fermés des régions arides et semi-arides (Wagner, 2011 ; Herrera et al., 2016). Dans ces milieux, les eaux souterraines salées évoluent vers un état solide à travers un processus combiné de dissolution et de précipitation de minéraux solubles, suivant les trajectoires d'écoulement et d'évaporation (Li et al., 2020).

À mesure que l'eau s'évapore, les ions dissous se concentrent et atteignent des niveaux de saturation, ce qui entraîne la précipitation de minéraux tels que l'halite, le gypse et l'anhydrite. Ce phénomène est particulièrement marqué dans les bassins endoréiques, où l'eau s'évacue uniquement par évaporation, laissant des dépôts de minéraux évaporitiques.

Les variations climatiques et les fluctuations saisonnières ont un impact notable sur la précipitation des minéraux. En période de sécheresse, l'intensité de l'évaporation augmente la concentration des sels, favorisant ainsi leur précipitation. Durant les rares périodes de pluie, ces dépôts peuvent être temporairement dissous, mais l'évaporation reprend rapidement, conduisant à leur reformulation. Des recherches ont montré que ces cycles de dissolution et de précipitation sont essentiels pour comprendre la dynamique des dépôts salins dans les régions arides et semi-arides (Bowler, 1976).

4.2. Le mécanisme de précipitation et de dissolution des minéraux

Les espèces aqueuses dans une solution sont constamment en équilibre. Cependant, des interactions entre ces espèces dissoutes peuvent entraîner la formation de nouvelles espèces en solution, ce que l'on qualifie de réactions homogènes. Par ailleurs, des réactions entre les espèces dissoutes peuvent également donner naissance à des phases solides ou gazeuses, phénomène désigné sous le nom de réactions hétérogènes ou de réactions avec changement de phase, englobant les processus de précipitation et de dissolution lors des interactions solution-minéral (Droubi, 1976 ; Michard, 1989). Lorsqu'un minéral entre en contact avec une solution,

un équilibre se met en place, impliquant une relation entre les activités des ions en solution et les constituants du minéral (Stumm et Morgan, 1981 ; Sigg et al., 1992). Cette relation est régie par la loi d'action de masse, qui s'exprime pour une réaction d'équilibre impliquant un minéral, représenté sous la forme $AaBb$, en milieu aqueux.

À l'équilibre, les activités ioniques des différentes espèces en solution respectent une relation définie. Pour les phases solides pures, dont l'activité est par définition égale à 1, la loi d'action de masse devient plus simple lorsque le minéral est pur. La constante d'équilibre K d'un minéral en solution, correspondant au produit de solubilité du minéral, est une constante indépendante de la composition chimique de la solution, mais dépendante de la température et de la pression, souvent exprimée à 25°C sous une atmosphère de pression. Il est crucial de noter que l'équation du produit de solubilité ne représente pas directement la solubilité totale du minéral, car elle repose sur les activités des ions libres en solution (Droubi et al., 1976).

Pour évaluer le degré de saturation ou l'état d'équilibre d'une solution vis-à-vis d'un minéral spécifique, on calcule le produit d'activité ionique Q , en utilisant une formule spécifique, puis on le compare au produit de solubilité K , valeur généralement bien documentée pour chaque minéral. Trois cas de figure se présentent :

Si $Q = K$, la solution est à saturation, ce qui signifie que le minéral est en équilibre avec la solution.

Si $Q > K$, la solution est sursaturée par rapport au minéral, ce qui tend à induire la précipitation du minéral pour ramener l'équilibre à $Q = K$. Cependant, cette réaction de précipitation peut être lente, laissant la solution en état de sursaturation pendant une certaine durée (Michard, 1989).

La précipitation des minéraux a des conséquences écologiques et économiques importantes. Par exemple, la formation de croûtes salines peut réduire la fertilité des sols et provoquer des dommages aux végétaux. À l'inverse, ces dépôts peuvent être exploités pour extraire des minéraux utiles comme le sel de table et le gypse, largement utilisés dans diverses industries (Warren, 2016).

Dans les régions arides et semi-arides, le transport des cations et des anions diffère de celui observé dans les climats humides. Dans ces derniers, les cations et anions sont généralement lessivés du sol par l'eau en direction des terrains bas ou aquifères souterrains (Metternicht et

Zinck, 2008). En revanche, dans les régions arides et semi-arides, ces cations tendent à rester dans le complexe d'échange du sol ou à précipiter sous forme de minéraux secondaires. Les sels moins solubles, tels que le carbonate de calcium (CaCO_3), le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et la magnésite (MgCO_3), montrent une propension à précipiter dans ces conditions, entraînant une augmentation relative de la proportion d'ions Na^+ en solution. Cette élévation en Na^+ favorise le remplacement de certains cations Ca^{++} et Mg^{++} échangeables par Na^+ sur le complexe d'échange, ce qui augmente l'ESP et induit la sodisation des sols (Bui, 2017). Dans les régions arides, le taux élevé d'évaporation concentre davantage la solution aqueuse en sels solubles, qui peuvent ensuite précipiter dans le sol. Parmi ces sels, on trouve les carbonates de sodium (trona, nahcolite, thermonatrite), les sulfates de sodium (tels que la thenardite), les sulfates de magnésium (comme l'epsomite), les chlorures de potassium (sylvite), de magnésium (tels que la bischofite) et de sodium (NaCl , halite), ce dernier étant le plus soluble et le plus fréquent. Ces sels, plus solubles que le gypse, sont généralement désignés sous le nom de «sels solubles» et caractérisent les sols salins (IUSS Working Group WRB, 2022 ; Stavi et al., 2021).

L'état de saturation de la solution du sol vis-à-vis d'un minéral particulier peut être exprimé par l'indice de saturation (IS). Cet indice est essentiel pour évaluer la minéralogie du sol à partir des données sur la solution du sol, sans nécessiter la collecte d'échantillons de phase solide pour une analyse minéralogique (Deutsch, 1997). Les règles de cet indice indiquent : un $\text{IS} = 0$ montre un équilibre entre le minéral et la solution, un $\text{IS} < 0$ signale une sous-saturation (dissolution) par rapport au minéral, tandis qu'un $\text{IS} > 0$ traduit une sursaturation (Narsimha et Sudarshan, 2018).

Quand un minéral se trouve au contact d'une solution sous-saturée par rapport à lui ($\log Q < \log K_{ps}$), il se dissout jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint. Durant ce processus de dissolution, la composition chimique de la solution change. Cependant, les équilibres internes entre les différentes espèces aqueuses, simples ou complexes, présentes dans la solution, demeurent inchangés.

La dissolution d'un minéral ou la concentration d'une solution via l'évaporation entraîne une augmentation des éléments présents dans cette solution. Lorsque la solution atteint un état de saturation vis-à-vis d'un minéral, ce dernier commence à précipiter, extrayant de la solution les éléments qui le composent. Un équilibre se forme ainsi entre l'augmentation des concentrations dues à la dissolution ou l'évaporation, et la diminution due à la précipitation. La concentration

des éléments en solution peut alors se stabiliser, diminuer ou augmenter moins rapidement, selon l'intensité de la précipitation. Cet équilibre est maintenu entre la solution et le minéral en précipitation, ainsi qu'entre les différentes espèces aqueuses présentes.

4.3. Origine et évolution des eaux souterraines salées

L'origine des eaux souterraines salées dans les bassins sédimentaires tels que les chotts et sebkhas est généralement liée à la dissolution des sels solubles présents dans la roche mère (Merchán et al., 2015 ; Jia et al., 2017). Des dépôts épais d'évaporites, principalement de halite, se trouvent fréquemment dans ces bassins (Richter et Kreitler, 1993). D'autres dépôts de sel peuvent inclure des sels de chlorure, comme la sylvite (KCl), ainsi que l'anhydrite (CaSO_4), des carbonates et du calcaire (Caruso et al., 2015 ; Liu et al., 2015). Les eaux souterraines en contact avec ces sels subissent par conséquent une augmentation des concentrations ioniques et de la salinité globale (Li et al., 2020).

Dans les bassins fermés tels que les chotts et les sebkhas, les concentrations des principaux constituants chimiques sont très variables, elles peuvent être dominées par le chlorure, le sulfate, carbonates ou bicarbonate. La chimie des eaux souterraines salées est principalement déterminée par la composition initiale de l'eau douce et l'état de saturation des minéraux tels que la calcite, le gypse et la halite (Andersen et al., 2005 ; Dogramaci et al., 2012). Les minéraux précipitent dans l'ordre suivant : calcite (CaCO_3) et dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) > gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et anhydrite (CaSO_4) > halite (NaCl) > sels de potassium et de magnésium. Les eaux souterraines salées dominées par le chlorure sont souvent observées dans les bassins fermés en raison de la dissolution du sel et de l'évaporation jusqu'à la saturation en halite (Poulsen et al., 2006 ; Egbueri, 2019 ; Li et al., 2020).

L'estimation du risque de sodisation des sols est un enjeu pour la gestion des terres agricoles, notamment dans les régions arides et semi-arides. La sodisation, qui correspond à l'accumulation de sodium échangeable dans le sol, peut altérer sa structure et réduire sa fertilité. Parmi les indicateurs chimiques utilisés pour évaluer ce risque, l'alcalinité résiduelle (AR) et l'alcalinité résiduelle généralisée (ARg). Ces deux mesures permettent de quantifier l'excès d'alcalinité dans la solution du sol en comparaison avec les cations bivalents comme le calcium et le magnésium. Van Beek et Van Breemen (1973) ont introduit la notion d'alcalinité résiduelle développée par Eaton (1950) sous le nom de carbonates résiduelle.

À la différence de l'alcalinité, où toute augmentation de celle-ci doit être accompagnée d'une hausse équivalente de la concentration totale des cations ou d'une baisse équivalente de la concentration totale des anions, l'alcalinité résiduelle représente la part d'alcalinité qui n'est pas compensée par les cations bivalents. Elle se calcule en soustrayant de l'alcalinité les équivalents de cations ou en ajoutant les équivalents d'anions impliqués dans les précipitations (Van Beek et Van Breemen, 1973 ; Droubi, 1976). Définie en fonction d'un minéral particulier (Favre, 2000), l'alcalinité résiduelle diminue lors de la dissolution ou précipitation d'un sel d'acide fort et de cation bivalent (cas du gypse), et elle ne varie pas lors de la dissolution ou la précipitation d'un sel d'acide faible et de cations bivalents (cas de la calcite) (Droubi, 1976). Selon Cheverry (1974), l'alcalinité résiduelle est une mesure de l'excès de bicarbonates et de carbonates par rapport aux ions calcium et magnésium dans l'eau d'irrigation ou dans la solution du sol. Elle est calculée à partir des concentrations des ions bicarbonates (HCO_3^-), carbonates (CO_3^{--}), calcium (Ca^{++}) et magnésium (Mg^{++}). La formule courante pour l'alcalinité résiduelle est la suivante : $\text{AR} = (\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{--}) - (\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++})$ (Droubi, 1976).

Une valeur positive d'AR indique un potentiel de formation de carbonate de sodium dans le sol, augmentant ainsi le risque de sodisation. Lorsque les eaux d'irrigation présentent une AR élevée, elles peuvent favoriser l'accumulation de sodium échangeable dans le sol, ce qui entraîne la dispersion des argiles, une réduction de la perméabilité et une diminution des paramètres hydrodynamique du sol (Rhoades et al., 1992).

L'alcalinité résiduelle généralisée (ARG) est une extension du concept d'AR appliquée à la précipitation successive de plusieurs minéraux. La formule pour ARG intègre également les concentrations de sodium (Na^+) et de potassium (K^+), fournissant une évaluation plus complète de l'impact potentiel de l'eau d'irrigation sur le sol. La formule simplifiée pour ARG est la suivante : $\text{ARG} = (\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{--} + \text{Na}^+ + \text{K}^+) - (\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++})$. L'ARG permet une estimation plus précise du risque de sodisation car elle inclut les effets des cations monovalents comme le sodium, qui jouent un rôle clé dans la dispersion des particules d'argile et la dégradation de la structure du sol (Suarez, 2001).

Dans les eaux naturelles, lorsque les solutions se concentrent sous l'effet de l'évaporation, l'activité des cations bivalents (Ca^{++} et Mg^{++}) est rapidement régulée par la précipitation de minéraux peu solubles tels que la calcite, la dolomite, la magnésite et certains minéraux argileux (comme l'argile magnésienne et la sépiolite). Cette précipitation entraîne une diminution de l'alcalinité et, par conséquent, une baisse du pH, rendant difficile une forte

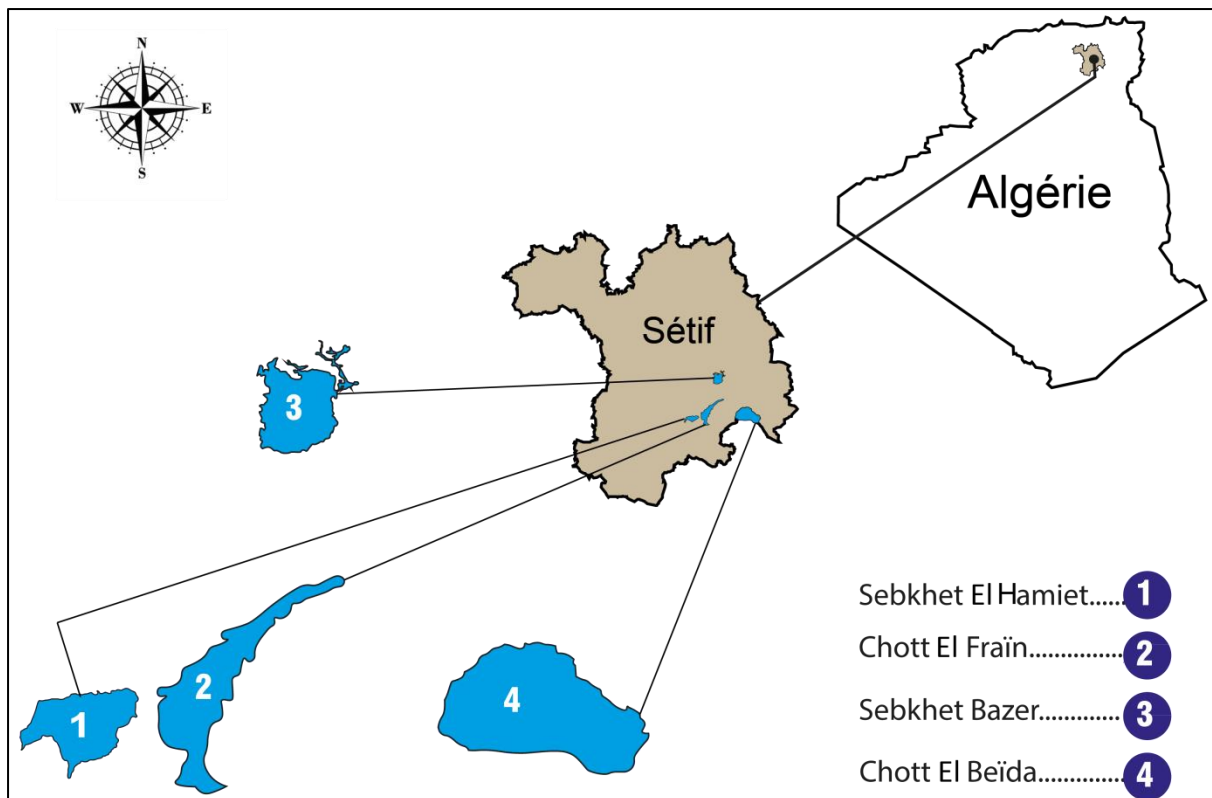
hausse du pH en fin d'évaporation. Cependant, une telle augmentation est observée dans de nombreux sols salés. La notion d'alcalinité résiduelle aide à mieux comprendre les phénomènes de sodisation, qui résultent non seulement de l'augmentation du Na^+ dans la solution, mais surtout de la chute brutale de certains ions due à la précipitation de minéraux (Montoroi, 2005).

***Chapitre II. Présentation
générale de l'Eco-complexe
Sud Sétifien***

Chapitre II. Présentation générale de l'Eco-complexe Sud-Sétifien

1. Situation géographique de la zone d'étude

La zone d'étude se trouve au Nord-Est de l'Algérie dans les hautes plaines de Sétif (Figures 1 et 2). Elles forment l'un des complexes de zones humides les plus étendus et variés du pays (Sameraoui et Sameraoui, 2008 ; Balla, 2012 ; Annani, 2013). Cette région s'étend sur 300 km avec des altitudes variant entre 800 et 1200 mètres. Elle est caractérisée par la présence de plusieurs plans d'eau peu profonds, aux caractéristiques salines variables (Houhamedi et al., 2009). Les quatre zones examinées dans le cadre de cette étude sont réparties sur l'ensemble de la wilaya de Sétif, et couvrent une superficie totale de 20 611 hectares. Elles sont approximativement situées entre 35°00' et 36°22' de latitude Nord et 05°04' et 7°26' de longitude Est. Parmi ces zones, Chott El Beida, Sebkhiet El Hamiet et Sebkhiet Bazer ont été inscrites sur la liste de la convention Ramsar, tandis que Chott El Fraïn, est en cours de classement.



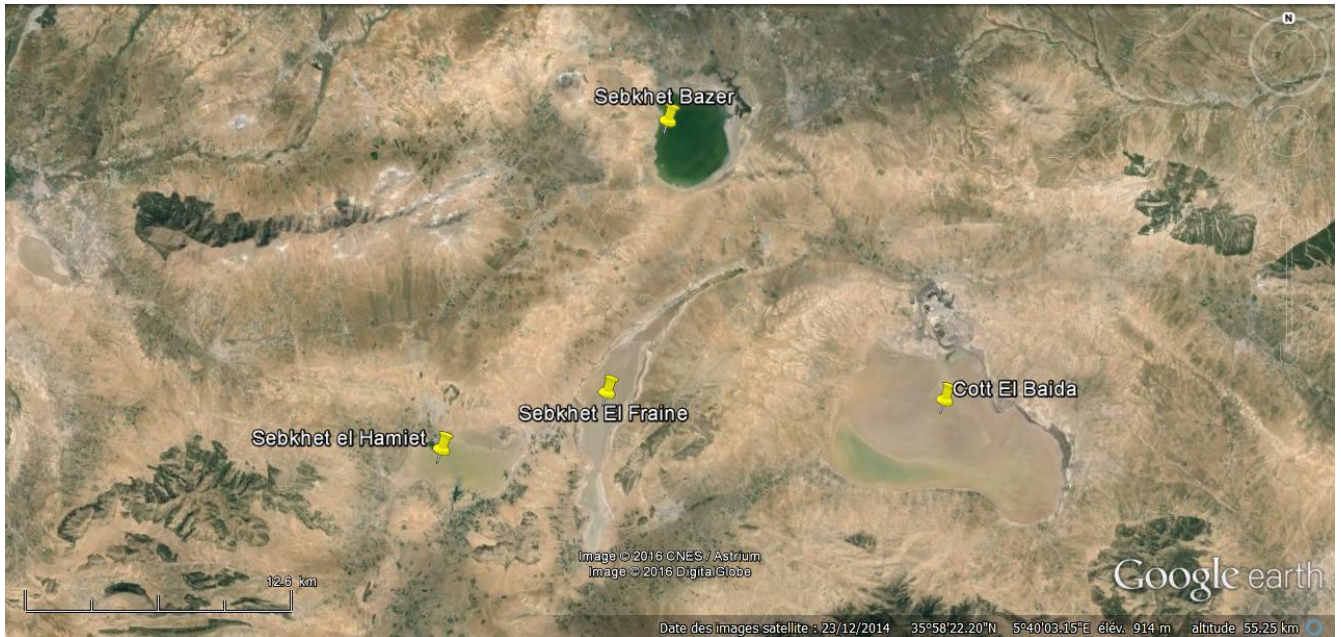


Figure 2. Vue par satellite de l'Eco-complexe Sud-Sétifien

1.1. Sebkheth El Hamiet

La zone étudiée comprend Sebkheth El Hamiet, située à proximité du centre du village de d'Ain Lahdjar. Le site lui-même est un plan d'eau couvrant une superficie de 2 509 hectares, situé à une latitude de 35°55'N et une longitude de 5°33'E, la profondeur de la nappe ne dépasse pas 1 mètre. La zone se compose de deux types d'habitats distincts : la partie centrale, couvrant 1 400 hectares, est un plan d'eau dépourvu de végétation, connu sous le nom de sebkheth. Autour de cette sebkheth se trouve une prairie humide périphérique, appelée chott, qui couvre 200 hectares.

1.2. Chott El Frain

Chott El Frain se situe dans les communes de Tella et Beida Bordj. Il est délimité à l'ouest par Douar Ouled Badrouh, à l'est par Djebel Tella, Douar El Bir, Douar Doukha et Djebel Sedra, au nord par Douar El Maadher et Bou Djedid, et au sud par Djebel Kalaoun et Beida Bordj (Aliat, 2017). Cette zone humide de forme allongée s'étend sur 1 500 hectares et se distingue par ses eaux salées et fortement polluées (Baaziz, 2012).

1.3. Sebkheth Bazer

La Sebkheth de Bazer Sakra se situe dans la partie sud des hautes plaines de Sétif, appartenant aux hautes plaines telliennes. Elle se trouve à environ 9 km au sud d'El-Eulma et à 3 km au sud du village d'El-Mellah. Elle est localisée entre la latitude 35°63'N et la longitude 5°41'E, et se

présente comme une dépression endoréique saline permanente couvrant une superficie de 4 379 hectares. Ses frontières géographiques sont délimitées par le Djebel Braou à l'ouest, culminant à 1 267 mètres, Mechtet Nouasser à l'est avec une altitude de 929 mètres, Merdjet Ehtout au nord à 920 mètres, et Koudiat Gueltet Edebba au sud à 972 mètres (Boumezbeur, 2004 ; Baaziz, 2012 ; Aliat, 2017). Cette région constitue la dépression endoréique la plus haute et la plus saline de la région de Sétif, avec une altitude maximale de 917 mètres (Barkat et al., 2004).

1.4. Chott El Beida

Chott El Beida s'étend sur les deux wilayas de Sétif et Batna, à environ 4 km au sud du centre de la daïra de Hammam Essokhna. Située entre les coordonnées 35°35'N de latitude et 5°48'E de longitude, cette région couvre 12 223 hectares. Elle se divise en deux zones distinctes : la première est une sebkha, un lac salé temporaire sans végétation, tandis que la seconde est une prairie humide permanente, recouverte de végétation herbacée halophyte et renforcée par une plantation d'Atriplex, appelée chott. La sebkha et le chott occupent respectivement 150 hectares et 3 000 hectares. Le chott est inondé durant les saisons pluvieuses, mais s'assèche en été. Le bassin versant de la zone reçoit un débit annuel moyen de 16 millions de mètres cubes, une partie s'infiltrant pour recharger la nappe phréatique. Les terres environnantes sont majoritairement utilisées pour l'agriculture, principalement pour la culture des céréales (Boumezbeur, 2004 ; Baaziz et al., 2011 ; Baaziz, 2012).

2. Le Climat

Le climat, dans les régions méditerranéennes, est un facteur déterminant en raison de son rôle crucial dans l'établissement, l'organisation, et le maintien des écosystèmes. Par conséquent, un des principaux objectifs de l'écologie méditerranéenne est de chercher la relation optimale entre les différentes formations végétales et le climat, envisagé sous son aspect biologique : le bioclimat (Tir, 2009).

À mesure que l'on se rapproche vers les régions d'intérieur, le climat méditerranéen se détériore rapidement, avec une tendance marquée vers l'aridité. Les précipitations hivernales deviennent insuffisantes, entraînant l'émergence de climats semi-arides et arides.

La zone d'étude, située dans les hautes plaines sétifiennes, possède un climat méditerranéen avec des caractéristiques semi-arides. Cette région se distingue par une saison froide

relativement tempérée, durant laquelle des perturbations cycloniques apportent généralement des précipitations, notamment sur les reliefs, suivie d'une période chaude et sèche.

2.1. Les précipitations

Les données des précipitations de la période allant de 1989 à 2015 sont indiquées dans le tableau I. Ils indiquent une répartition très irrégulière des précipitations tout au long de l'année, avec une moyenne annuelle de 390,77 mm. Le régime pluviométrique correspond au type PHAE (précipitations printanières > hivernales > automnales > estivales).

Tableau I. Répartitions moyennes mensuelles et saisonnières des précipitations en mm pour la série (CMSS ; 1989-2015)

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill	Août	Moyenne annuelle
P moy (mm)	37,7	31,3	33,4	40,1	38,5	31,95	36,6	43,33	40,8	21,31	13,98	21,8	390,77
Saison (mm)	102,4			110,55			120,73			57,09			
(%)	26,20			28,29			30,39			14,60			

CMSS= Centre météorologique station de Sétif

La figure 3 montre les variations des précipitations moyennes mensuelles et saisonnières pour la période (1989-2015), avec un maximum enregistré en avril (43,33 mm) et un minimum en juillet (13,98 mm).

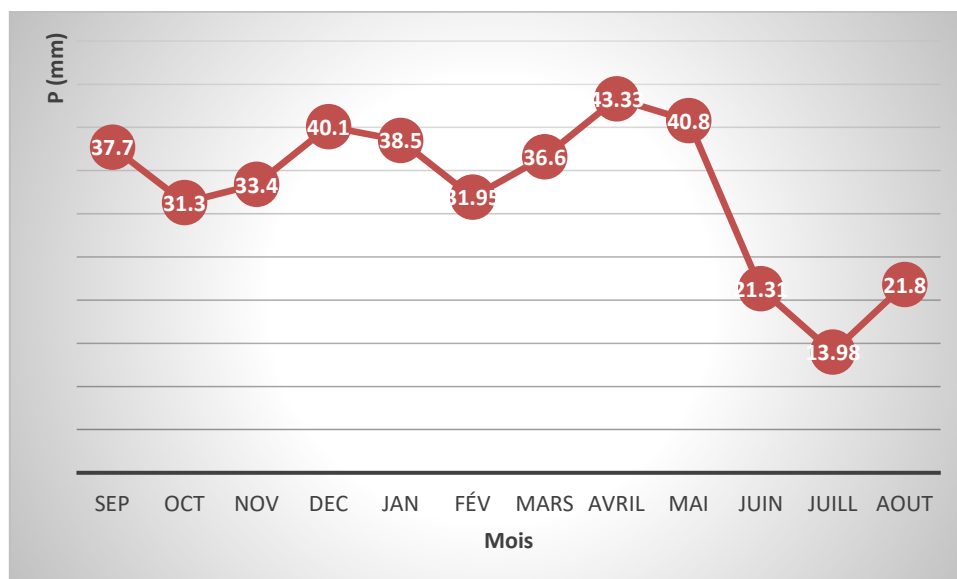


Figure 3. Précipitations moyennes mensuelles de la station de Sétif (1989-2015)

2.2. La température

Selon les données du tableau II présentées dans la Figure 4, la température moyenne estivale s'établit à 24,68°C, tandis que la température hivernale moyenne est de 6,19°C. Les températures culminent en juillet, atteignant environ 34,01°C, et descendent au minimum en janvier, avec environ 0,8°C. La moyenne des températures sur la période d'observation (1989-2015) est de 14,84°C.

Tableau II. Répartitions moyennes mensuelles et saisonnières des températures stations Sétif Période (1989-2015)

Saison	Automne			Hiver			Printemps			Été			Moy annuelle
Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	
T max	27,78	22,42	15,45	11,11	10,48	11,51	15,26	18,64	23,85	29,83	34,01	33,53	21,15
T min	14,32	10,26	5,22	1,71	0,8	1,16	3,42	5,45	9,74	14,52	17,85	18,38	8,56
T moy	21,01	16,34	10,34	6,41	5,64	6,53	9,34	11,70	16,8	22,17	25,93	25,95	14,84
Moy saisonnière	15,89			6,19			12,61			24,68			

- T max : moyenne mensuelle des maxima en °C ; T min : moyenne mensuelle des minima en °C ; T moy : moyenne mensuelle en °C.

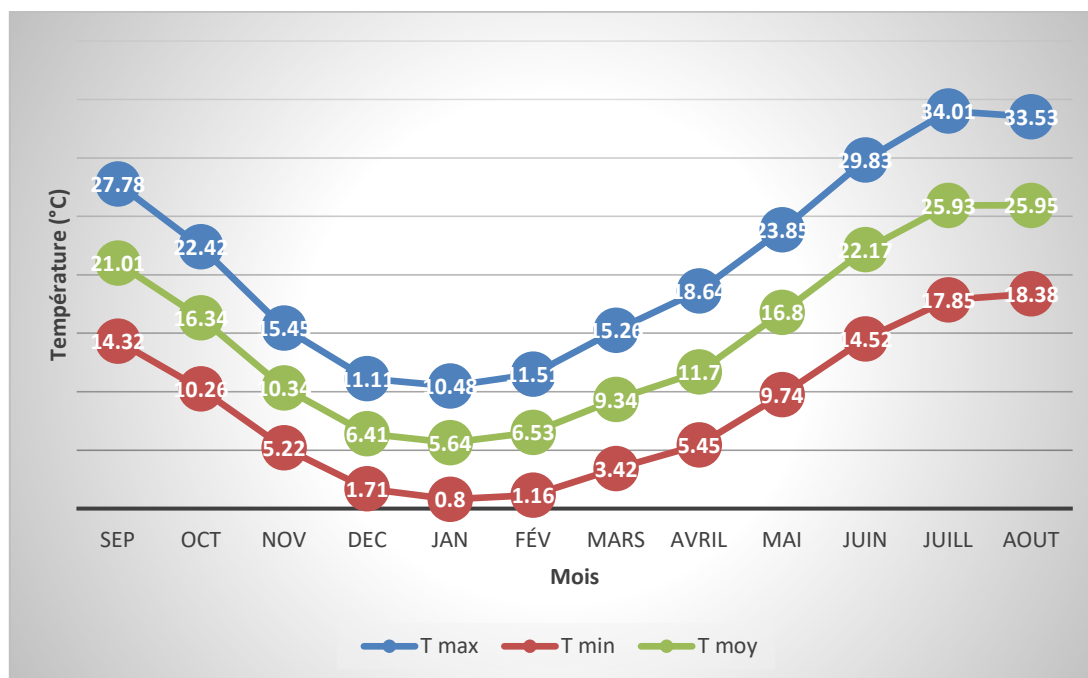


Figure 4. Variation moyenne de la température mensuelle stations Sétif (1989-2015)

Pour évaluer le climat de la région, l'indice d'aridité de De Martonne, a été calculé comme suit :

$$I = P / (T + 10) \quad \text{Où :}$$

P : précipitations annuelles en mm ;

T : température moyenne annuelle en °C.

Les valeurs de l'indice d'aridité, résumées dans Annexe I (Guyot, 1999), montrent que l'indice d'aridité de De Martonne pour la station météorologique de Sétif durant la période 1989-2015 est de 15,73. Cette valeur, située entre 10 et 20, confirme que le climat de la région de Sétif est de type semi-aride.

Le diagramme ombrothermique représenté par la Figure 5, illustre que la saison sèche dans la région de Sétif s'étend généralement de mi-mai à mi-septembre, soit environ 5 mois, ce qui indique un climat méditerranéen avec une saison sèche marquée.

Tableau III. Valeurs moyennes mensuelles des précipitations et des températures à Sétif (1989-2015)

Mois	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Dec
P (mm)	38,5	31,95	36,6	43,33	40,8	21,31	13,98	21,8	37,7	31,3	33,4	40,1
T (°C)	5,64	6,53	9,34	11,70	16,8	22,17	25,93	25,95	21,01	16,34	10,34	6,41

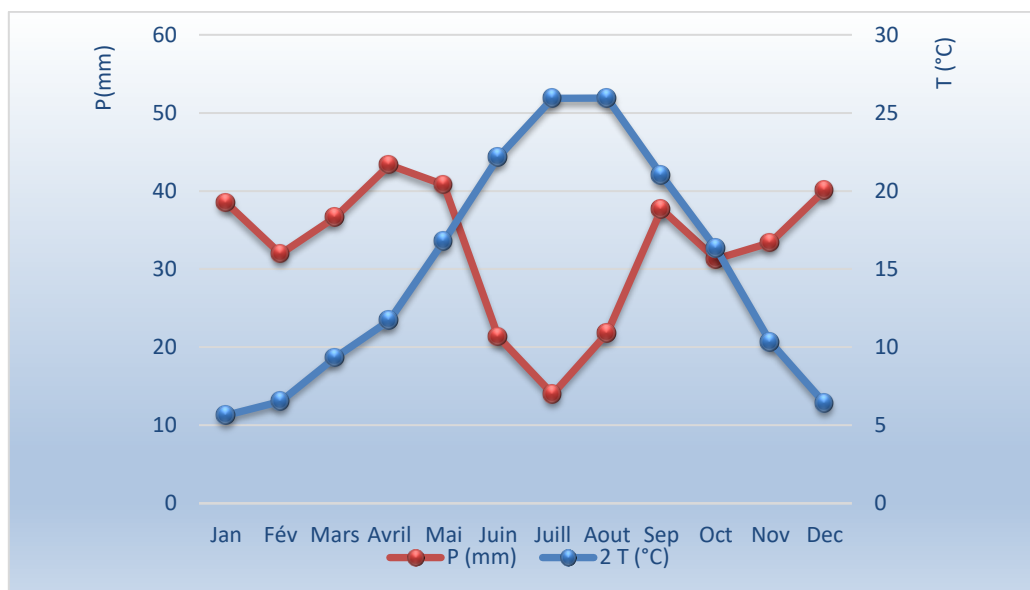


Figure 5. Diagramme Ombrothermique de la région de Sétif (1989-2015)

2.3. Quotient pluviométrique d'Emberger

Le quotient pluviométrique d'Emberger indique que la région de Sétif appartient à un étage bioclimatique semi-aride, caractérisé par des hivers frais.

2.4. L'évapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration (ETP) joue un rôle clé dans la dynamique des sols en milieu aride et semi-aride où les taux élevés d'évaporation ont tendance à concentrer la solution aqueuse et provoquer la précipitation des sels. Selon Djemmal (2018), l'ETP calculée à partir des données de la station de Sétif pour la période 1985-2006 est égal à 814,74 mm. Cette valeur dépasse

largement les précipitations, atteignant 203,99 % de leur valeur moyenne. Ce déséquilibre, associé à un déficit hydrique de 116,30 % des précipitations.

3. Le cadre géologique, géomorphologique et hydrogéologique

3.1. La géologie

Selon les travaux de Bertraneu (1955) ; Caire (1957) ; Vila (1980) ; Kieken (1962) ; Durand Delga (1969) ; Kazi Tani (1972) et Guiraud (1973), les hautes plaines sétifiennes s'étendent depuis la dépression de Chott El-Hodna jusqu'à la chaîne du Djurdjura. Géographiquement, elles font partie intégrante de l'Atlas tellien.

Cependant, la région est divisée en deux secteurs (Figure 6) :

3.1.1. Terrains peu ou pas tectonisés

Ces terrains englobent le Quaternaire et le Mio-Pliocène, qui sont généralement peu touchés par la tectonique tangentielle. Ils occupent principalement de vastes étendues dans les hautes plaines sétifiennes et constantinoises, avec une présence limitée dans la chaîne côtière.

3.1.2. Quaternaire

La région présente une grande diversité de terrains quaternaires, comprenant du sable, des limons, du gravier, des cailloutis, et surtout des argiles, qui ont généralement une couleur grise. Certains de ces terrains abritent des sols arables favorables à l'agriculture, principalement sur les niveaux marneux et les alluvions. De plus, il existe des formations de pente correspondant à d'anciennes alluvions, avec des sols bruns peu ou pas calcaires.

3.1.3. Mio-Pliocène

Le Mio-Pliocène se caractérise par des dépôts fluvio-lacustres rougeâtres, avec une base composée de calcaires lacustres, surmontée de marnes grises, de cailloutis conglomératiques, et de niveaux de sel ou de gypse. Au nord d'El Eulma, la base présente des conglomérats avec de gros graviers, suivis d'argiles grises rougeâtres et de niveaux microconglomératiques, puis des argiles et marnes gypseuses avec quelques niveaux de calcaire lacustre. Plus haut dans la séquence, la variabilité est plus marquée avec des intercalations de poudingues, d'argiles

lignitées, et de lits gréseux gypsifères, atteignant une épaisseur de 150 à 200 mètres. À l'est de Sebket Bazer, le Mio-Pliocène se compose principalement d'argiles, de sables et de limons, avec des calcaires lacustres et des conglomérats. Ces formations sont également observées au nord-ouest de Djbel Braou et au nord-est de Chott El Beida, couvrant une superficie de 4 à 5 km² (Villa, 1980).

3.1.4. Terrains tectonisés

A niveau des terrains tectonisés, la cartographie et l'analyse structurale de cette partie ont identifié plusieurs unités géologiques. En particulier les nappes de flysch, les nappes telliennes, l'ensemble allochtone Sud-Sétifien, ainsi que le parautochtone et l'autochtone hodnéen. Parmi elles, se distinguent notamment la nappe de Djemila (une nappe tellienne) et l'ensemble allochtone Sud-Sétifien.

3.2. La géomorphologie

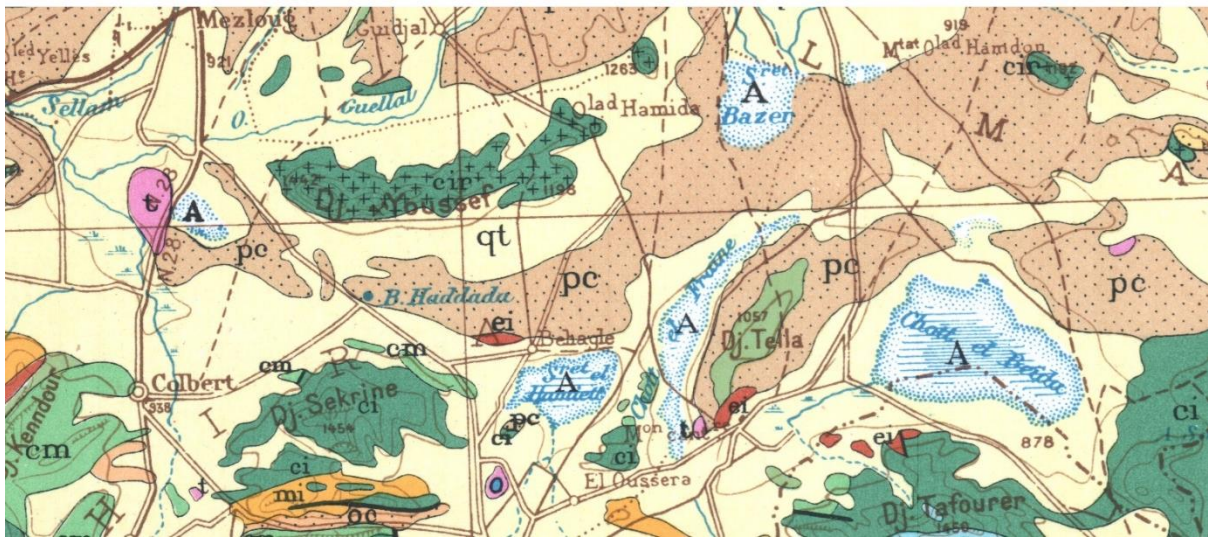
Les unités géomorphologiques se divisent principalement en deux catégories : les glacis étalés et les piémonts. Les glacis étalés, qui relient les pentes montagneuses aux zones de dépression, se distinguent par des dépôts plio-quaternaires d'une épaisseur généralement inférieure à 100 mètres, façonnés par d'anciens glacis. À l'inverse, les piémonts présentent moins de distinctions, avec des glacis courts et des dépôts sédimentaires pouvant atteindre entre 300 et 500 mètres d'épaisseur, formant une vaste plaine d'accumulation subhorizontale sans croûte.

Les hautes plaines de Sétif comprennent des massifs calcaires, des glacis encroûtés, ainsi que des Merdja et des sebkhas.

Cependant, le calcaire est présent sous différentes formes à savoir : les dalles croûtes et des encroûtements favorisant la circulation des eaux souterraines. L'endoréisme, résultant de la combinaison des caractéristiques topographiques et du climat semi-aride, se manifeste par la présence de cuvettes fermées telles que les sebkhas et les chotts, principalement expliquées par des processus tectoniques.

3.3. L'hydrogéologie

Cette analyse hydrogéologique vise à identifier les aquifères ainsi que les zones de recharge en eau. Les recherches menées par Boudoukha (1988), Kammouj (2009), Djenba (2015) et



TERRAINS

SÉDIMENTAIRES

A	Alluvions actuelles: lacs, marécages, dayas, chotts, sebkhas, limons et croûtes gypso-salines
D	Dunes récentes
qt	Quaternaire continental: alluvions, regs, terrasses
qm	Quaternaire marin: plages anciennes et formations dunaires consolidées qui les accompagnent
qC	Calabrien: grès marins et formations dunaires associées
qV	Villafranchien: calcaires lacustres, argiles à lignite, couches rouges
pV	Pliocène continental et Villafranchien non séparés (pV)
pc	Pliocène continental: poudingues, calcaires lacustres
p	Pliocène marin conglomérats, marnes bleues, mollasses, grès et formations dunaires subordonnées

Figure 6. Extrait de la carte géologique de l'Algérie 2 -ème édition au 1/500 000 (Deleau et Laffitte, 1951)

Djemmal (2018) divisent la région de Sétif en trois principales unités hydrogéologiques : les sédiments de surface, les carbonates du Mésozoïque et les formations du Paléogène. Les formations argileuses et marneuses, ainsi que la présence de couches salines du Trias, soulèvent des préoccupations quant à la salinité et la contamination des eaux souterraines.

La capacité des formations géologiques à stocker l'eau dépend de leur perméabilité. Les sols argileux et marneux du Quaternaire, bien que peu perméables, présentent une perméabilité interstitielle grâce aux graviers, sables et galets de l'aquifère mio-plio-quaternaire. Les formations calcaro-dolomitiques du Jurassique, du Crétacé et du Paléogène forment un aquifère

avec une porosité secondaire due à la fracturation. Les calcaires lacustres, les conglomérats du Mio-Pliocène et les alluvions récentes du Quaternaire composent un aquifère avec une porosité primaire de type inter-granulaire.

Néanmoins, les principales formations qui sont classées en fonction de leurs importances hydrogéologiques sont résumées comme suit :

- *Formations carbonatées propices au développement des aquifères karstiques*

- *Formations de couverture propice au développement d'aquifères poreux*

- *Formations défavorables au développement d'aquifères*

Toutefois, il existe plusieurs types d'aquifère, le plus important c'est l'aquifère des dolomies et calcaires du Jurassique. Cet aquifère, d'une épaisseur de 400 mètres, est recouvert par le Mio-Plio-Quaternaire et affleure dans les Djebels Brao, Tnoutit, Youssef et Kalaoun, avec des affleurements dispersés dans la région d'Ain Azel. Il est alimenté principalement par apports directs, avec une décharge par pertes verticales et horizontales vers les formations sous-jacentes et les aquifères du Mio-Plio-Quaternaire. Il a également été signalé la présence d'autres types d'aquifères, tels que les aquifères des calcaires et dolomies du Barrémo-Aptien-Cénomaniens ainsi que les aquifères des grès fissurés de l'Aquitaniens.

4. La faune et la flore des zones humides de l'éco-complexe Sud-Sétifien

Les zones humides de l'Est algérien, comprenant des chotts, sebkhas et autres écosystèmes, offrent des conditions uniques favorisant une biodiversité riche et spécialisée. Ces milieux, influencés par des variations de salinité et des conditions semi-arides, abritent une flore et une faune adaptées aux environnements extrêmes. La diversité végétale se compose principalement de plantes halophiles, tandis que la faune est représentée par une multitude d'espèces, dont plusieurs sont rares ou menacées.

4.1. La flore

Les zones humides de l'Est algérien, notamment autour des chotts et sebkhas, se caractérisent par une grande diversité de plantes halophiles, incluant les Chénopodiacées, Brassicacées, Fabacées, et diverses graminées adaptées aux milieux salins (Pearce et Crivalli, 1994). L'éco-

complexe de Sétif compte environ 80 espèces végétales, avec une prédominance des Astéracées, Poacées et Chénopodiacées (47,54 %) et un coefficient générique de 68,62 %, témoignant d'une richesse floristique modérée (Benaradj et al., 2013 ; Aliat, 2017).

- **Sebkhet El Hamiet** : Flore limitée avec 20 espèces réparties en 10 familles, dominées par les thérophytes et chamaephytes (77 %), incluant des espèces comme *Juncus maritimus* et *Hordeum marinum* adaptées aux conditions salines (Benabadji, 1999).
- **Chott El Frain** : Flore de 22 espèces en 10 familles, dominée par les Chénopodiacées (27,27 %) et adaptée aux conditions salines et steppiques (Le Houerou, 1992).
- **Sebkhet Bazer** : Flore modérément diversifiée avec 25 espèces, principalement des Poacées (26,09 %). La végétation est majoritairement indigène (86,95 %), avec une prédominance d'espèces fourragères comme *Atractylis humilis* et *Bromus rubens*.
- **Chott El Beida** : Diversité floristique élevée avec 56 espèces, dont les Poacées sont majoritaires (16,07 %), indiquant une richesse exceptionnelle.

4.2. La faune

La région abrite une riche faune, incluant des rongeurs, reptiles, insectes, mammifères et oiseaux, dont de nombreuses espèces migratrices comme le Tadorne de Belon, le Flamant rose, et la Grue cendrée, conduisant à la classification des sites en zones Ramsar (Bensaci, 2011). Les inventaires de la faune ont débuté après la découverte de la nidification du Flamant rose (Houhamedi et al., 2009).

- **Sebkhet El Hamiet** : Fréquentée par environ 630 oiseaux annuellement, comprenant 21 espèces, principalement aquatiques comme le Tadorne de Belon et le Flamant rose (Boumezbeur, 2004 ; Baaziz et al., 2011).
- **Sebkhet Bazer** : Site important pour l'ornithologie, avec 48 espèces d'oiseaux aquatiques réparties en 15 familles, dont les Scolopacidae dominant. Le Flamant rose est particulièrement abondant en hiver, faisant de cette sebkha un site d'hivernage clé (Baaziz, 2012).

Chapitre III.

Matériel et méthodes

Chapitre III. Matériel et méthodes

Dans le présent chapitre, le protocole d'échantillonnage adopté pour la collecte des échantillons de sol sera détaillé, de même que les différentes méthodes d'analyse qui ont été appliquées.

1. Matériel d'étude

Ce travail se concentre sur l'étude pédologique et géochimiques de quatre sebkhas* appartenant à l'Eco-complexe Sud-Sétifien. Pour atteindre l'objectif de ce travail, chaque sebkha a fait l'objet d'une analyse approfondie basée sur l'étude d'une seule toposéquence par sebkha. Les toposéquences sont disposés selon un gradient topographique, allant des zones les plus élevées aux zones les plus basses d'une part et sont orientées des périphéries vers les centres des sebkhas pour couvrir une large gamme de salinité. L'approche par toposéquence permet d'examiner comment les variations topographiques influencent la distribution des sols et des dépôts sédimentaires au sein de chaque sebkha. Chaque sebkha a été étudiée à travers plusieurs profils pédologiques. L'implantation des profils a été réalisée de manière systématique, avec une distance fixe de 25 mètres entre deux profils. Cette distance a été choisie pour assurer une collecte systématique des données, prendre en considération les changements liés au gradient topographique et faciliter la comparaison efficace entre les profils. Cette approche permet de caractériser la stratification des sols, la composition minéralogique, la présence de sels solubles, et la dynamique de l'eau et des sols.

1.1. Echantillonnage sur le terrain

Dans Sebkhet El Hamiet (Figure 7), la toposéquence s'étend sur 250 m, orientée Nord-Sud, et comprend 10 profils pédologiques. Concernant Chott El Frain (Figure 8), la toposéquence est de 200 m, orientée Est-Ouest, avec 8 profils pédologiques. Dans Sebkhet Bazer (Figure 9), la toposéquence est de 200 m, orientée Sud-Ouest - Nord-Est. Elle comprend 8 profils pédologiques. A Chott El Beida (Figure 10), la toposéquence de cette sebkha mesure 200 m, orientée Nord-Ouest - Sud-Est, et comporte 8 profils pédologiques. L'échantillonnage a été réalisé en avril 2015 pour Sebkhet El Hamiet, et en novembre de la même année pour les trois autres sebkhas.

* le terme « Sebkhha » désigne à la fois les sebkhas et les chotts



Figure 7. Présentation de la toposéquence de Sebkheth El Hamiet



Figure 8. Présentation de la toposéquence de Chott El Frain



Figure 9. Présentation de la toposéquence de Sebkheth Bazer



Figure 10. Présentation de la toposéquence de Chott El Beida

Tous les profils ont été géoréférencés à l'aide d'un GPS de navigation modèle (GARMIN GPS 72). Les coordonnées géographiques sont présentées dans les tableaux IV, V, VI et VII.

La profondeur des profils pédologiques varie en fonction du niveau de la roche mère et de la nappe phréatique, avec une profondeur maximale atteignant 200 cm.

Tableau IV. Localisations géographiques et profondeurs des horizons des profils pédologiques de Sebket El Hamiet

Profils	Latitude	Longitude	Elévation (m)	Echantillon	Profondeur (cm)
Profil 1	35° 55' 36.5 '' N	005° 33' 05.4'' E	899,9	H11*	0-12
				H12	12-90
				H21	0-10
Profil 2	35° 55' 37.2 '' N	005° 33' 05.5'' E	899,4	H22	10-77
				H23	77-120
				H31	0-15
Profil 3	35° 55' 37.9 '' N	005° 33' 05.4'' E	898,6	H32	15-45
				H33	45-150
				H41	0-36
Profil 4	35° 55' 38.7 '' N	005° 33' 05.3'' E	895,1	H42	36-54
				H43	54-170
				H51	0-31
Profil 5	35° 55' 39.5 '' N	005° 33' 05.3'' E	897,6	H52	31-35
				H53	35-79
				H54	79-120
Profil 6	35° 55' 40.2 '' N	005° 33' 05.4'' E	895,2	H61	0-20
				H62	20-85
				H63	85-120
Profil 8	35° 55' 41.9 '' N	005° 33' 05.4'' E	900,3	H81	0-15
				H82	15 -150
				H91	0-21
Profil 9	35° 55' 43.1 '' N	005° 33' 05.4'' E	898,1	H92	21-91
				H93	91-150
				H101	0-15
Profil 10	35° 55' 43.8 '' N	005° 33' 05.3'' E	901,6	H102	15-96
				H103	96-150
				H111	0-22
Profil 11	35° 55' 44.7 '' N	005° 33' 05.3'' E	902,9	H112	22-112
				H113	112-150

*Codification des échantillons : la première lettre désigne la sebkha, le premier chiffre désigne le numéro du profil et le second désigne le numéro de l'échantillon.

Tableau V. Localisations géographiques et profondeurs des horizons des profils pédologiques de Chott El Frain

Profils	Latitude	Longitude	Elévation (m)	Echantillon	Profondeur (cm)
Profil 1	35° 53' 00.1 '' N	005° 37' 16.8'' E	895,5	F11	0-24
				F12	24-58
				F13	58-96
				F14	96-200
Profil 2	35° 53' 00.3 '' N	005° 37' 15.6'' E	897,0	F21	0-18
				F22	18-46
				F23	46-91
				F24	91-200
Profil 3	35° 53' 00.4 '' N	005° 37' 14.5'' E	899,3	F31	0-15
				F32	15-39
				F33	39-78
				F34	78-200
Profil 4	35° 53' 00.5 '' N	005° 37' 13.2'' E	897,2	F41	0-32
				F42	32-51
				F43	51-111
				F44	111-200
Profil 5	35° 53' 00.4 '' N	005° 37' 11.9'' E	898,0	F51	0-48
				F52	48-134
				F53	134-200
Profil 6	35° 53' 00.6 '' N	005° 37' 10.5'' E	898,9	F61	0-44
				F62	44-94
				F63	94-200
Profil 7	35° 53' 00.8 '' N	005° 37' 09.2'' E	898,5	F71	0-46
				F72	46-98
				F73	98-200
Profil 8	35° 53' 01.0 '' N	005° 37' 08.0'' E	899,8	F81	0-43
				F82	43-96
				F83	96-200

Tableau VI. Localisations géographiques et profondeurs des horizons des profils pédologiques de Sebket Bazer

Profils	Latitude	Longitude	Elévation (m)	Echantillon	Profondeur (cm)
Profil 1	36° 03' 00.9 '' N	005° 39' 40.9'' E	913,0	B11	0-65
				B12	65-200
Profil 2	36° 03' 00.6 '' N	005° 39' 39.9'' E	912,1	B21	0-72
				B22	72-200
				B31	0-48
Profil 3	36° 03' 00.2'' N	005° 39' 38.9'' E	916,3	B32	48-125
				B33	125-200
Profil 4	36° 03' 00.1 '' N	005° 39' 37.5'' E	916,3	B41	0-88
				B42	88-200
				B51	0-35
Profil 5	36° 02' 59.9'' N	005° 39' 36.3'' E	918,8	B52	35-116
				B53	116-128
				B54	128-143
				B55	143-200
Profil 6	36° 02' 59.7 '' N	005° 39' 35.1'' E	920,3	B61	0-68
				B62	68-200
				B71	0-25
Profil 7	36° 02' 59.5 '' N	005° 39' 34.0'' E	920,8	B72	25-69
				B73	69-137
				B74	137-200
				B81	0-23
Profil 8	36° 02' 59.3'' N	005° 39' 32.8'' E	923,3	B82	23-52
				B83	52-171
				B84	171-200

Cependant, chaque profil pédologique a fait l'objet d'une description détaillée selon la fiche de description STIPA 2000. Les descriptions des profils pédologiques sont présentées en détail dans le chapitre IV. Les horizons pédologiques ont été délimités et échantillonnés, les profondeurs des horizons figurent dans les tableaux IV, V, VI et VII. Au totale 29 échantillons ont été prélevés et analysés de Sebket El Hamiet, 24 de Chott El Beida, 28 de Chott El Frain et 24 échantillons de Sebket Bazer.

Les échantillons prélevés ont été séchés à l'air libre, broyés et tamisés à 2 mm avant d'être analysés.

Tableau VII. Localisations géographiques et profondeurs des horizons des profils pédologiques de Chott El Beida

Profils	Latitude	Longitude	Elévation (m)	Echantillon	Profondeur (cm)
Profil 1	35° 54' 58.7 '' N	005° 44' 51.1'' E	874,2	C11	0-32
				C12	32-75
Profil 2	35° 54' 59.5 '' N	005° 44' 49.5'' E	874,2	C21	0-43
				C22	43-80
				C31	0-30
Profil 3	35° 55' 00.0 '' N	005° 44' 48.3'' E	875,8	C32	30-87
				C33	87-130
				C34	130-165
				C41	0-50
Profil 4	35° 55' 00.4 '' N	005° 44' 47.4'' E	876,1	C42	50-119
				C43	119-200
				C51	0-32
Profil 5	35° 55' 00.8 '' N	005° 44' 46.5'' E	876,3	C52	32-73
				C53	73-129
				C54	129-200
				C61	0-38
Profil 6	35° 55' 01.1 '' N	005° 44' 45.6'' E	874,6	C62	38-82
				C63	82-200
				C71	0-30
Profil 7	35° 55' 01.5 '' N	005° 44' 44.7'' E	876,0	C72	30-104
				C73	104-200
				C81	0-48
Profil 8	35° 55' 02.0 '' N	005° 44' 43.8'' E	878,9	C82	48-122
				C83	122-200

2. Méthodes d'étude

2.1. Analyses physico-chimiques des échantillons de sol

La conductivité électrique (CE) et le pH des échantillons ont été mesurés à l'aide d'un extrait de pâte saturée (U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954). L'analyse granulométrique a été réalisée

selon la méthode internationale à la pipette de Robinson pour les argiles et les limons et par tamisage pour les sables (Pansu et Gautheyrou, 2006). Le calcaire total a été mesuré par la méthode volumétrique au calcimètre de Bernard (Dupuis, 1969). La matière organique a été déterminée par la méthode Walkley-Black modifié (Walkley et Black, 1934). L'équilibre ionique a été déterminé par la mesure des cations et des anions sur un extrait de pâte saturé (U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954). Les teneurs en sodium et en potassium ont été déterminées par photométrie à flamme, tandis que les teneurs en calcium et en magnésium ont été déterminées par absorption atomique.

Les chlorures ont été déterminés par la méthode de Mohr par titrimétrie au nitrate d'argent, les sulfates par gravimétrie au chlorure de baryum (Van Reeuwijk, 1987), et les carbonates et bicarbonates par titrimétrie à l'acide sulfurique (Rodier, 2016). Le gypse a été analysé par extraction au carbonate d'ammonium (Mathieu et Pieltain, 2003).

2.2. Analyse et traitement des données

Les activités ioniques et les indices de saturation vis-à-vis des minéraux ont été calculés à l'aide du modèle d'équilibre hydrogéochimique PhreeqC (Parkhurst et Appelo, 1999). Le diagramme de Piper a été construit à l'aide du logiciel " DIAGRAM " V6.5 (Simler, 2014).

Pour déterminer l'équilibre entre la solution du sol et les principaux minéraux susceptibles de se former dans les chotts et les sebkhas étudiés, les indices de saturation pour chaque minéral ont été calculés (Sajil Kumar, 2020). Ces indices permettent d'identifier le mode de réaction de dissolution ou de précipitation des minéraux.

L'indice de saturation IS de chaque minéral a été déterminé en utilisant l'équation suivante :

$$IS = \log_{10} (PAI/KPS)$$

Où PAI est le produit de l'activité ionique et Ksp est la constante d'équilibre à une température donnée. Lorsque la solution du sol est complètement saturée par rapport à un minéral donné, $IS = 0$; les valeurs positives d'IS indiquent un état de sursaturation, tandis que les valeurs négatives d'IS indiquent un état de sous-saturation (Bahir et al., 2018 ; Mirzavand et al., 2020b ; Mirzavand et al., 2020c).

Dans cette étude, le facteur de concentration (FC) a été utilisé pour suivre la concentration des solutions du sol. L'ion chlorure a été choisi comme traceur hydrochimique en raison de son

abondance, de sa forte solubilité et de son absence de précipitation, sauf à des niveaux très élevés de salinité (Valles, 1987). Le FC a été déterminé en divisant la concentration en chlorures de chaque solution par celle de l'échantillon le plus dilué. De plus, le calcul du facteur de concentration a été effectué séparément pour chaque sebkha.

L'alcalinité résiduelle calcite a été calculée selon la formule suivante :

$$\text{ARc (eq/l)} = \text{Alcalinite} - 2 [\text{Ca}^{++}]$$

Néanmoins, pour une meilleure analyse des données, une analyse statistiques descriptives a été appliquées, en plus de deux tests statistiques supplémentaires ont été réalisés. Le test de corrélation de Pearson a été utilisé pour évaluer l'association (dépendance) entre deux variables. De même, nous avons utilisé l'Analyse en Composantes Principales (ACP). Il s'agit d'une méthode statistique multidimensionnelle, factorielle et linéaire qui traite des caractéristiques numériques. Son objectif est de réduire la dimension d'un espace en essayant de déformer le moins possible les critères par rapport à la réalité. Dans cette étude, l'ACP permet d'étudier des sources indépendantes de la variabilité de tous les paramètres et de hiérarchiser les processus qui prédominent dans cet environnement. Les valeurs propres recherchées ont permis d'accéder aux axes factoriels présentant le maximum d'inertie.

Une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée sur les échantillons de chaque Sebkha séparément à partir des 17 variables suivantes : CE, pH, Cl⁻, SO₄⁻, HCO₃⁻, Na⁺, K⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, CaCO₃, gypse, matière organique (MO), argile, limon, sable, éléments grossiers et profondeur. Il s'agit d'une méthode d'analyse multivariée qui permet d'examiner simultanément un large ensemble de variables, dont l'intégralité des informations ne peut être visualisée en raison de la complexité d'un espace à plus de trois dimensions. Cette approche permet de mieux comprendre les liens entre les variables ainsi que les phénomènes qui les sous-tendent. Elle permet également l'identification des éléments de la solution qui ont plus de poids sur la variation de de CE.

Le test de Shapiro-Wilk a été effectué pour évaluer la distribution normale des données de conductivité électrique (CE) dans différents profils Ce test a été choisi en raison de sa robustesse, en particulier pour un nombre d'échantillons réduit (< 30 échantillons).

Avant d'effectuer le test paramétriques (ANOVA) et le test de Welch, il est important de vérifier l'homogénéité des variances. Si les variances ne sont pas homogènes, cela pourrait

affecter la validité des tests paramétriques. Pour cela le test de Levene a été appliqué aux données de conductivité électriques. Il est particulièrement robuste aux écarts de normalité dans les données.

Lorsque le test de Levene montre que les variances ne sont pas égales, le test de Welch est une alternative à l'ANOVA. L'homogénéité de la variance entre les groupes n'est pas une condition sinequanone pour le test de Welch, donc il est plus fiable dans ces situations. Ce test compare les conductivités électriques des profils deux à deux pour vérifier s'il existe une différence significative entre elles, en prenant en compte la non-homogénéité des variances.

L'Analyse de la variance (ANOVA) compare les moyennes de trois groupes ou plus pour déterminer s'il existe une différence significative entre les groupes. Ce test est essentiel pour la comparaison de plusieurs groupes. Dans la présente étude, l'ANOVA permet de déterminer si la conductivité électrique moyenne varie significativement d'un profil à l'autre au sein de la même toposéquence. L'ANOVA est pertinente lorsque les variances entre les groupes sont homogènes.

Le test statistique non paramétrique de Kruskal-Wallis, utilisé comme alternative à l'ANOVA lorsque les conditions de normalité ne sont pas respectées, compare les rangs des données entre plusieurs groupes pour vérifier s'ils proviennent de la même population. Dans le cadre de cette étude, ce test a permis d'évaluer l'hypothèse nulle selon laquelle les distributions de conductivité électrique (CE) sont identiques entre les profils pédologiques. Une p-value inférieure à 0,05 indique que cette hypothèse est rejetée, révélant des différences significatives dans les distributions de CE entre les profils étudiés.

Les tests « comparaisons multiples Post-Hoc » sont utilisés après avoir trouvé une différence significative avec un test global (ANOVA) pour identifier précisément quels groupes diffèrent entre eux. Dans cette étude, ce test a été utilisé pour identifier les profils présentant des similarités et des différences concernant la conductivité électrique.

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel XLSTAT 2014 et SPSS.

Les graphiques ont été générés à l'aide d'Adobe Illustrator, XLSTAT et le logiciel DIAGRAM V6.5.

***Chapitre IV. Caractérisation
pédologique de l'Eco-
complexe Sud Sétifien***

Chapitre IV. Caractérisation pédologique de l'Eco-complexe Sud-Sétifien

1. Introduction

Ce chapitre est consacré à une synthèse de la morphologie des sols étudiés au sein de l'Eco-complexe Sud-Sétifien. Elle se concentre sur l'étude de quatre toposéquences associées à quatre sebkhas et chotts. Elle explore en détail la description morphologique des profils pédologiques pour chaque toposéquence, en abordant à la fois les caractéristiques générales et la description de chaque profil.

Après une prospection sur le terrain, nous avons sélectionné quatre toposéquences à étudier, en réalisant une toposéquence par sebkha. Ce choix a été guidé par plusieurs facteurs. D'une part, nous avons pris en compte les caractéristiques géologiques et géomorphologiques du terrain, afin d'assurer la représentativité des sites étudiés. D'autre part, l'accessibilité et la propriété foncière ont joué un rôle crucial dans notre sélection. Les terrains entourant les sebkhas sont souvent difficiles d'accès, tandis que d'autres étaient sous la gestion de propriétaires privés, limitant ainsi notre liberté d'investigation.

Cette approche rigoureuse nous a permis de cibler les zones les plus pertinentes pour notre étude.

2. La toposéquences de Sebkhet El Hamiet

À Sebkhet El Hamiet, l'étude a été menée au mois d'avril 2015. La toposéquence étudiée, d'une longueur de 250 mètres (Figure 12), est orientée selon un axe Nord-Sud. Elle s'étend de l'extérieur vers le centre de la sebkha, ce qui permet de couvrir une gamme de salinité aussi large que possible. Du côté nord, elle repose sur un terrain appartenant au quaternaire continental, tandis que la sebkha est formée par de la vase et des alluvions anciennes. Le premier profil pédologique est situé dans un champ de blé en dehors des limites de la sebkha. Topographiquement, ce profil se trouve à la plus haute altitude de la toposéquence. À mesure que l'on se rapproche du centre de la sebkha, l'altitude diminue, ce qui confère à la toposéquence une disposition en pente. Douze profils pédologiques ont été réalisés, espacés de 25 mètres chacun. Cependant, le profil numéro 7 a été éliminé en raison de la perturbation du milieu.

L'échantillonnage a été interrompu au profil 11 en raison de la vitesse rapide de remontée de la nappe phréatique, qui a rendu impossible toute description. À ce stade, la nappe phréatique se situait à une profondeur de 90 cm. Au niveau du profil numéro 12, la nappe avait atteint la surface, ce qui a rendu toute description ou échantillonnage impossible. Par conséquent, seuls 10 profils pédologiques ont été retenus pour cette étude.

L'observation des 10 profils pédologiques révèle que tous les profils montrent une texture très argileuse, particulièrement homogène à travers les différents horizons. Tous les profils sont dépourvus d'éléments grossiers.

En ce qui concerne la structure du sol, les horizons H1 et H2 des profils HP1 et HP2, ainsi que l'horizon H3 du profil HP2, présentent une structure particulière. Les horizons H1 des profils HP5, HP6, HP8, HP9, et HP10, ainsi que l'horizon H3 du profil HP11, sont caractérisés par une structure polyédrique anguleuse. Par ailleurs, les horizons H1 des profils HP3 et HP11 se distinguent par une structure polyédrique subanguleuse. Tous les autres horizons présentent une structure continue ou massive.

L'effervescence à l'acide chlorhydrique est un trait commun. Elle est extrêmement forte et généralisée tout au long du profil, révélant une abondance significative de carbonate de calcium (CaCO_3) dans toute la toposéquence. La présence de nodules et concrétions calcaire tout au long du profil HP5, et des nodules dans le profil HP6, à partir du second horizon ainsi que de nodules de CaCO_3 dans le profil HP8. La présence de CaCO_3 sous formes de pseudo-mycélium dans les horizons de subsurface des profils HP1, HP2, HP 3, HP9, HP10, HP11 et tout le profil HP8. De même, la présence de CaCO_3 sous forme diffuse dans la matrice du sol au niveau de ces profils.

L'état de surface des sols se caractérisent par la présence des microcristaux de sels de formes sphériques de 1 à 3 mm de diamètre, transparents qui brillent à la lumière. Ces microcristaux sont présents dans les profils HP2, HP3, HP4, HP5 et HP6 particulièrement dans les horizons de profondeur.

*Codification des profils : la première lettre désigne la sebkh, la lettre P est l'abréviation de profil, le chiffre désigne le numéro du profil.

L'humidité du sol présente des variations significatives en fonction de la profondeur. En raison de la présence d'une nappe peu profonde, ceci entraîne une augmentation de l'humidité. En outre, l'humidité du sol tend à croître avec le rapprochement du centre de la sebkha. Cette augmentation est principalement due à la position topographique : les profils situés dans le fond de la sebkha sont à une altitude plus basse, ce qui les rapproche davantage de la nappe phréatique. Cette particularité s'applique sur toutes des sebkhas étudiées. Cette proximité avec la nappe est clairement observable dans les profils HP1 et HP3, où l'eau de la nappe est visible.

Ces fluctuations d'humidité jouent un rôle crucial dans les dynamiques des sels.

Les horizons numéro 2 des profils HP1 et HP2 se caractérisent par leur texture friable, leur fragilité, leur manque de dureté et leur nature meuble. En revanche, les horizons 2 des profils HP6 et HP8 sont également friables et meubles. Quant à l'horizon 2 du profil HP9, il est décrit comme étant peu friable et meuble. Les horizons numéro 3 des profils HP3 et HP4 sont caractérisés par une texture collante et une compacité notable. Pour le profil HP5, les horizons H2, H3 et H4 sont décrits comme collants et compacts. L'horizon numéro 3 du profil HP6 se distingue par une texture très collante, ferme et extrêmement compacte. En termes de fragilité, l'horizon H1 du profil HP5 est peu friable, fragile mais une compacité notable. L'horizon H1 du profil HP8, quant à lui, est non fragile, légèrement dur et peu compact. Pour le profil HP10, l'horizon H1 est non fragile, légèrement dur et compact. L'horizon H2 de ce même profil est peu friable et meuble. L'horizon 3 est non friable et peu compact.

Les horizons H1 et H2 des profils HP1 et HP2, ainsi que les horizons H1, H2 et H3 des profils HP3, HP4, HP5, HP9 et HP10 et l'horizon H2 du profil HP8, présentent une variété de textures, allant de légèrement poudreux à très poudreux.

L'horizon H1 du profil HP11 est décrit comme très fragile, non dur, meuble et peu poreux. Enfin, l'horizon H3 du profil HP9 est très friable et peu compact, tandis que l'horizon H2 du profil HP10 est peu friable et meuble.

En ce qui concerne la matière organique, l'horizon H1 du profil HP10 présente une matière organique faible. Les horizons H1 des profils HP1, HP2, HP4, HP8 et HP9 ainsi que les horizons H2 des profils HP1, HP2, HP3, HP6, présentent une matière organique moyenne. L'horizon H1 du profil HP6 ainsi que les horizons H1 et H2 du profil HP11 présentent une

matière organique assez forte. Les horizons H1 et H2 du profil HP5 présente une matière organique forte. Les autres horizons sont dépourvus de matière organique.

Concernant les traces d'activité biologique, les horizons H1 des profils HP1, HP2, HP5 et HP6 révèlent une activité biologique significative, marquée par la présence de nombreuses racines de plantes très fines. Les horizons H2 des profils HP1, HP2, HP3, ainsi que l'horizon H3 du profil HP2, et les horizons H1 des profils HP8, HP9 et HP10, montrent des traces d'activité biologique peu nombreuses. Dans le profil HP8, ces traces incluent des racines nécrosées et des coquilles d'escargots, tandis que dans le profil HP9, elles se manifestent sous forme de racines décomposées et de coquilles d'escargots. Pour le profil HP10, elles se matérialisent sous forme de galeries. L'horizon H1 du profil HP11 se distingue par la présence abondante de galeries et de racines décomposées. Les horizons H2 des profils HP5 et HP6, quant à eux, présentent également une activité biologique notable. Enfin, les autres horizons sont dépourvus de toute trace d'activité biologique.

Concernant la couleur les teintes sont très variables, elles se répartissent comme suit :

Teintes très foncées avec dark brown 7,5 YR 3/4 (H1 du HP6), dark grayish brown 10 YR 4/2 (H4 du HP5).

Teintes brunes intermédiaires avec reddish brown 5 YR 4/4 (H1 du HP3), brown 7,5 YR 4/4 (les H1 des HP2, HP9, HP10), 7,5 YR 4/3 (H1 du HP1), 7,5 YR 5/4 (H1 du HP8, H2 du HP10, H3 du HP11), 10 YR 5/3 (les H2 des HP6 et HP11, H3 du HP9), grayish brown 10 YR 5/2 (H3 du HP6, H2 du HP8), dark yellowish brown 10 YR 4/4 (H1 du HP11).

Teintes claires avec pale brown 10 YR 6/3 (les H2 des HP1 et HP3, les H1 des HP4 et HP5), light brownish gray 10 YR 6/2 (H3 du HP5), pinkish gray 5 YR 7/2 (H3 du HP2), 7,5 YR 6/2 (H2 du HP9), weak red 2,5 YR 4/2 (H3 du HP3), pale yellow 2,5 Y 8/3 (H2 du HP4), 2,5 Y 8/2 (H2 du HP5), light brownish gray 2,5 Y 6/2 (H3 du HP10).

Certaines caractéristiques spécifiques, telles que les taches d'oxydation sont présentes dans certains profils mais absentes dans d'autres. Les horizon H1, H2, H3 et H4 du profil HP5, Les horizon H1, H2 et H3 du profil HP6. L'horizon H1 du profil HP9, présentent des taches d'oxydation éparpillées dans la matrice.



Profil HP1



Profil HP2



Profil HP3



Profil HP4



Profil HP5



Profil HP6



Profil HP8



Profil HP9



Profil HP10

Profil HP11

Figure 11. Les photos des profils pédologiques de la toposéquence de Sebket El Hamiet

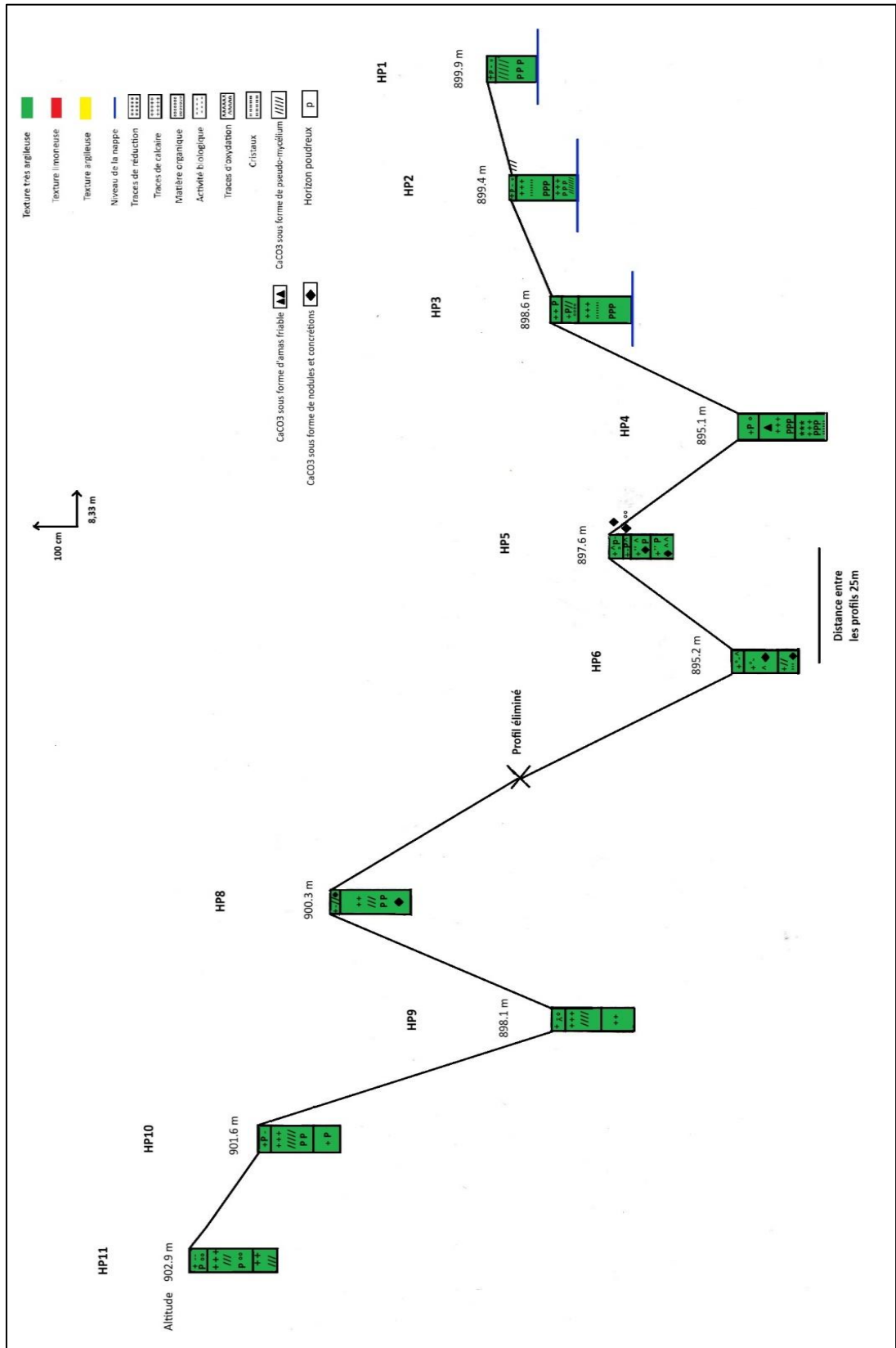


Figure 12. Description pédologique de la toposequence de Sebket El Hamiet

- **Conclusion**

En conclusion, l'étude menée à Sebkhet El Hamiet a permis de mettre en évidence des caractéristiques pédologiques variées au sein de la toposéquence étudiée. Les dix profils analysés révèlent une texture très argileuse homogène et l'absence d'éléments grossiers, avec des structures variées allant de particulaire à polyédrique et massive. La présence généralisée de carbonate de calcium sous forme de nodules et de pseudo-mycélium, ainsi que des microcristaux de sel dans certains horizons profonds, souligne les processus d'accumulation dans cet environnement salin.

L'augmentation de l'humidité avec la proximité de la nappe phréatique et le centre de la sebkha influence directement les propriétés mécaniques des sols, les rendant plus collants et compacts dans les horizons plus profonds. L'effervescence à l'HCl, observée dans tous les profils, confirme la forte présence de calcaire. Ceci qui est dû à la formation géomorphologique de la région. Les couleurs dominantes sont les bruns et gris, associés à des processus d'oxydation ou de réduction. Et les couleurs claires sont liées aux accumulations calcaires

Les traces d'activité biologique varient considérablement selon les horizons. Enfin, les taches d'oxydation observées dans certains horizons soulignent les conditions d'oxydo-réduction particulières de la sebkha.

3. La toposéquence de Chott El Frain

Le chott est entouré sur ses limites Est, Nord et Sud par des formations géologiques datant du Quaternaire continental, comprenant des alluvions, des regs et des terrasses. À l'Est, le chott est bordé par des formations quaternaires, suivies de formations du Pliocène continental, telles que les poudingues et le calcaire lacustre (voir Figure 6).

Autrefois, la récolte de sel à Chott El Frain était une activité artisanale importante. Cependant, après de fortes inondations, la couche de sel a été recouverte par une épaisse couche de vase, ce qui a entraîné l'arrêt de la production de sel, comme le rapportent les villageois locaux. Le sel extrait dans cette région est principalement attribué à des formations datant du Trias.

L'analyse des huit profils pédologiques de la toposéquence montre que tous les profils présentent une texture argileuse à très argileuse à travers les différents horizons. Tous les profils enregistrent une absence complète d'éléments grossiers.

La structure est continue ou massive est observée tout au long des profils FP1 et FP2 et dans les horizons de profondeur des autres profils. Les profils FP3, FP4, FP5, FP6 présentent une structure lamellaire dans la partie supérieure du profil à moins de 50 cm. Les profils FP4, FP5, FP6, FP7 et FP8 présentent une structure polyédrique subanguleuse dans les horizons de subsurface.

En ce qui concerne la porosité, les horizons H1 et H2 des profils FP1, FP2 et FP3, affichent une porosité faible. Les horizons H1 et H2 des profils FP4, FP5, FP7 et FP8, ainsi que les horizons H1, H2, H3 et H4 du profil FP6, présentent une porosité moyenne. Les autres horizons sont dépourvus de porosité.

Un autre point commun est l'effervescence à l'acide chlorhydrique, qui est forte et généralisée tout au long des profils, révélant une présence significative de carbonate de calcium (CaCO_3) dans les sols. Les horizons H1 et H2 des profils FP4 et l'horizon H1 du profil FP5 et les horizons H1 et H3 du profil FP6, présentent des accumulations de CaCO_3 sous forme de pseudo-mycélium. Les horizons H4 des profils FP1 et FP2 ainsi que les horizons H3 et H4 du profil FP3 enregistrent une présence de cristaux de sel assez nombreux de dimension moyenne.

Les horizons H1 du profil FP1 ainsi que les horizons H1 et H2 des profils FP2, FP3, FP4, FP5 et FP6 sont très fragiles, très friables et peu compacts. Les horizons H3 des profils FP2 et FP3, ainsi que les horizons H3 et H4 du profil FP6, sont collants, très fermes et compacts.

Les horizons H2, H3 et H4 du profil FP1, les horizons H4 des profils FP2 et FP3, ainsi que les horizons H2 des profils FP7 et FP8, présentent des propriétés mécaniques de très plastique et très compact. Les horizons H1 et H2 des profils FP4 et FP6, ainsi que l'horizon H1 du profil FP5, sont fragiles, non durs et peu compacts. L'horizon H3 du profil FP5 et l'horizon H5 du profil FP6 sont non fragiles, légèrement durs et compacts. L'horizon H1 du profil FP7 est peu fragile, meuble et peu compact. Les horizons H2 des profils FP7 et FP8 sont compacts et durs, tandis que les horizons H3 des profils FP7 et FP8 sont très durs et compacts.

Concernant la couleur les teintes sont très variables, elles se répartissent comme suit :

Teintes très foncées avec very dark grayish brown 10 YR 3/2 (les H2 du FP5 et FP8), very dark gray 10 YR 3/1 (H2 du FP7).

Teintes rouges à brunes avec reddish brown 5 YR 4/4 (les H1 du FP5 et FP6), 5 YR 4/3 (H1 du FP8), brown 7,5 YR 4/4 (H1 du FP7), 7,5 YR 5/2 (H2 du FP1), 10 YR 5/3 (H2 du FP3), grayish brown 10 YR 5/2 (H1 du FP3).

Teintes claires avec light gray 5 Y 7/2 (H4 du FP1), 10 YR 7/2 (H3 du FP2), 2,5 Y 7/2 (H1 du FP4), pale brown 10 YR 6/3 (H1 du FP2), light brownish gray 10 YR 6/2 (H2 du FP2), very pale brown 10 YR 7/3 (H4 du FP2), pale yellow 2,5 Y 8/2 (H4 du FP4)

Teintes très claires avec white 5 Y 8/1 (les H3 des FP1, FP3, FP5, FP6, FP7, FP8 et le H2 du FP6), 7,5 YR 8/1 (H4 du FP3, H3 du FP4).

L'horizon H2 du profil FP1 se caractérise par une abondance de taches rouges d'oxydation de taille moyenne. Elles sont réparties uniformément dans la matrice du sol et concentrées autour des pores. L'horizon H2 du profil FP2 présente également des taches rouges d'oxydation, bien que légèrement moins nombreuses, de dimensions variant de petites à moyennes, distribuées dans la masse. Enfin, l'horizon H2 du profil FP3 est notable pour ses taches rouges d'oxydation, qui sont assez nombreuses et de taille moyenne.

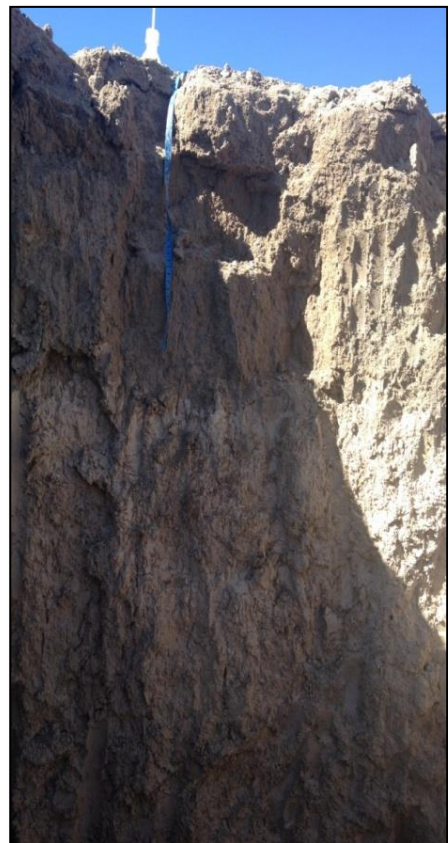
En ce qui concerne la matière organique, les horizons H2 des profil FP2 et FP3 ainsi que l'horizon H1 du profil FP2, présentent une matière organique moyennement abondante. Absence de matière organique au niveau des horizons H3 et H4 du profil FP3. L'horizon H1 du profil FP3 ainsi que les horizons H2 des profils FP5, FP6, FP7 et FP8 présentent une matière organique assez forte et faiblement dégradée. Les horizons H1 des profil FP4, FP5, FP6, FP7 et FP8 présentent une matière organique fortement abondante et faiblement altérée. Les horizons H3 des profil FP5 et FP6 présente une matière organique relativement abondante et faiblement altérée. L'horizon H4 du profil FP5 présente une matière organique très altérée. L'horizon H3 du profil FP7 présente une matière organique relativement forte et altérée. Les horizons H3 des profil FP6 et FP8 présente une matière organique faiblement abondante et altérée. L'horizon H3 du profil FP4 présente une matière organique fortement abondante et altérée.

L'activité biologique n'est observée que dans l'horizon H1 du profil FP1, ainsi que dans les horizons H1 et H2 du profil FP2, où l'on note de rares traces sous forme de galeries de rongeurs

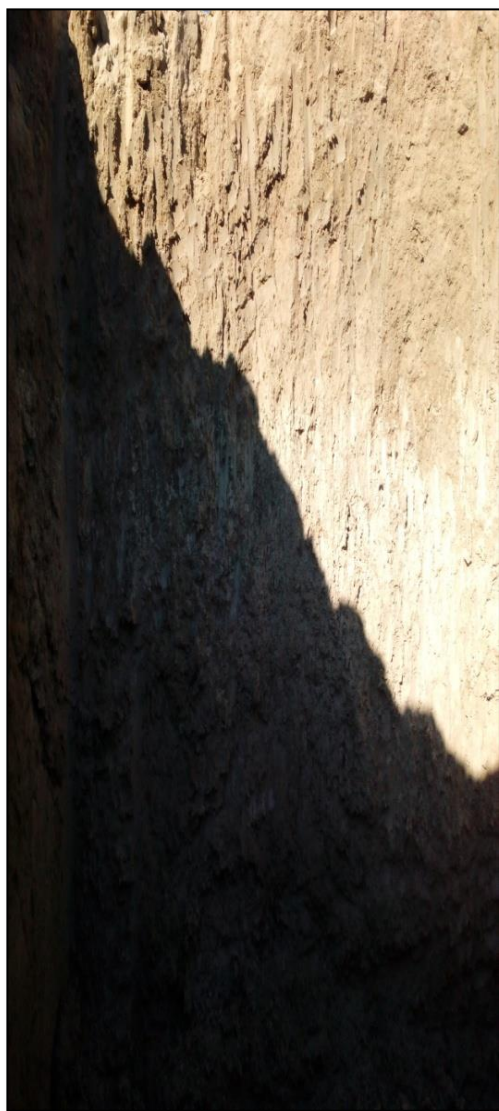
et de quelques conduits de vers orientés verticalement. En revanche, les horizons H1 et H2 des profils FP4, FP5, FP7, et FP8, ainsi que les horizons H1, H2, H3 et H4 du profil FP6, montrent une activité biologique très marquée avec de nombreuses racines décomposées et de nombreux conduits de vers.



Profil FP1



Profil FP2



Profil FP3



Profil FP4



Profil FP5



Profil FP6



Profil FP7



Profil FP8

Figure 13. Les photos des profils pédologiques de la toposéquence de Chott El Frain

- **Conclusion**

En conclusion, l'analyse des huit profils pédologiques de la toposéquence révèle une homogénéité notable dans la texture argileuse à très argileuse des horizons, ainsi qu'une absence complète d'éléments grossiers. Les structures pédologiques varient avec une prépondérance des structures continues ou massives en profondeur, tandis que les structures lamellaires et polyédriques subanguleuses sont principalement observées dans les horizons de subsurface. En général la structure est plus grossière et anguleuse en profondeur.

Concernant la porosité, une distinction est observée entre les horizons supérieurs des profils FP1, FP2 et FP3, qui sont faiblement poreux, et ceux des profils FP4, FP5, FP6, FP7, et FP8, qui présentent une porosité moyenne. Les autres horizons présentent une très faible porosité. L'effervescence généralisée à l'acide chlorhydrique indique une forte concentration de carbonate de calcium (CaCO_3), marquée par des accumulations sous forme de pseudo-mycélium. Il a été enregistré aussi la présence des cristaux de sel dans certains horizons.

D'une manière générale, la structure est massive, tassée et dégradée, elle est très prononcée en profondeurs.

Les propriétés mécaniques des horizons varient également selon leur position dans le profil, allant de très fragiles et friables à très fermes et compacts. La couleur est dominée par des nuances foncées, qui suggèrent des conditions réductrices, souvent associées à un mauvais drainage ou à une accumulation de matière organique. L'activité biologique, bien que peu marquée dans certains profils, est particulièrement visible dans d'autres.

4. La toposéquence de Sebkhet Bazer

L'étude a été réalisée en novembre 2015 à Sebkhet Bazer. La toposéquence s'étend sur une longueur de 200 mètres (Figure 16), orientée Sud-Ouest - Nord-Est. Elle s'étend de l'extérieur vers le centre de la sebkha.

Le chott est entouré du côté Nord par des formations géologiques datant du Quaternaire continental, comprenant des alluvions, des regs et des terrasses. À l'Est, l'Ouest et le Sud le chott est entouré par des formations du Pliocène continental (poudingues et calcaire lacustre) (voir Figure 6).

Sebkhet Bazer est remplie d'eau durant toute l'année, elle ne se dessèche jamais durant les saisons sèche, ce qui en fait une destination de choix pour les oiseaux migrateurs.

L'analyse des huit profils pédologiques de la toposéquence de Sebkhet Bazer révèle la présence de deux types de textures dominantes. La texture limoneuse se retrouve dans les horizons H1 et H2 des profils BP1, BP3, BP7, dans l'horizon H1 des profils BP2 et BP6, dans l'horizon H2 du profil BP4, ainsi que dans les horizons H1, H3, H4 et H5 du profil BP5, et les horizons H1 et H3 du profil BP8. En revanche, la texture très argileuse est observée dans les horizons H2 des profils BP2, BP5 et BP6, dans l'horizon H3 du profil BP3, dans l'horizon H1 du profil BP4, ainsi que dans les horizons H3 et H4 du profil BP7 et les horizons H2 et H4 du profil BP8.

Cependant, les éléments grossiers, l'horizon H1 du profil BP8 présente moins de 5 % d'éléments grossiers. L'horizon H2 du profil BP3 contient 10 % d'éléments grossiers. L'horizon H1 du profil BP2 enregistre 15 % d'éléments grossiers sous forme de pierres et cailloux de tailles variées. Les horizons H1 des profils BP1 et BP3 présentent 30 % d'éléments grossiers, composés de pierres et cailloux. L'horizon H2 du profil BP4 contient 40 % d'éléments grossiers de forme arrondie, tandis que l'horizon H1 du même profil en présente 60 %, sous diverses formes et tailles. L'horizon H2 du profil BP1 est marqué par des éléments grossiers constitués de cristaux arrondis de tailles variées et de graviers.

Enfin, les horizons H2 du profil BP2, H3 du profil BP3, H1 et H5 du profil BP5, H1 et H2 du profil BP6, H1 et H4 du profil BP7, ainsi que H2 et H4 du profil BP8 sont dépourvus d'éléments grossiers. L'horizon H2 du profil BP1 présente un grand nombre de cristaux de taille très grosse dans tout l'horizon. L'horizon H2 du profil BP2 présente de nombreux cristaux de taille moyenne, probablement de la calcite. L'horizon H2 du profil BP3 présente des cristaux, peu nombreux et aussi des nodules, assez nombreux, fins, de nature carbonatée durs, d'une forme arrondie. Les horizons H2 des profils BP5 et BP6 ainsi que les horizons H3 des profils BP5, BP7 et BP8, présentent du CaCO_3 sous forme d'amas friables.

Les horizons H1 des profils BP1 et BP2, ainsi que les horizons H2 des profils BP5 et BP7, sont caractérisés par une faible porosité. Les horizons H1 des profils BP4, BP5, BP6, BP7, et BP8 sont moyennement poreux. L'horizon H1 du profil BP3 présente une porosité moyenne, mais avec des pores très fins. Les horizons H2 des profils BP2, BP4, et BP6, ainsi que les horizons H2 et H3 du profil BP3, les horizons H3, H4, et H5 du profil BP5, et les horizons H3 et H4 des profils BP7 et BP8, sont totalement dépourvus de porosité.

En ce qui concerne la structure, les horizons H1 des profils BP1, BP2, et BP4 présentent une structure particulière. Les horizons H2 des profils BP1 et BP2, ainsi que l'horizon H3 du profil BP3, affichent une structure continue ou massive. Les horizons H1 et H2 du profil BP3, l'horizon H5 du profil BP5, ainsi que les horizons H3 des profils BP7 et BP8, sont caractérisés par une structure polyédrique anguleuse. L'horizon H2 du profil BP4, les horizons H1 des profils BP5, BP6, BP7, et BP8, l'horizon H3 du profil BP5, ainsi que les horizons H4 des profils BP5, BP7, et BP8, présentent une structure polyédrique subanguleuse. Enfin, les horizons H2 des profils BP5, BP6, BP7, et BP8 se distinguent par une structure lamellaire.

Les horizons des différents profils pédologiques présentent des caractéristiques distinctes en termes d'humidité, de friabilité, de compacité, et de cohésion. Les horizons H1 des profils BP1 et BP2 partagent un aspect humide, non plastique, non collant, et meuble. Ces caractéristiques sont présentes dans l'horizon H1 du profil BP2. Ensuite, les horizons H2 des profils BP1 et BP2 se distinguent par leur humidité très élevée, leur grande plasticité, leur forte adhésion, et leur fermeté extrême. Les horizons secs des profils BP3 révèlent des variations de fragilité et de compacité. L'horizon H1 est sec, très fragile, et peu compact, tandis que l'horizon H2 est également sec, mais non fragile, peu dur et peu compact. L'horizon H3 du même profil est sec, non fragile, très peu dur, mais plus compact que les précédents. Les horizons frais, friables, et meubles sont présents dans plusieurs profils. Les horizons H1 des profils BP4, BP5, BP7, ainsi que les horizons H1 et H4 du profil BP8, partagent ces caractéristiques. L'horizon H1 du profil BP8 et l'horizon H4 du même profil se distinguent toutefois par une friabilité particulièrement élevée. Par ailleurs, de nombreux horizons se caractérisent par un aspect frais, peu friable, et compacte. Cela inclut l'horizon H2 du profil BP4, les horizons H2, H3, H4 et H5 du profil BP5, ainsi que les horizons H2 et H3 des profils BP7 et BP8. L'horizon H4 du profil BP7 se distingue par une compacité encore plus prononcée. Enfin, les horizons H1 du profil BP6 et H3 du profil BP8 sont frais, friables, et peu compacts.

En ce qui concerne la réaction à l'acide chlorhydrique, tous les profils montrent une effervescence qui varie de forte pour les horizons BP1 et BP2 à extrêmement forte pour le reste des profils. Cette effervescence est généralisée dans tous les profils ce qui indique une présence de carbonate de calcium (CaCO_3) dans les sols.

Concernant la couleur les teintes sont très variables, elles se répartissent comme suit :

Teintes très claires avec pale yellow 2,5 Y 7/3 (les H1 des BP5, BP6, BP7, BP8 et H3 du BP8), pale yellow 2,5 Y 7/4 (H2 du BP7, H3 du BP8), pale yellow 5 Y 7/3 (H3 du BP7), light yellowish brown 2,5 Y 6/3 (H1 du BP4, les H2 du BP4, BP8), 10 YR 6/4 (H1 du BP2, H2 et H3 du BP3, H4 du BP8), yellow 10 YR 7/6 (H2 du BP2, H3 du BP3, H4 du BP7).

Teintes brunes avec yellowish brown 10 YR 5/4 (H2 du BP6, H4 du BP7), pale brown 10 YR 6/3 (H1 du BP1, les H4 des BP4 et BP5), light olive brown 2,5 Y 5/4 (H3 du BP5), brown 10 YR 5/3 (H1 du BP3), reddish yellow 7,5 YR 7/6 (H2 du BP1).

Les horizons superficiels des différents profils étudiés présentent, en général, une teneur moyenne en matière organique. Cependant, certains horizons se distinguent par l'absence de matière organique. C'est le cas des horizons H2 et H3 du profil BP3, des horizons H3, H4 et H5 du profil BP5, ainsi que de l'horizon H2 des profils BP1, BP2, BP4 et BP6. De même, les horizons H2, H3 et H4 des profils BP7 et BP8 montrent une absence notable de matière organique. Enfin, les horizons H2 des profils BP5, BP7 et BP8 affichent une faible teneur en matière organique.

Concernant l'activité biologique, les horizons H1 des profils BP1 et BP3 se distinguent par des traces d'activités biologiques très nombreuses, comprenant des coquilles, des racines décomposées ou saines, ainsi qu'un grand nombre de conduits de vers. Les horizons H1 des profils BP2 et BP3 montrent des traces d'activités biologiques nombreuses, incluant des coquilles, des racines décomposées, des conduits de vers nombreux, avec des racines peu nombreuses orientées verticalement. Les horizons superficiels des profils BP4, BP5, BP6, BP7, et BP8 présentent des traces d'activités biologiques peu nombreuses, telles que des coquilles, des racines décomposées, des galeries de rongeurs, et des racines peu nombreuses orientées verticalement. Les horizons H2 des profils BP3, BP5, BP7, et BP8 montrent des traces d'activités biologiques très peu nombreuses, principalement des racines décomposées et un petit nombre de conduits de vers. Enfin, l'horizon H3 du profil BP3 et les horizons H2 des profils BP4 et BP6 se caractérisent par une absence ou une présence très réduite de traces d'activités biologiques, comprenant très peu de coquilles et de racines orientées verticalement.

En ce qui concerne les taches d'oxydation, les horizons H1 des profils BP1 et BP2 présentent des taches rouges d'oxydation assez nombreuses, localisées sur les faces des agrégats, de taille moyenne à irrégulière et peu contrastées. Les horizons H2 des mêmes profils montrent des taches rouges d'oxydation peu nombreuses, localisées dans la matrice, de taille fine, avec des

formes irrégulières et très contrastées. L'horizon H3 du profil BP3 et l'horizon H2 du profil BP4 sont caractérisés par des taches rouges d'oxydation très nombreuses, présentes à la fois dans la matrice et sur les faces des agrégats, de grosse taille et d'une forme irrégulière et contrastée. Les horizons H2, H3, et H5 du profil BP5, ainsi que l'horizon H2 du profil BP6, montrent des taches rouges d'oxydation nombreuses à très nombreuses, généralisées ou localisées sur l'ensemble de l'horizon. Enfin, les horizons H2 et H3 du profil BP7, ainsi que l'horizon H3 du profil BP8, présentent des taches rouges d'oxydation très nombreuses, de très grosse taille, localisées à la fois dans la matrice et sur les faces des agrégats.



Profil BP1



Profil BP2



Profil BP3



Profil BP4



Profil BP5



Profil BP6



Profil BP7



Profil BP8

Figure 15. Les photos des profils pédologiques de la toposéquence de Sebkhet Bazer

- **Conclusion**

En conclusion, l'analyse des huit profils pédologiques de la toposéquence de Sebket Bazer met en évidence des variations significatives en termes de textures, porosité, structure, teneur en matière organique, et activité biologique. Deux types de textures dominent : la texture limoneuse et la texture très argileuse, réparties de manière hétérogène à travers les différents horizons. Les éléments grossiers sont présents dans plusieurs horizons, avec une prédominance dans les horizons superficiels. La porosité varie d'une faible à une moyenne selon les horizons et les profils, avec certains horizons totalement dépourvus de porosité. La structure des sols est également diversifiée, allant de particulaire à massive ou polyédrique, influençant ainsi les caractéristiques mécaniques des horizons. Les horizons se différencient également par leur degré d'humidité, de friabilité et de compacité, reflétant des conditions variées au sein des différents horizons analysés. L'effervescence à l'acide chlorhydrique généralisée à tous les horizons témoigne de la présence de carbonate de calcium. Les couleurs dominantes sont les teintes claires, représentant des sols riches en carbonates de calcium et pauvres en matière organique, suivies des teintes brunes plus foncées. De plus, la teneur en matière organique est généralement faible à moyenne, avec des horizons présentant une absence notable de matière organique. L'activité biologique, bien que présente dans certains horizons superficiels, est relativement limitée dans les horizons plus profonds. Enfin, les taches d'oxydation observées dans plusieurs horizons suggèrent des processus de drainage et d'aération variables dans les sols de la toposéquence.

5. La toposéquence de Chott El Beida

L'étude a été réalisée en novembre 2015 à Chott El Beida. La toposéquence étudiée, orientée Nord-Ouest - Sud-Est, s'étend sur 200 mètres (Figure 18), partant de l'extérieur vers le centre du chott. Ce dernier est entouré de formations géologiques du Quaternaire continental, comprenant des alluvions, des regs et des terrasses. Au nord, les formations quaternaires sont suivies de formations du Pliocène continental, constituées de poudingues et de calcaire lacustre (voir Figure 6).

L'analyse des huit profils pédologiques révèle la présence de trois types de textures dominantes. Les horizons H1 des profils CP5, CP6, CP7 et CP8 présentent une texture limoneuse, tandis que l'horizon H2 du profil CP1, les horizons H1 et H2 des profils CP2 et

CP3, ainsi que les horizons H1, H2 et H3 du profil CP4 et H2 et H3 des profils CP5, CP6, CP7 et CP8 sont argileux. Les horizons H1 du profil CP1, H3 du profil CP3 et H4 du profil CP5 sont très argileux. Il peut être remarqué la présence d'éléments grossiers dans les horizons H1 et H2 des profils CP4, CP5 et CP7 et l'horizon H1 du profil CP6.

En ce qui concerne la structure, les horizons H1 et H2 des profils CP1 et CP2 montrent une structure particulière, avec un aspect poudreux. Les horizons H1 des profils CP3 à CP8 ainsi que H2 du profil CP3 présentent une structure polyédrique subanguleuse. Par ailleurs, les horizons H2 des profils CP4 à CP8, ainsi que H3 des profils CP3 à CP8 et H4 des profils CP3 et CP5, possèdent une structure polyédrique anguleuse.

Pour ce qui est de l'humidité, les horizons H1 des profils CP3 et CP4, ainsi que les horizons H1 et H2 des profils CP5 à CP8 sont secs. L'horizon H1 du profil CP2, l'horizon H2 du profil CP3 et H3 des profils CP5 et CP6 sont frais. Les horizons H3 des profils CP3 et CP7, l'horizon H2 du profil CP4 et H4 du profil CP5 sont humides. Les horizons H1 et H2 du profil CP1, H2 du profil CP2 et H3 du profil CP4 sont très humides, tandis que l'horizon H4 du profil CP3 est saturé.

Les propriétés mécaniques varient en fonction de la texture, de la structure et de l'état d'humidité. L'horizon H1 du profil CP1 est plastique, collant, ferme et compact, tandis que H2 du même profil et H3 du profil CP3 sont très plastiques, très collants, fermes et très compacts. L'horizon H1 du profil CP2 est très friable et peu compact, tandis que H2 du même profil et H3 du profil CP4 sont compacts et plastiques. H2 du profil CP3 est peu friable et peu compact. Les horizons superficiels des profils CP4 à CP8 sont fragiles, non durs et meubles. Les horizons H2 des profils CP5 à CP7 sont moins fragiles, très peu durs et peu compacts, tandis que les horizons H4 des profils CP3 et CP5 ainsi que H3 des profils CP4, CP6 et CP7 sont très compacts. Enfin, H4 du profil CP5 et H3 du profil CP7 sont non collants, fermes et très compacts.

L'effervescence à l'acide chlorhydrique est forte dans les horizons H1 et H2 des profils CP1 et CP2, tandis qu'elle est extrêmement forte dans les autres profils, indiquant la présence généralisée de carbonate de calcium (CaCO_3). L'horizon H1 du profil CP3, l'horizon H2 du profil CP6, et l'horizon H3 du profil CP8 présentent du CaCO_3 sous forme de pseudo-mycélium. L'horizon H2 du profil CP5, quant à lui, contient du CaCO_3 sous forme de pseudo-mycélium, accompagné de nodules peu nombreux et durs, tandis que l'horizon H2 du profil

CP7 en présente avec des nodules carbonatés. De plus, l'horizon H3 du profil CP3 contient du CaCO_3 sous forme d'amas friables, et l'horizon H4 du même profil présente un encroustement de CaCO_3 .

En ce qui concerne la couleur les teintes sont très variables, elles se répartissent ainsi :

Couleurs très foncées avec dark brown 10 YR 3/3 (les HA des CP4, CP5), dark grayish brown 10 YR 4/2 (H3 du CP3), dark gray 7,5 Y 4/1 (H3 du CP4).

Couleurs brunes intermédiaires avec reddish brown 5 YR 5/4 (H1 du CP1), brown 7,5 YR 4/4 (les H1 des CP2 et CP9), 7,5 YR 4/3 (Les H1 des CP3, CP6, CP7, H2 du CP5), 10 YR 5/3 (les H2 des CP3, CP4, CP6), yellowish brown 10 YR 5/4 (H3 du CP6, H2 du CP7, H1 du CP8), light reddish brown 2,5 YR 7/3 (H3 du CP7).

Couleurs claires avec pinkish gray 5 YR 6/2 (H2 du CP2), pale brown 10 YR 6/3 (H2 du CP1), light yellowish brown 10 Y 6/4 (H2 du CP8), pale yellow 2,5 Y 7/3 (H3 du CP8), pinkish white 5 YR 8/2 (les H4 des CP3, CP5).

En ce qui concerne la matière organique, l'horizon H1 du profil CP1 ainsi que les horizons H3 et H4 du profil H3 sont dépourvus de matière organique. Les horizons H2 des profils CP2, CP3 et CP4 montrent une matière organique moyennement abondante. L'horizon H1 du profil CP4, ainsi que les horizons H2 des profils CP5, CP6, CP7 et CP8, présentent une matière organique assez forte et faiblement altérée. De plus, les horizons H1 des profils CP4, CP5, CP6, CP7 et CP8 se distinguent par une matière organique fortement abondante et faiblement altérée. Quant aux horizons H3 des profils CP5, CP6, CP7 et CP8, ils contiennent une matière organique faiblement abondante et faiblement altérée. L'horizon H3 du profil CP4 présente une matière organique fortement abondante et altérée, tandis que l'horizon H4 du profil CP5 révèle une matière organique très altérée.

Concernant l'activité biologique, les horizons H1 et H2 du profil CP1, ainsi que les horizons H3 et H4 du profil CP3, et H3 et H4 des profils CP4 et CP5, ne montrent aucune trace d'activité biologique. En revanche, les horizons H1 et H2 du profil CP2, H2 du profil CP3, ainsi que H3 des profils CP5, CP6, CP7 et CP8 révèlent des traces d'activité biologique peu nombreuses, se manifestant par des coquilles, racines décomposées, conduits de vers et galeries de rongeurs. Enfin, les horizons H1 des profils CP3 et CP4, ainsi que H1 et H2 des profils CP5, CP6, CP7

et CP8, présentent des traces d'activité biologique abondantes, sous forme de coquilles, racines décomposées et conduits de vers.

Concernant les taches d'oxydation, l'horizon H2 du profil CP1 montre une présence de taches rouges d'oxydation en faible quantité. De même, l'horizon H2 du profil CP2 révèle des taches rouges d'oxydation peu nombreuses, mais de taille moyenne. Les horizons H3 et H4 du profil CP3 affichent des taches rouges d'oxydation abondantes et de grande dimension. Les horizons H3 des profils CP4, CP6, CP7 ainsi que l'horizon H4 du profil CP5 présentent une forte concentration de taches rouges d'oxydation, caractérisées par leur grande taille et leur apparence peu nette. Enfin, l'horizon H3 du profil CP8 présente des taches rouges d'oxydation nombreuses, de taille moyenne et peu nettes.

- ***Conclusion***

En conclusion, l'analyse détaillée des huit profils pédologiques met en lumière une grande diversité dans les caractéristiques des horizons étudiés. Trois textures dominantes sont observées, allant de la limoneuse à l'argileuse, avec des variations significatives dans la structure, l'humidité, les propriétés mécaniques et la présence d'éléments comme le carbonate de calcium. La porosité, l'effervescence à l'acide chlorhydrique, et la composition en matière organique varient également, indiquant des différences importantes dans les processus pédogénétiques et les conditions de formation des sols. Les couleurs dominantes sont des bruns et des gris, associés à des processus d'oxydation, de réduction et de présence de matière organique. Les teintes claires, bien que plus rares, reflètent des horizons riches en calcaire et dépourvus de matière organique.



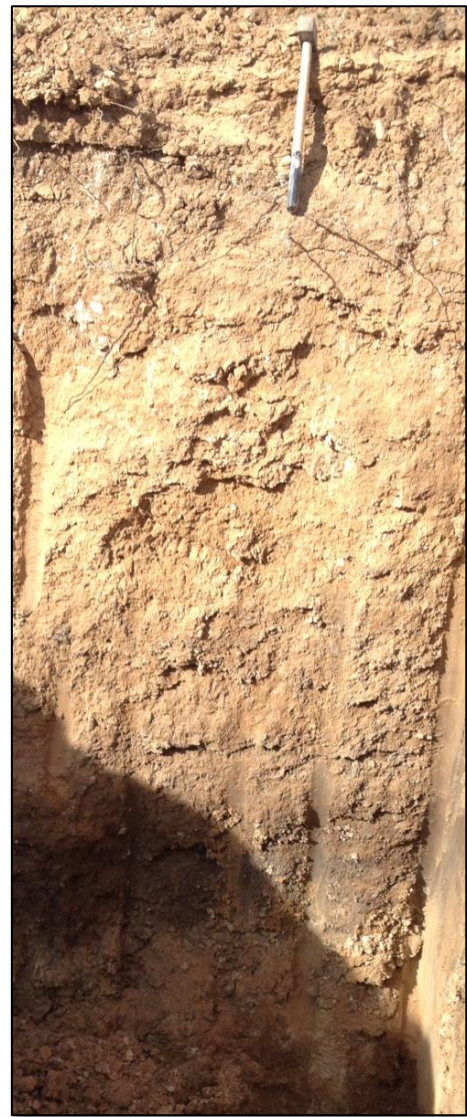
Profil CP1



Profil CP2



Profil CP3



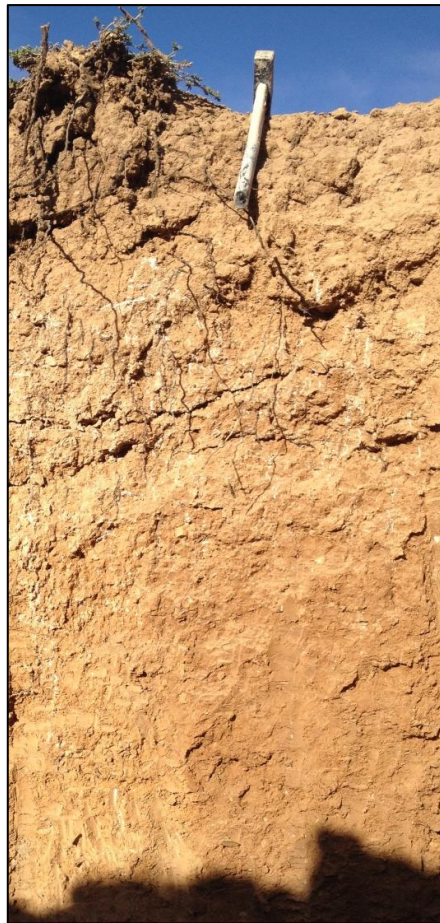
Profil CP4



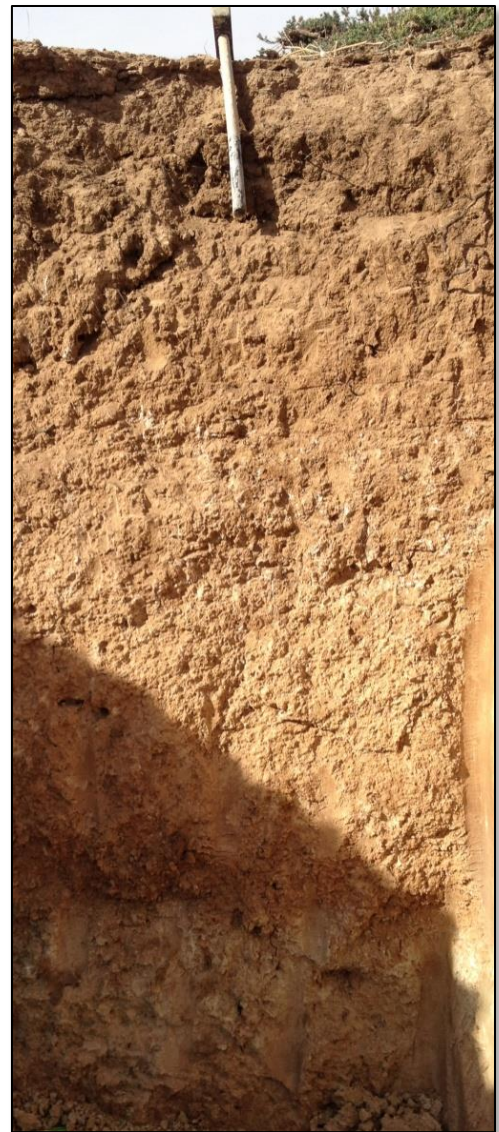
Profil CP5



Profil CP6



Profil CP7



Profil CP8

Figure 17. Les photos des profils pédologiques de la toposéquence de Chott El Beida

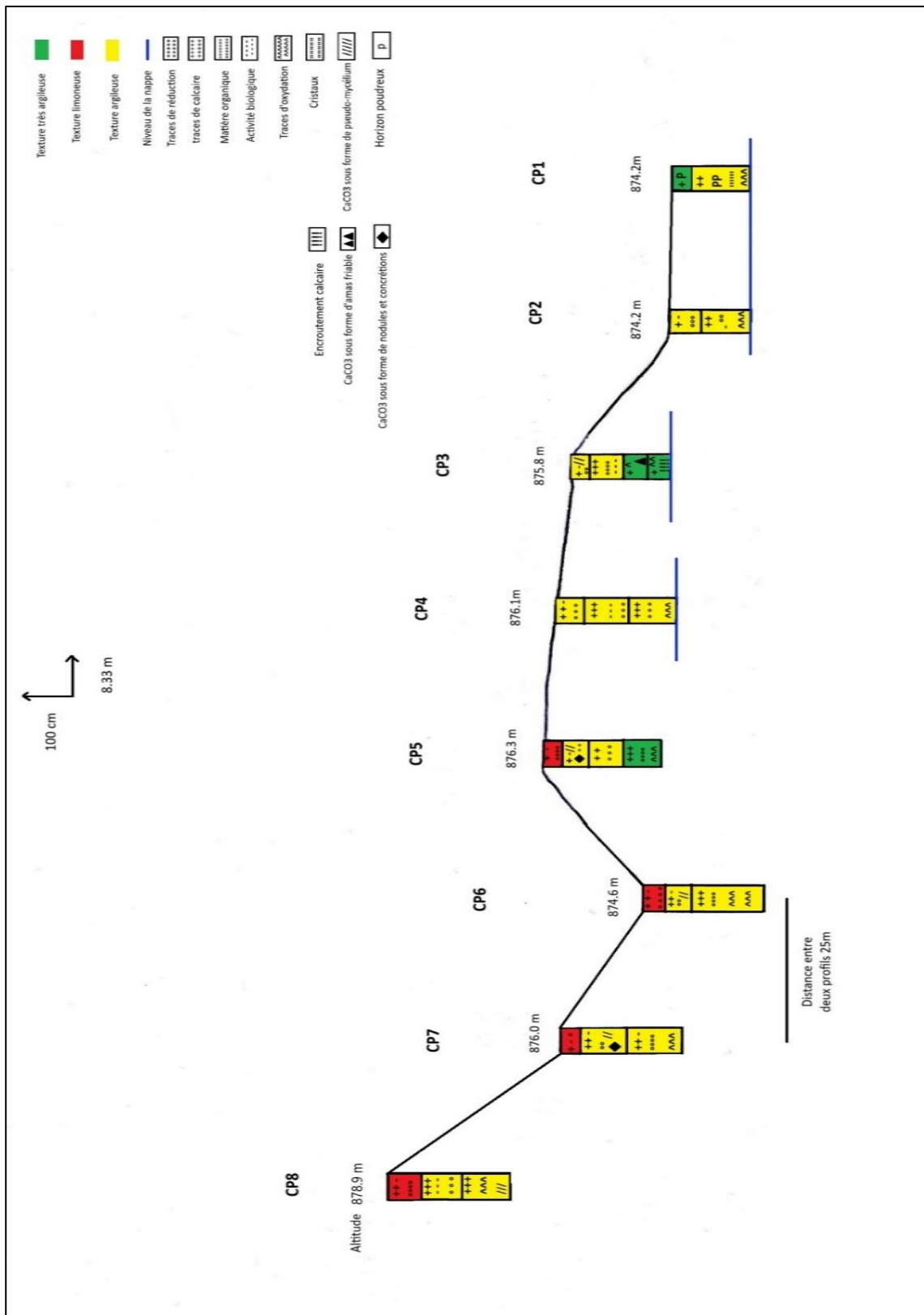


Figure 18. Description pédologique de la toposéquence de Chott El Beida

6. Conclusion

L'analyse descriptive des quatre toposéquences révèle une diversité de caractéristiques texturales, structurelles, influencées par les conditions locales. Les sols se distinguent par des textures majoritairement argileuses, parfois limoneuses, et une absence quasi-générale d'éléments grossiers, sauf à Sebkhet Bazer où ces derniers sont présents en surface.

Les structures varient de particulière à massive, avec une porosité allant de faible à moyenne selon les horizons et la proximité des centres de sebkhas. La teneur en CaCO_3 est constante dans tous les profils, se manifestant sous différentes formes (diffuse, nodules, pseudo-mycélium) et témoignant de l'influence des formations géologiques carbonatées. Les microcristaux de sel et les taches d'oxydo-réduction observés dans les horizons profonds reflètent des processus d'accumulation saline et des conditions d'humidité spécifiques, particulièrement en lien avec la nappe phréatique.

L'observation de l'état de surface des quatre sebkhas montre une structure très dégradée au niveau de Chott el Beida avec la présence de croute de battance en surface.

*Chapitre V. Étude
comparative des sols à
travers une approche
statistique*

Chapitre V. Étude comparative des sols à travers une approche statistique

1. Introduction

Dans ce chapitre, les résultats des analyses physico-chimiques des sols des quatre sebkhas seront présentés de manière détaillée, en soulignant les caractéristiques propres à chaque site. Ce chapitre se structure en plusieurs étapes analytiques.

Tout d'abord, les statistiques descriptives de chaque paramètre étudié seront exposées.

Ensuite, une analyse en composantes principales (ACP) sera réalisée, fondée sur une matrice de corrélation de Pearson. Par cette approche, les corrélations entre les variables pourront être visualisées, et la complexité des données sera réduite en identifiant les axes qui extraient le plus d'information résiduaire. Cette ACP fournira des informations importantes sur les relations entre les paramètres physico-chimiques, facilitant l'interprétation des facteurs qui influencent la salinisation des sols des sebkhas.

Un test de normalité de Shapiro-Wilk sera ensuite appliqué aux données de la conductivité électrique afin de vérifier si les données suivent une distribution normale. Un test d'homogénéité des variances de Levene sera aussi effectué pour évaluer la constance des variances entre les différents groupes de données.

Enfin, une comparaison multiple entre les moyennes des CE sera effectuée à l'aide de tests post hoc en occurrence le test LSD. Cette comparaison multiple permettra d'identifier les différences significatives des CE entre les profils au sein de chaque sebkha.

2. Analyses statistiques des données de Sebkhet El Hamiet

2.1. Statistiques descriptives

Les statistiques descriptives des caractéristiques du sol sont présentées dans le tableau VIII.

La réaction du sol varie de neutre à alcaline. Les valeurs oscillent entre 7,17 à 7,36 (Annexe II) avec un pH moyen de 7,79. La conductivité électrique montre une très forte variabilité, au

regard du coefficient de variation (CV=75,86%). Avec des valeurs qui oscillent entre 3,25 dS/m et 132,26

Tableau VIII. Statistiques descriptives des paramètres étudiés « Sebket El Hamiet »

Variable	Min	Max	Moy	Ecart type	CV (%)
CE	3,25	132,26	59,00	44,76	75,86
pH	7,17	8,36	7,79	0,31	3,98
Cl⁻	29,00	2080,00	765,10	664,95	86,91
SO₄⁻	68,00	411,40	189,62	75,40	39,76
HCO₃⁻	3,10	4,50	3,76	0,38	10,16
Na⁺	122,00	1540,00	591,13	415,57	70,30
Ca⁺⁺	7,96	459,98	214,56	156,82	73,08
Mg⁺⁺	8,18	264,52	113,24	85,88	75,84
K⁺	0,19	31,84	10,17	10,29	101,14
CaCO₃	5,62	47,24	23,30	11,45	49,14
Gypse	1,91	61,69	25,57	17,21	67,28
MO	1,39	36,55	14,52	9,37	64,55
EG	0	0	0	0	0
Argile	24,00	64,95	51,84	9,72	18,75
Limon	20,00	69,85	40,55	10,31	25,42
Sable	2,56	31,38	7,96	7,28	91,44
Profondeur	5,00	170,00	77,10	53,56	69,46

dS/m. Cependant, le taux de CaCO₃ varie de 5,62 % à 47,24 % avec une moyenne de 23,30 %. La teneur en gypse varie de 1,91 % à 61,69 % (moyenne = 25,58 ; CV = 67,28 %). La teneur en matière organique varie de 1,40 % à 36,56 %, avec une très forte variabilité (CV= 64,56 %). La texture du sol est globalement fine et dominée par la classe Clay et Silty Clay selon le triangle de l'USDA.

2.2. Etude des corrélations Pearson

Le tableau IX, présente la matrice de corrélation de Pearson pour sebkhet El Hamiet, mettant en relation les paramètres suivants : CE, pH, Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , CaCO_3 , gypse, matière organique (MO), les éléments grossiers (EG), argile, limon, sable et profondeur. Il en ressort des corrélations positives et significatives entre la CE, les chlorures, ainsi que les ions Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} et K^+ . Le sodium présente une corrélation positive avec le gypse, tout comme le pH avec les ions bicarbonates. Les sulfates montrent une corrélation positive avec la profondeur. En revanche, le HCO_3^- et le pH sont négativement corrélés avec la CE, Cl^- , Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} et K^+ . De même, le CaCO_3 présente une corrélation négative avec les chlorures, le sodium, le magnésium et le gypse. Une corrélation négative est également observée entre la matière organique et le gypse. Enfin, des corrélations négatives existent entre l'argile et le limon, ainsi qu'entre le sable et l'argile, et entre le sable et la matière organique.

Tableau IX. Corrélation de Pearson entre les différents paramètres « Sebket El Hamiet »

Variables	CE	pH	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	CaCO ₃	Gypse	MO	EG	Argile	Limon	Sable	Profondeur
CE	1																
pH	-0,741	1															
Cl ⁻	0,917	-0,753	1														
SO ₄ ²⁻	0,159	-0,074	0,180	1													
HCO ₃ ⁻	-0,747	0,907	-0,731	-0,083	1												
Na ⁺	0,789	-0,618	0,952	0,316	-0,599	1											
Ca ⁺⁺	0,977	-0,796	0,905	0,230	-0,785	0,770	1										
Mg ⁺⁺	0,974	-0,759	0,917	0,154	-0,762	0,785	0,973	1									
K ⁺	0,701	-0,652	0,638	-0,003	-0,648	0,496	0,697	0,753	1								
CaCO ₃	-0,310	0,252	-0,460	-0,251	0,177	-0,531	-0,318	-0,388	-0,287	1							
Gypse	0,203	-0,270	0,346	0,209	-0,311	0,451	0,170	0,212	0,161	-0,570	1						
MO	0,033	0,114	-0,067	-0,162	0,068	-0,125	-0,012	0,016	-0,105	0,360	-0,396	1					
EG													1				
Argile	-0,197	-0,007	-0,158	0,077	-0,073	-0,139	-0,165	-0,118	0,281	0,048	0,014	-0,006		1			
Limon	0,112	0,189	-0,005	-0,258	0,176	-0,077	0,075	0,043	-0,242	0,174	-0,258	0,199		-0,796	1		
Sable	0,045	-0,235	0,160	0,214	-0,131	0,235	0,059	0,024	-0,166	-0,253	0,328	-0,377		-0,386	-0,226	1	
Profondeur	0,108	-0,120	-0,056	0,375	-0,097	-0,122	0,203	0,054	-0,077	0,038	-0,187	-0,163		-0,123	0,159	0,002	1

P=0,05 et ddl= 26

2.3. Analyse en composante principale

Le tableau X, présente la corrélation des axes avec les différents paramètres. De même, l'ACP permettra la détermination des éléments de la solution du sol qui ont le plus de poids sur la variation de la CE. L'objectif est d'avoir une information concentrée sur l'axe représentant l'inertie résiduelle la plus élevée (Ayadi et al., 2008). Elle est largement utilisée pour interpréter les données hydrochimiques et géochimiques (Abrid, 2015 ; Toumi et al., 2016). L'analyse statistique des données physico-chimiques a été effectuée sur une matrice de corrélation. Cette matrice est constituée de 17 variables et de 29 échantillons ou individus.

Par ailleurs, l'observation de la figure 19, révèle l'existence de 4 composantes principales où la valeur propre est supérieure à 1 selon le critère de Kaiser-Meyer-Olkin (Kaiser, 1960) (Tableau X). Tous ensemble, ils expliquent 78,61 % de la variabilité totale observée. La première composante (F1) explique 42,89 % de la variabilité totale ; c'est un processus important qui devrait être facilement identifié. Il est ensuite suivi d'un second axe (F2) avec 14,47% de variabilité. Les axes (F3) et (F4) expriment respectivement 12,46 %, et 8,78 % de la variabilité totale. Afin de faciliter la compréhension de la source de variabilité expliquée par les axes, une attention particulière est accordée aux variables ayant une forte contribution positive ou négative à l'axe factoriel (Tableau Annexe X, XI, XII). Néanmoins, au regard d'un faible pourcentage de la contribution de certaines variables, ces dernières ont été exclues, seules les 2 premières dimensions ont été retenues pour interpréter l'analyse.

Dans les sols de Sebket El Hamiet, il semble qu'un mécanisme spécifique influence de manière déterminante la composition chimique de la solution du sol. Le premier axe factoriel oppose les éléments solubles dont la concentration augmente avec la salinité (CE), à savoir Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , Cl^- , aux éléments dont la concentration est contrôlée par la précipitation des minéraux comme le pH et HCO_3^- . Cet axe pourrait être associé au processus de salinisation ; d'une part la concentration ionique est directement influencé par la précipitation dissolution des minéraux responsables de l'augmentation de la solution du sol. D'une autre part cette concentration ionique induit à la précipitation de minéraux neutre qui ne provoquent pas une augmentation du pH. Ceci peut être observé sur la figure 19 où l'augmentations des de la CE et des ions Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , Cl^- , est accompagnée d'une baisse des bicarbonates et donc du pH.

Tableau X. Coefficients de corrélation des variables centrées réduites avec les facteurs

	F1	F2	F3	F4
CE	0,93	0,28	-0,02	0,02
pH	-0,85	-0,01	-0,12	-0,08
Cl⁻	0,95	0,07	-0,06	-0,13
SO₄⁻	0,23	-0,38	-0,19	0,61
HCO₃⁻	-0,84	-0,04	-0,19	-0,08
Na⁺	0,87	-0,10	-0,14	-0,16
Ca⁺⁺	0,94	0,25	-0,01	0,14
Mg⁺⁺	0,94	0,22	0,04	-0,004
K⁺	0,74	0,04	0,45	-0,03
CaCO₃	-0,48	0,48	0,25	0,18
Gypse	0,40	-0,62	-0,20	-0,30
MO	-0,14	0,60	0,29	-0,11
EG	0,00	0,00	0,00	0,00
Argile	-0,07	-0,41	0,87	0,16
Limon	-0,10	0,73	-0,56	-0,11
Sable	0,18	-0,47	-0,56	-0,04
Profondeur	0,05	0,12	-0,25	0,87
Valeur propre	6,86	2,31	1,99	1,40
Variabilité (%)	42,89	14,47	12,46	8,78
% cumulé	42,89	57,36	69,83	78,61

En revanche, les axes (F1) et (F2) représentent plus de la moitié de l'information résiduaire, car ils expriment 57,36 % de l'inertie totale.

Concernant l'étude des individus (Figure 20) (Tableau Annexe XIII, XIV), les échantillons H71, H72, H73, H81, H82, H93, H101, H102, H111, H112, présentent les conductivités électriques les plus élevées et une forte concentration ionique. Avec un pH et une concentration en bicarbonate qui est relativement faible. Ce premier groupe concerne les échantillons qui sont les plus proches du centre de la sebkha. Les échantillons H11, H12, H13, H21, H22, H23, H31, H32, H33, H41, H61 sont les moins salés et les moins concentrés, ils sont positionnés à l'extérieur de la sebkha.

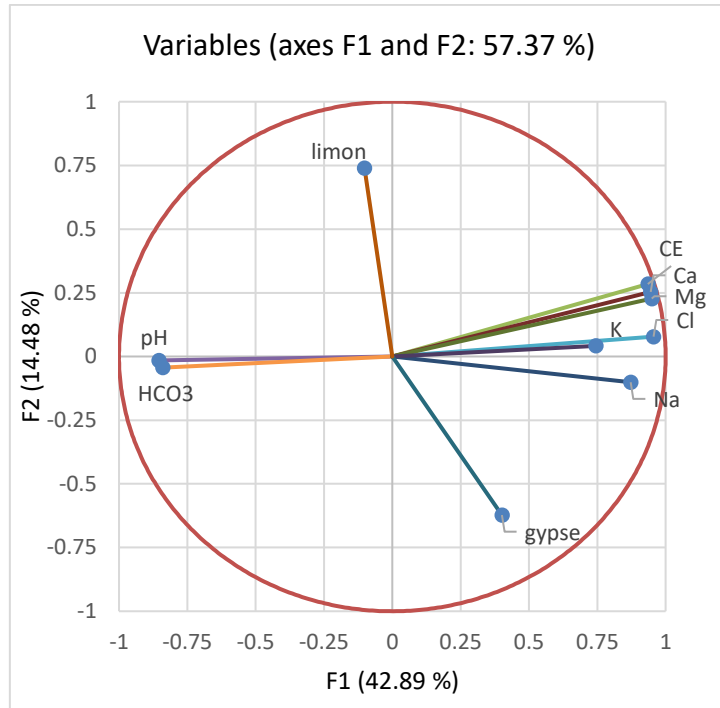


Figure 19. Graphique des variables étudiées en fonction des axes F1 et F2 (ACP) « Sebkhiet El Hamiet »

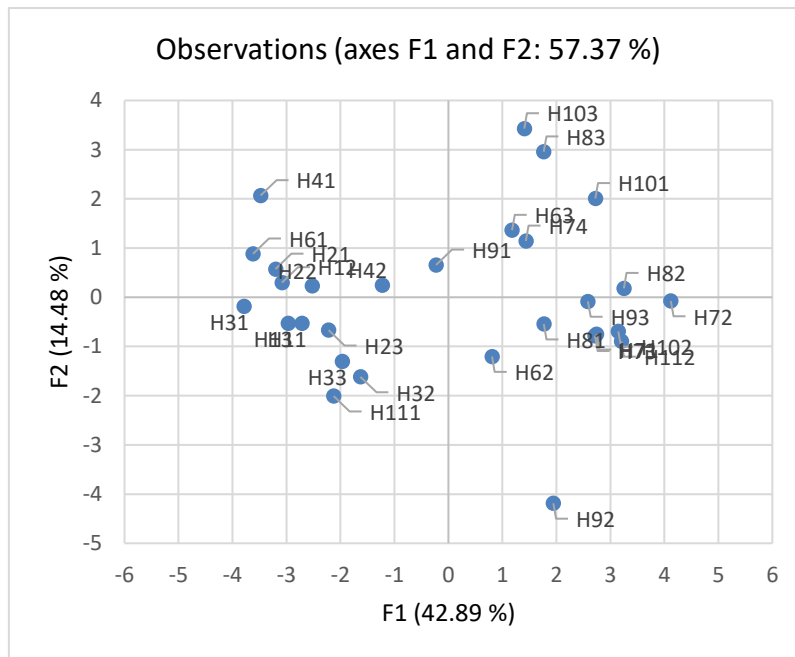


Figure 20. Graphique des individus en fonction des axes F1 et F2 (ACP) « Sebkhiet El Hamiet »

2.4. Test de normalité de Shapiro-Wilk

Le test de normalité de Shapiro-Wilk a permis de déterminer si les données de conductivité électrique des échantillons de sols, recueillis sur les 10 profils pédologiques, suivent une distribution normale. Ce test est souvent privilégié pour les petits échantillons en raison de sa sensibilité à détecter des écarts par rapport à la normalité.

Les résultats du test, présentés dans le tableau XI, montrent des p-values associées aux profils analysés. En général, lorsque la p-value est supérieure à 0,05, cela signifie qu'il n'y a pas suffisamment de preuves pour rejeter l'hypothèse nulle, qui stipule que les données suivent une distribution normale. Dans le cas présent, la majorité des profils présentent des p-values supérieures à 0,05, ce qui suggère que pour ces profils, les valeurs de conductivité électrique peuvent être considérées comme normalement distribuées.

Tableau XI. Test de normalité de Shapiro-Wilk

		Shapiro-Wilk		
	Profils	Statistiques	ddl	Sig.
CE (dS/m)	HP1			
	HP2	,78	3	,08
	HP3	,79	3	,09
	HP4	,77	3	,05
	HP5	,98	4	,93
	HP6	,77	3	,06
	HP8			
	HP9	,88	3	,32
	HP10	,83	3	,19
	HP11	,99	3	,93

3. Tests d'homogénéité des variances

Le test de Levene appliqué aux données de conductivité électrique (CE), vise à déterminer si les variances des différents profils pédologiques sont homogènes ou non. Le test de Levene est utilisé pour vérifier l'hypothèse d'homogénéité des variances, qui est une condition importante pour l'utilisation de tests paramétriques comme l'ANOVA et LSD.

Le tableau XII présente quatre versions du test de Levene, chacune basée sur une méthode de calcul différente. Les résultats des tests se présentent comme suit :

La p-value de 0,000 indique une différence significative entre les variances des différents profils. Cela signifie que l'hypothèse d'homogénéité des variances est rejetée, suggérant que les profils présentent des niveaux de variabilité différents en termes de conductivité électrique. L'hétérogénéité des variances ainsi révélée suggère qu'il serait approprié d'utiliser des tests non paramétriques ou des tests paramétriques robustes comme le test de Welch pour comparer les profils.

Selon la méthode basée sur la médiane et la médiane avec degrés de liberté ajustés, les p-values sont supérieures à 0,05 (0,196 et 0,313), ce qui signifie que l'hypothèse d'homogénéité des variances ne peut pas être rejetée. Les variances des profils sont donc considérées comme homogènes pour ces deux méthodes. Ainsi, l'hypothèse d'homogénéité des variances étant respectée, il est possible d'appliquer des tests paramétriques traditionnels comme l'ANOVA.

En conclusion, les résultats des tests d'homogénéité des variances (test Levene) montrent une différence significative dans les variances de la conductivité électrique pour les différents profils, à cet égard l'ANOVA ne peut pas être appliquée sur ces données, elle sera remplacée par le test de Welch.

Tableau XII. Test d'homogénéité des variances

		Statistique de Levene	df1	df2	Sig.
CE (dS/m)	Basé sur la moyenne	9,36	9	19	,00
	Basé sur la médiane	1,56	9	19	,19
	Basé sur la médiane avec ddl ajusté	1,56	9	5,42	,31
	Basé sur la moyenne tronquée	8,18	9	19	,00

3.1. Test d'égalité des moyennes « test de Welch »

Le test robuste de Welch (Tableau XIII) a été utilisé pour comparer les moyennes des conductivités électriques (CE) entre différents profils pédologiques.

Les résultats du test de Welch montrent une p-value très faible, indiquant une différence significative entre les moyennes des CE pour les différents profils. Cela signifie que les valeurs moyennes de conductivité électrique varient de manière significative entre les profils pédologiques étudiés.

En conclusion, la différence significative entre les moyennes des CE selon le test de Welch indique que les sols prélevés dans différents profils pédologiques n'ont pas les mêmes niveaux de salinité.

Tableau XIII. Test robuste d'égalité des moyennes

CE (dS/m)	Statistiques ^a	df1	df2	Sig.
Welch	31,52	9	6,70	,0001

a. F distribué asymptotiquement

3.2. Comparaisons multiples (LSD)

Afin de déterminer les différences précises entre les conductivités électriques (CE) des divers profils pédologiques de Sebkhet El Hamiet, il est recommandé d'utiliser des tests de comparaison multiple (tests LSD). Ces tests ont été utilisés après avoir identifié une différence significative globale par le test de Welch, afin de déterminer spécifiquement quels profils diffèrent les uns des autres.

Selon les résultats du tableau XIV, il existe une différence significative (p -value < 0,05) pour les paires de profils suivant : (HP1 et HP2), (HP1 et HP11), (HP2 et HP3), (HP4 et HP1), (HP5 et HP1), (HP6 et HP2), (HP8 et HP2), (HP9 et P2), (HP10 et HP2), (HP11 et HP2), (HP3 et HP8), (HP3 et HP9), (HP3 et HP10), (HP3 et HP11), (HP4 et HP6), (HP4 et HP8), (HP4 et HP9), (HP4 et HP10), (HP4 et HP11), (HP5 et HP6), (HP5 et HP8), (HP5 et HP9).

En conclusion, les tests de comparaison multiple (Post-Hoc) ont permis de mettre en évidence des différences significatives entre les conductivités électriques des divers profils pédologiques de Sebkhet El Hamiet.

Tableau XIV. Comparaisons multiples (LSD)

(I) Profil	(J) Profils	Différence		Sig.	95% Intervalle de confiance		
		moyenne (I-J)	Erreur standard		Borne inférieure	Borne supérieure	
Profil 1	HP2	-70,37*	20,17	,002	-112,60	-28,14	
	HP3	-16,28	20,17	,43	-58,51	25,95	
	HP4	-47,85*	20,17	,028	-90,08	-5,61	
	HP5	-40,35*	19,14	,049	-80,41	-,28	
	HP6	7,72	20,17	,70	-34,50	49,95	
	HP8	36,32	22,10	,11	-9,93	82,58	
	HP9	38,02	20,17	,07	-4,21	80,25	
	HP10	38,16	20,17	,07	-4,06	80,39	
	HP11	46,91*	20,17	,031	4,67	89,14	
	Profil 2	HP1	70,37*	20,17	,002	28,14	112,60
		HP3	54,09*	18,04	,007	16,32	91,87
HP4		22,52	18,04	,227	-15,24	60,30	
HP5		30,02	16,88	,091	-5,30	65,36	
HP6		78,10*	18,04	,000	40,32	115,87	
HP8		106,70*	20,17	,000	64,46	148,93	
HP9		108,39*	18,04	,000	70,62	146,17	
HP10		108,54*	18,04	,000	70,76	146,31	
HP11		117,28*	18,04	,000	79,51	155,06	
Profil 3		HP1	16,28	20,17	,430	-25,95	58,51
		HP2	-54,09*	18,04	,007	-91,87	-16,32
	HP4	-31,57	18,04	,096	-69,34	6,20	
	HP5	-24,07	16,88	,170	-59,40	11,26	
	HP6	24,00	18,04	,199	-13,76	61,78	
	HP8	52,60*	20,17	,017	10,37	94,83	
	HP9	54,30*	18,04	,007	16,52	92,07	
	HP10	54,44*	18,04	,007	16,66	92,21	
	HP11	63,19*	18,04	,002	25,41	100,96	
	Profil 4	HP1	47,85*	20,17	,028	5,61	90,08
		HP2	-22,52	18,04	,227	-60,30	15,24
HP3		31,57	18,04	,096	-6,20	69,34	
HP5		7,50	16,88	,662	-27,83	42,83	
HP6		55,57*	18,04	,006	17,80	93,35	
HP8		84,17*	20,17	,001	41,94	126,40	
HP9		85,87*	18,04	,000	48,09	123,64	
HP10		86,01*	18,04	,000	48,23	123,78	
HP11		94,76*	18,04	,000	56,98	132,53	
Profil 5		HP1	40,35*	19,14	,049	,28	80,41
		HP2	-30,02	16,88	,09	-65,36	5,30

Chapitre V. Étude comparative des sols à travers une approche statistique

	HP3	24,07	16,88	,17	-11,26	59,40
	HP4	-7,50	16,88	,66	-42,83	27,83
	HP6	48,07*	16,88	,010	12,74	83,41
	HP8	76,67*	19,14	,001	36,61	116,73
	HP9	78,37*	16,88	,00	43,03	113,70
	HP10	78,51*	16,88	,00	43,17	113,84
	HP11	87,26*	16,88	,00	51,92	122,59
Profil 6	HP1	-7,72	20,17	,70	-49,95	34,50
	HP2	-78,10*	18,04	,00	-115,87	-40,32
	HP3	-24,00	18,04	,19	-61,78	13,76
	HP4	-55,57*	18,04	,006	-93,35	-17,80
	HP5	-48,07*	16,88	,01	-83,41	-12,74
	HP8	28,59	20,171	,17	-13,63	70,83
	HP9	30,29	18,04	,11	-7,48	68,06
	HP10	30,43	18,04	,10	-7,33	68,21
	HP11	39,18*	18,04	,043	1,40	76,95
Profil 8	HP1	-36,32	22,10	,11	-82,58	9,93
	HP2	-106,70*	20,17	,00	-148,93	-64,46
	HP3	-52,60*	20,17	,017	-94,83	-10,37
	HP4	-84,17*	20,17	,001	-126,40	-41,94
	HP5	-76,67*	19,14	,001	-116,73	-36,61
	HP6	-28,59	20,17	,17	-70,83	13,63
	HP9	1,69	20,17	,93	-40,53	43,92
	HP10	1,83	20,17	,92	-40,39	44,07
	HP11	10,58	20,17	,60	-31,64	52,81
Profil 9	HP1	-38,02	20,17	,075	-80,25	4,21
	HP2	-108,39*	18,04	,00	-146,17	-70,62
	HP3	-54,30*	18,04	,007	-92,07	-16,52
	HP4	-85,87*	18,04	,00	-123,64	-48,09
	HP5	-78,37*	16,88	,00	-113,70	-43,03
	HP6	-30,29	18,04	,11	-68,06	7,48
	HP8	-1,69	20,17	,93	-43,92	40,53
	HP10	,143	18,04	,99	-37,63	37,91
	HP11	8,89	18,04	,62	-28,88	46,66
Profil 10	HP1	-38,16	20,17	,07	-80,39	4,06
	HP2	-108,54*	18,04	,00	-146,31	-70,76
	HP3	-54,44*	18,04	,007	-92,21	-16,66
	HP4	-86,01*	18,04	,00	-123,78	-48,23
	HP5	-78,51*	16,88	,00	-113,84	-43,17
	HP6	-30,43	18,04	,108	-68,21	7,33
	HP8	-1,83	20,17	,92	-44,07	40,39
	HP9	-,14	18,04	,99	-37,91	37,63

	HP11	8,74	18,04	,633	-29,02	46,52
Profil 11	HP1	-46,91*	20,17	,031	-89,14	-4,67
	HP2	-117,28*	18,04	,00	-155,06	-79,51
	HP3	-63,19*	18,04	,002	-100,96	-25,41
	HP4	-94,76*	18,04	,00	-132,53	-56,98
	HP5	-87,26*	16,88	,00	-122,59	-51,92
	HP6	-39,18*	18,04	,043	-76,95	-1,40
	HP8	-10,58	20,17	,60	-52,81	31,64
	HP9	-8,89	18,04	,62	-46,66	28,88
	HP10	-8,74	18,04	,63	-46,52	29,02

*. La différence moyenne est significative au niveau 0,05 ; Variable dépendante : CE (dS/m)

4. Analyses statistiques des données de Chott El Frain

4.1. Statistiques descriptives

D'après les statistiques descriptives des caractéristiques du sol de Chott El Frain (Tableau XV). Globalement, la réaction du sol est relativement alcaline avec un pH moyen de 7,86. Les mesures de pH vont de 7,44 à 8,20 (Annexe III). La conductivité électrique montre une très forte variabilité qui suggère une dispersion importante des valeurs autour de la moyenne, les valeurs oscillent entre 4,71 dS/m et 158,69 dS/m (moyenne = 60,05 ; Coefficient de variation = 79,32 %). La teneur en CaCO₃ varie de 6,02 % à 91,27 % (moyenne = 39,45 ; Coefficient de variation = 70,10 %). La teneur en gypse varie de 4,72 % à 28,92 %. Les teneurs en matière organique montrent des variations substantielles entre les échantillons qui reflètent une dispersion des données ; les valeurs varient entre 0 et 6,44 %. La texture du sol est globalement fine et dominée par les argiles avec absence d'éléments grossiers.

4.2. Etude des corrélations Pearson

Le tableau des corrélations de Pearson de « Chott El Frain » (Tableau XVI), montre que les corrélations sont positives et significatives entre la CE, les chlorures, SO₄⁻, Na⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺ et K⁺ et le sable. La MO est positivement corrélée avec les limons. Le pH est positivement corrélé avec HCO₃⁻ et la MO. Le CaCO₃ est corrélé positivement avec l'argile et la profondeur.

Le pH est négativement corrélé avec la CE, SO₄⁻ et Mg⁺⁺. La MO est négativement corrélée avec la CE, SO₄⁻, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Argile, CaCO₃ et la profondeur. En revanche, Les limons sont

négativement corrélés avec la CE, l'argile et le CaCO₃. Le CaCO₃ est corrélé négativement avec le gypse et le sable. Le gypse est corrélé négativement avec la profondeur.

Tableau XV. Statistiques descriptives des paramètres étudiés « Chott El Frain »

Variable	Min	Max	Moy	Ecart type	CV (%)
CE	4,71	158,69	60,04	47,62	79,32
pH	7,44	8,20	7,86	0,19	2,50
Cl ⁻	14,00	1296,00	432,10	388,58	89,92
SO ₄ ⁻	5,38	258,60	134,13	83,51	62,26
HCO ₃ ⁻	2,00	4,50	3,72	0,4622	12,41
Na ⁺	42,02	806,95	279,98	238,19	85,07
Ca ⁺⁺	12,68	452,16	211,87	153,10	72,26
Mg ⁺⁺	9,42	317,38	119,38	98,06	82,14
K ⁺	0,02	30,00	10,60	9,59	90,51
CaCO ₃	6,02	91,27	39,45	27,65	70,09
Gypse	4,72	28,92	16,07	8,18	50,89
MO	0	6,44	2,31	1,51	65,68
EG	0	0	0	0	
Argile	48,35	67,50	56,90	6,20	10,90
Limon	25,90	44,20	36,00	6,22	17,28
Sable	2,85	13,30	6,86	2,94	42,95
Profondeur	15,00	200,00	102,21	69,10	67,60

4.3. Analyse en composante principale

Le tableau XVII, montre l'étude statistique ACP pour tous les paramètres avec les 4 composantes sélectionnées où la valeur propre est supérieure à 1. Collectivement elles expliquent environ 85 % de la variance totale. La première composante (F1) explique 46,60 % de la variance totale (Figure 21) ; c'est un processus important qui devrait être facilement identifié. Il est ensuite suivi d'un second axe avec 22,59 %. Ensemble, ces deux axes expriment 69,20 % de l'inertie totale, ce qui signifie que les premiers plans (F1) et (F2) capturent une bonne partie de la variabilité des variables ou des individus dans l'ensemble des données. Ce pourcentage est donc important ; le premier plan représente bien la variabilité contenue dans l'ensemble des données.

Tableau XVI. Corrélation de Pearson entre les différents paramètres « Chott El Frain »

Variables	CE	pH	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	CaCO ₃	Gypse	MO	EG	Argile	Limon	Sable	Profondeur
CE	1																
pH	-0,394	1															
Cl ⁻	0,995	-0,362	1														
SO ₄ ²⁻	0,962	-0,396	0,942	1													
HCO ₃ ⁻	-0,031	0,427	-0,030	-0,058	1												
Na ⁺	0,969	-0,341	0,973	0,893	-0,014	1											
Ca ⁺⁺	0,962	-0,361	0,948	0,963	-0,021	0,901	1										
Mg ⁺⁺	0,993	-0,391	0,991	0,959	-0,033	0,965	0,953	1									
K ⁺	0,890	-0,310	0,896	0,864	-0,002	0,877	0,877	0,893	1								
CaCO ₃	-0,214	-0,016	-0,220	-0,138	0,171	-0,211	-0,219	-0,214	-0,190	1							
Gypse	0,118	-0,003	0,138	-0,001	-0,035	0,140	0,114	0,117	-0,007	-0,654	1						
MO	-0,390	0,379	-0,364	-0,521	0,199	-0,286	-0,441	-0,385	-0,319	-0,450	0,287	1					
EG													1				
Argile	0,084	-0,196	0,083	0,092	0,081	0,042	0,113	0,071	0,124	0,635	-0,349	-0,424		1			
Limon	-0,375	0,202	-0,374	-0,358	-0,069	-0,351	-0,379	-0,356	-0,369	-0,532	0,246	0,535		-0,853	1		
Sable	0,469	0,108	0,464	0,472	-0,032	0,444	0,505	0,456	0,354	-0,437	0,249	-0,222		-0,373	-0,003	1	
Profondeur	-0,159	0,144	-0,154	-0,079	0,163	-0,179	-0,188	-0,144	-0,116	0,797	-0,614	-0,395		0,282	-0,331	-0,200	1

P=0,05 et ddl=27

En revanche, les axes (F3) et (F4) ne contribuent respectivement qu'à 9,26 % et 6,97 % de l'inertie totale et ne fourniront pas beaucoup d'informations. Les autres axes, avec des pourcentages d'écart inférieurs à 5 %, sont négligés ; ils sont probablement liés à des imprécisions analytiques.

L'essentiel de l'information est contenu au niveau des axes F1 et F2. De ce fait, ces deux axes sont retenus pour interpréter l'analyse.

Dans le contexte des sols de Chott El Frain, un mécanisme semble être prédominant pour la chimie de la solution du sol, suivi d'un second axe qui complète l'information. Le premier axe factoriel représente les éléments solubles dont la concentration augmente avec la salinité (CE), à savoir Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , Cl^- , SO_4^{--} (Tableau Annexe XV, XVI, XVII). Cet axe pourrait être associé au processus de salinisation. Ce premier axe reflète la concentration globale des solutions sous l'effet de l'évaporation. Le second axe oppose les taux de calcaire de limon et de matière organique au taux de gypse.

Concernant l'étude des individus (Figure 22) (Tableau Annexe XVIII, XIX), les échantillons F12, F14, F22, F23, F24, F31, F32 et F33, présentent les valeurs les plus élevées de conductivité électrique, de concentration ionique, de sable. Ce premier groupe concerne les échantillons les plus proches du centre du chott. Les échantillons F51, F52, F61, F62, F71, F73 et F81 sont les moins salés et les moins concentrés ; ils sont positionnés à l'extérieur du chott.

4.4. Test de normalité de Shapiro-Wilk

La normalité des données de conductivité électrique (CE) a été évaluée dans cette étude pour les différents profils pédologiques (P1 à P8). Selon les résultats présentés dans le tableau XVIII, les p-values obtenues pour chacun des profils pédologiques (P1 à P8) sont toutes supérieures à 0,05. Cela signifie que les données de conductivité électrique pour ces profils suivent une distribution normale.

En conclusion, les résultats du test de Shapiro-Wilk indiquent que les données de conductivité électrique pour les différents profils pédologiques (P1 à P8) suivent une distribution normale. Cette constatation permet d'utiliser des méthodes statistiques paramétriques qui supposent la normalité, assurant ainsi la fiabilité des analyses qui suivront. Il reste cependant essentiel de vérifier d'autres hypothèses, comme l'homogénéité des variances.

Tableau XVII. Coefficients de corrélation des variables centrées réduites avec les facteurs

	F1	F2	F3	F4
CE	0,99	-0,03	0,04	0,02
pH	-0,42	-0,13	0,74	-0,05
Cl⁻	0,98	-0,04	0,06	0,03
SO₄⁻	0,96	0,04	0,03	-0,11
HCO₃⁻	-0,07	0,10	0,81	0,34
Na⁺	0,95	-0,07	0,08	0,06
Ca⁺⁺	0,97	-0,03	0,05	0,009
Mg⁺⁺	0,98	-0,04	0,05	0,01
K⁺	0,90	0,01	0,09	0,06
CaCO₃	-0,19	0,93	0,07	-0,05
Gypse	0,10	-0,69	-0,09	0,34
MO	-0,46	-0,58	0,20	0,37
EG	0,00	0,00	0,00	0,00
Argile	0,12	0,79	-0,12	0,48
Limon	-0,42	-0,72	-0,01	-0,31
Sable	0,49	-0,38	0,27	-0,45
Profondeur	-0,15	0,75	0,27	-0,40
Valeur propre	7,45	3,61	1,48	1,11
Variabilité (%)	46,60	22,59	9,26	6,97
% cumulé	46,60	69,20	78,47	85,44

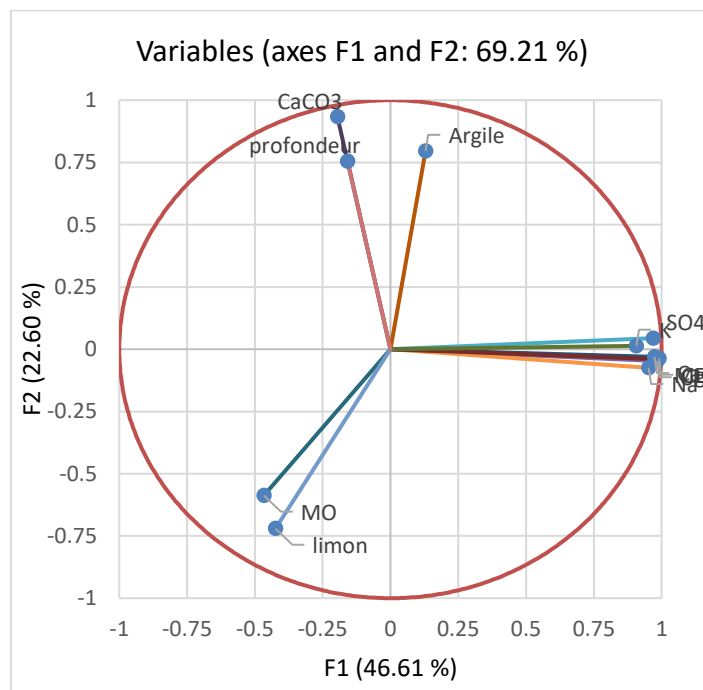


Figure 21. Graphique des variables étudiées en fonction des axes F1 et F2 (ACP) « Chott El Frain »

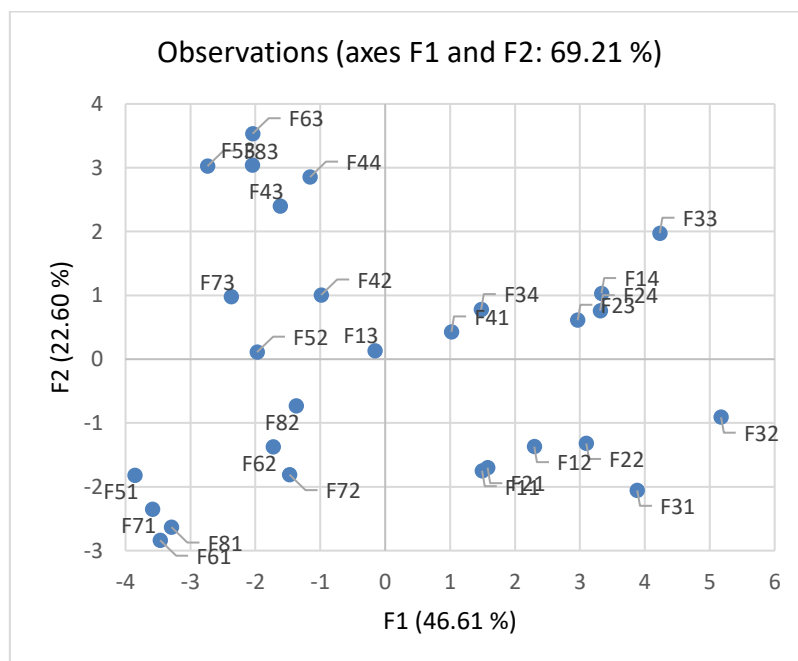


Figure 22. Graphique des individus en fonction des axes F1 et F2 (ACP) « Chott El Frain »

Tableau XVIII. Tests de normalité de Shapiro-Wilk

	Profils	Shapiro-Wilk		
		Statistiques	ddl	Sig.
CE (dS/m)	FP1	,97	4	,87
	FP2	,85	4	,22
	FP3	,91	4	,51
	FP4	,97	4	,87
	FP5	1,00	3	1,00
	FP6	,96	3	,65
	FP7	,99	3	,95
	FP8	,99	3	,82

4.5. Test d'homogénéité des variances

Avant de procéder à l'analyse de la variance (ANOVA), il est essentiel de vérifier si les variances des groupes étudiés sont homogènes. Pour tester cette hypothèse, le test de Levene a été appliqué aux données de conductivité électrique.

Les résultats présentés dans le Tableau XIX montrent que, pour chacune de ces méthodes (moyenne, médiane, moyenne tronquée, etc.), les valeurs de p sont toutes supérieures à 0,05. Cela signifie qu'il n'y a pas de différences significatives entre les variances de conductivité électrique (CE) des échantillons. En d'autres termes, l'hypothèse d'homogénéité des variances est respectée, de ce fait, il est possible d'appliquer l'ANOVA.

En conclusion, les résultats du test de Levene, quelle que soit la méthode utilisée, indiquent que l'hypothèse d'homogénéité des variances est respectée pour les données de conductivité électrique des différents profils pédologiques. Ce test préliminaire valide l'utilisation de l'ANOVA et garantit que les résultats obtenus seront fiables et interprétables dans ce contexte.

Tableau XIX. Test d'homogénéité des variances

		Statistique de			
		Levene	df1	df2	Sig.
CE (dS/m)	Basé sur la moyenne	,36	7	20	,91
	Basé sur la médiane	,28	7	20	,95
	Basé sur la médiane avec ddl ajusté	,28	7	16,01	,94
	Basé sur la moyenne tronquée	,36	7	20	,91

4.6. Analyse de la variance (ANOVA)

Les résultats de l'ANOVA présentés dans le tableau XX révèlent qu'il n'y a pas de différences statistiquement significatives entre les moyennes de conductivité électrique des différents profils pédologiques étudiés. En effet, la p-value obtenue est de 0,301, ce qui est supérieur au seuil de significativité de 0,05. Ceci indique que l'hypothèse nulle ne peut pas être rejetée et que les variations observées entre les différents profils peuvent être considérées comme étant dues au hasard, et non à des différences réelles et significatives entre les profils.

Tableau XX. Analyse de la variance ANOVA

CE (dS/m)					
	Somme des carrés	df	Carré moyen	F	Sig.
Entre groupes	,3	7	,04	1,29	,30
Intra-groupes	,723	20	,03		
Total	1,05	27			

5. Analyses statistiques des données de Sebket Bazer

5.1. Statistiques descriptives

Les statistiques descriptives des caractéristiques du sol de Sebket Bazer sont présentées dans le tableau XXI. La réaction du sol est neutre à alcaline avec un pH moyen de 7,59. Les mesures de pH vont de 6,90 à 8,23 (Annexe IV). La conductivité électrique montre une très forte variabilité, les valeurs oscillent entre 0,58 dS/m et 138,01dS/m (moyenne = 17,43 ; Coefficient

de variation = 173,60. La teneur en CaCO_3 varie de 8,11 % à 50,50 %. La teneur en gypse varie de 0,16 % à 37,05 % (CV = 104,02 %). La teneur en matière organique varie de 0 % à 16,40 %, avec une très forte variabilité des valeurs (CV= 155,87). La texture du sol est globalement fine et dominée par la classe limono-argileuse. Le pourcentage d'éléments grossiers varie entre 0 % et 8,76 %.

Tableau XXI. Statistiques descriptives des paramètres étudiés « Sebkheth Bazer »

Variable	Min	Max	Moy	Ecart type	CV (%)
CE	0,58	138,01	17,43	30,26	173,60
pH	6,90	8,23	7,59	0,27	3,67
Cl	3,00	1090,00	118,25	235,72	199,35
SO₄	1,65	243,40	41,74	60,20	144,22
HCO₃	2,20	4,50	3,52	0,49	14,15
Na	15,33	723,57	97,32	145,78	149,79
Ca	3,02	362,37	64,70	96,66	149,38
Mg	1,18	276,02	34,87	60,66	173,96
K	0,02	10,54	2,05	2,57	125,43
CaCO₃	8,11	50,50	33,13	10,78	32,55
Gypse	0,15	37,05	10,37	10,78	104,02
MO	0	16,39	2,01	3,14	155,87
EG	0,00	8,76	1,65	2,49	150,74
Argile	45,30	67,80	53,02	5,54	10,46
Limon	27,25	43,65	38,99	4,03	10,35
Sable	3,01	12,70	7,18	3,53	49,23
Profondeur	23,00	200,00	123,54	66,44	53,78

5.2. Etude des corrélations Pearson

Le tableau des corrélations de Pearson de « Sebkheth Bazer » (Tableau XXII), montre que les corrélations sont positives et significatives entre la CE, les chlorures, SO_4^{2-} , Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ et les éléments grossiers. Le pH est positivement corrélé avec HCO_3^- .

Le pH est négativement corrélé avec la CE, Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ et les éléments grossiers. Le HCO_3^- est négativement corrélée avec la CE, Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , Ca^{++} , Mg^+ , K^+ . L'argile est négativement corrélée avec les limons et le sable. Le CaCO_3 est corrélé négativement avec la profondeur

Tableau XXII. Corrélation de Pearson entre les différents paramètres « Sebket Bazer »

Variables	CE	pH	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	CaCO ₃	Gypse	MO	EG	Argile	Limon	Sable	Profondeur
CE	1																
pH	-0,691	1															
Cl ⁻	0,997	-0,680	1														
SO ₄ ⁻²	0,969	-0,726	0,948	1													
HCO ₃ ⁻	-0,573	0,794	-0,569	-0,610	1												
Na ⁺	0,978	-0,666	0,986	0,918	-0,572	1											
Ca ⁺⁺	0,950	-0,665	0,934	0,970	-0,552	0,885	1										
Mg ⁺⁺	0,996	-0,687	0,993	0,964	-0,586	0,974	0,943	1									
K ⁺	0,949	-0,701	0,930	0,963	-0,589	0,891	0,933	0,956	1								
CaCO ₃	0,088	-0,291	0,114	0,066	-0,348	0,132	0,080	0,082	-0,024	1							
Gypse	-0,150	0,057	-0,164	-0,141	0,271	-0,204	-0,150	-0,150	-0,075	-0,399	1						
MO	-0,080	0,087	-0,073	-0,122	0,103	-0,074	-0,132	-0,078	-0,131	-0,025	-0,232	1					
EG	0,510	-0,476	0,490	0,548	-0,378	0,530	0,415	0,517	0,557	0,133	-0,323	0,362	1				
Argile	-0,216	0,046	-0,196	-0,282	0,125	-0,266	-0,201	-0,204	-0,138	0,124	0,180	0,137	-0,180	1			
Limon	-0,023	0,052	-0,020	-0,042	0,062	0,066	-0,097	-0,020	-0,119	0,197	-0,198	0,029	0,092	-0,085	1		
Sable	0,292	-0,039	0,260	0,391	-0,150	0,286	0,338	0,275	0,257	-0,292	-0,059	-0,218	0,133	-0,796	0,146	1	
Profondeur	0,038	0,079	0,000	0,078	0,260	-0,093	0,125	0,031	0,160	-0,493	0,115	0,199	-0,024	0,177	-0,266	0,037	1

P=0,05 et ddl=2

5.3. Analyse en composante principale

Le tableau XXIII, montre l'étude statistique ACP pour tous les paramètres dans les 4 composants sélectionnés où la valeur propre est supérieure à 1. Ils ont expliqué environ 82,09 % de la variance totale (Figure 23). La première composante F1 explique 48,30 % de la variance totale ; c'est un processus important qui devrait être facilement identifié. Il est ensuite suivi d'un second axe avec 12,87 %. Ces deux axes expriment 61,18 % de l'inertie totale, c'est-à-dire que 61,18 % de la variabilité totale du nuage pour les individus ou les variables est représentée par les premiers plans F1 et F2. Ce pourcentage est donc important ; le premier plan représente bien la variabilité contenue dans l'ensemble des données. Les axes F3 et F4 n'expriment respectivement que 12,11 et 8,78 % d'inertie et ne fourniront pas beaucoup d'informations. Les autres axes, avec des pourcentages d'écart inférieurs à 5 %, ne sont pas pris en compte ; elles sont probablement liées à des imprécisions analytiques. Nous ne retenons donc que les deux premières dimensions pour interpréter l'analyse.

Pour les sols de Sebkhet Bazer, un mécanisme semble être prédominant pour la chimie de la solution du sol, suivi de trois processus d'importance à peu près égale. Le premier axe factoriel oppose les éléments solubles dont la concentration augmente avec la salinité (CE), à savoir Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , Cl^- , SO_4^{--} ainsi les éléments grossiers aux éléments dont la concentration est contrôlée par la précipitation des minéraux comme le pH (Tableau Annexe XX, XXI, XXII). Cet axe pourrait être associé au processus de salinisation.

Concernant l'étude des individus (Figure 24) (Tableau Annexe XXII, XXIV), les échantillons B11, B12, B21 et B32, présentent les conductivités électriques les plus élevées et une forte concentration ionique avec un pH et une concentration en bicarbonate faible. Ce premier groupe concerne les échantillons les plus proches du centre de la sebkha. Les échantillons B51, B52, B71 et B83, sont les moins salés, les moins concentrés et les plus alcalins ; ils sont positionnés à l'extérieur de la sebkha. Manifestement, la position topographique des profils jouerait un rôle dans la distribution des sels.

Tableau XXIII. Coefficients de corrélation des variables centrées réduites avec les facteurs

	F1	F2	F3	F4
CE	0,97	0,07	-0,06	0,003
pH	-0,77	-0,12	-0,28	0,15
Cl⁻	0,96	0,07	-0,02	-0,007
SO₄⁻	0,98	0,04	-0,11	-0,006
HCO₃⁻	-0,68	0,04	-0,37	0,20
Na⁺	0,95	-0,03	0,006	-0,00
Ca⁺⁺	0,94	0,11	-0,12	-0,03
Mg⁺⁺	0,97	0,08	-0,05	0,003
K⁺	0,95	0,19	-0,12	0,005
CaCO₃	0,14	-0,20	0,83	-0,18
Gypse	-0,21	0,35	-0,44	-0,42
MO	-0,09	0,11	0,22	0,85
EG	0,58	-0,08	0,21	0,52
Argile	-0,27	0,86	0,39	-0,05
Limon	0,005	-0,80	0,05	0,12
Sable	0,33	0,52	-0,61	-0,02
Profondeur	-0,01	0,48	-0,52	0,43
Valeur propre	8,21	2,18	2,05	1,49
Variabilité (%)	48,30	12,87	12,11	8,78
% cumulé	48,30	61,18	73,30	82,09

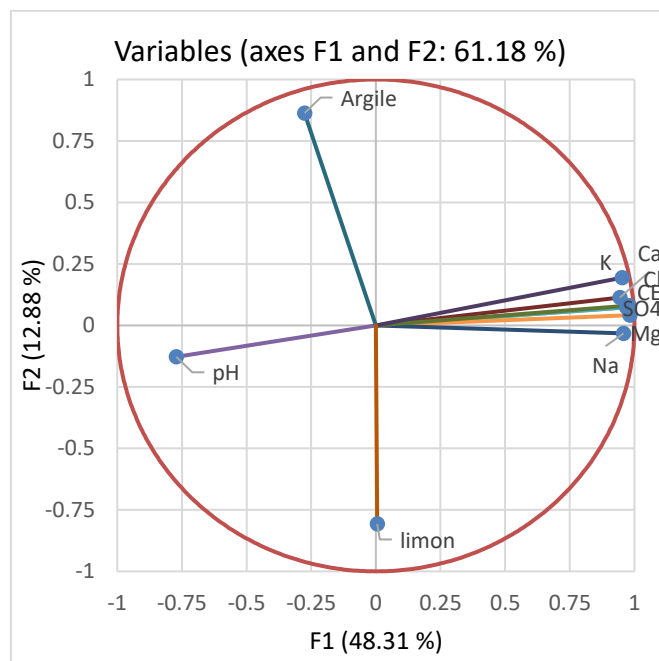


Figure 23. Graphique des variables étudiées en fonction des axes F1 et F2 (ACP) « Sebket Bazer »

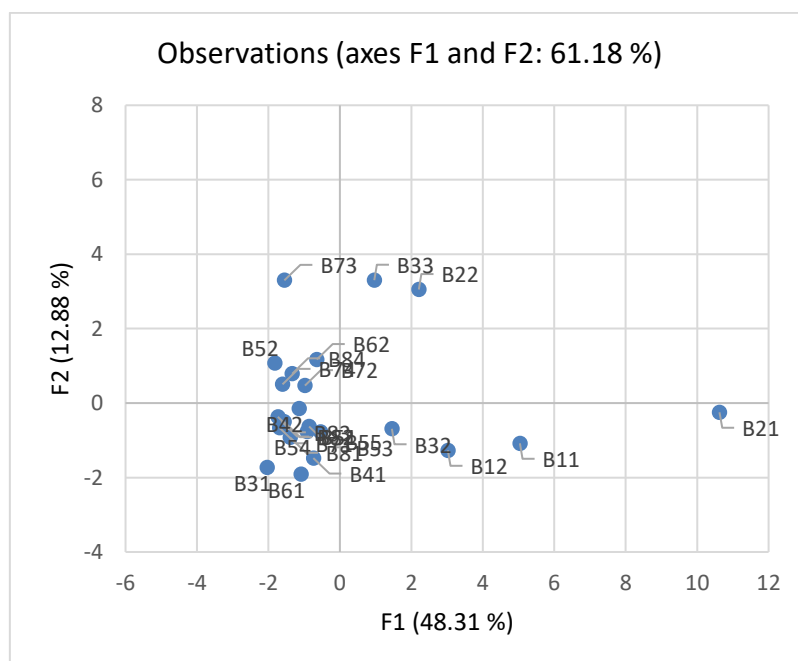


Figure 24. Graphique des individus en fonction des axes F1 et F2 (ACP) « Sebket Bazer »

5.4. Test de normalité de Shapiro-Wilk

Dans cette étude, la normalité des données de conductivité électrique (CE) des différents profils pédologiques (BP1 à BP8) a été évaluée à l'aide du test de Shapiro-Wilk.

Les résultats du test de Shapiro-Wilk pour les différents profils (Tableau XXIV) indiquent que certains profils, comme BP3, BP5 et BP7, ont des p-values supérieures à 0,05, ceci révèle une distribution normale. En revanche, d'autres profils, comme BP8, présentent une p-value de 0,016, inférieure à 0,05, ce qui indique une déviation significative par rapport à la distribution normale.

Tableau XXIV. Test de normalité de Shapiro-Wilk

		Shapiro-Wilk		
Profils		Statistiques	ddl	Sig.
CE (dS/m)	BP1			
	BP2			
	BP3	,83	3	,18
	BP4			
	BP5	,90	5	,46
	BP6			
	BP7	,86	4	,27
	BP8	,71	4	,01

5.5. Tests statistiques de Kruskal-Wallis

Dans cette étude, le test non paramétrique de Kruskal-Wallis a été utilisé pour comparer la conductivité électrique (CE) entre les différents profils pédologiques. Ce test est une alternative à l'ANOVA lorsqu'il y a des violations des hypothèses de normalité ou d'homogénéité des variances, et il permet de tester si les échantillons proviennent de populations avec des distributions identiques.

Les résultats, résumés dans le tableau XXV, indiquent que la différence est statistiquement significative entre les profils étudiés, avec une p-value de 0,03, ce qui est inférieur au seuil de 0,05. Ceci montre que les profils étudiés ne partagent pas la même distribution de valeurs de CE. Autrement dit, certains profils présentent des niveaux de conductivité électrique systématiquement plus élevés ou plus bas que d'autres.

Tableau XXV. Tests statistiques de Kruskal-Wallis

	CE (dS/m)
H de Kruskal-Wallis	15,22
df	7
Sig. Asymptotique	,03

a. Test de Kruskal Wallis

b. Variable de regroupement : Profils-B

6. Analyses statistiques des données de Chott El Beida

6.1. Statistiques descriptives

Les statistiques descriptives des caractéristiques du sol sont présentées dans le tableau XXVI. La réaction du sol est neutre à alcaline avec un pH moyen de 7,88. Les mesures de pH vont de 7,32 à 8,45 (Annexe V). La conductivité électrique montre une très forte variabilité, les valeurs oscillent entre 7,57 dS/m et 142,4 dS/m (moyenne = 54,5 ; Coefficient de variation = 66,16 %), cette forte variabilité est due au fait que la toposéquence a été positionnée de l'extérieur vers le centre du Chott afin de couvrir une large gamme de salinité. La teneur en CaCO₃ varie de 19,79 % à 60,41 %, avec des accumulations sous forme de pseudo-mycélium observées dans les horizons C31, C62 et C72. La teneur en gypse varie de 4,21 % en C71 à 56,01 % en C31 (moyenne = 21,46 ; CV = 58,78 %). La teneur en matière organique varie de 0 % pour l'échantillon C22 à 15,6 % pour l'échantillon C41, avec une très forte variabilité des valeurs (CV= 106,57 %). La texture du sol est globalement fine et dominée par la classe limono-argileuse. Le pourcentage d'éléments grossiers varie entre 2,28 % et 21,70 %.

Tableau XXVI. Statistiques descriptives des paramètres étudiés « Chott El Beida »

Variable	Min	Max	Moy	Ecart-type	CV (%)
CE	7,57	142,40	54,50	36,05	66,15
pH	7,32	8,45	7,88	0,25	3,27
Cl ⁻	25,00	1146,00	384,12	302,08	78,64
SO ₄ ⁻	11,03	225,50	129,90	55,92	43,05
HCO ₃ ⁻	2,00	4,80	3,66	0,60	16,50
Na ⁺	59,44	812,34	251,34	199,07	79,20
Ca ⁺⁺	13,59	380,33	188,94	104,10	55,10
Mg ⁺⁺	15,14	284,80	109,21	73,45	67,26
K ⁺	0,48	25,11	8,22	5,91	71,93
CaCO ₃	19,79	60,41	30,43	8,67	28,49
Gypse	4,21	56,01	21,46	12,61	58,77
MO	0	15,59	3,40	3,63	106,59
EG	1,27	28,88	10,81	6,66	61,62
Argile	16,50	61,50	47,65	13,11	27,52
Limon	26,14	70,90	45,52	11,60	25,50
Sable	2,28	21,70	5,29	4,09	77,33
Profondeur	30,00	200,00	102,87	62,63	60,88

6.2. Etude des corrélations Pearson

Le tableau XXVII, présente les coefficients de corrélation de Pearson de « Chott El Beida » entre les ions, la CE et le pH, l'argile, le limon, le sable, les éléments grossiers, la matière organique, le CaCO₃, le gypse et la profondeur des horizons (P<0,05, r critique = 0,406).

La matrice de corrélation montre que la CE, Cl⁻, SO₄⁻, Na⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, K⁺ sont positivement corrélés entre eux. La CE, les chlorures, le Na⁺ et le Mg⁺⁺ sont positivement corrélés avec les éléments grossiers. Les chlorures, le Ca⁺⁺ et K⁺ sont positivement corrélés avec le gypse. Les argiles sont positivement corrélées avec Ca⁺⁺, SO₄⁻, CaCO₃ et la profondeur. Le pH, HCO₃⁻ et limon sont corrélés positivement entre eux. Le calcaire est corrélé positivement à la profondeur.

Le pH est négativement corrélé avec la CE, Cl⁻, SO₄⁻, Na⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, K⁺ et l'argile. Le HCO₃⁻ est négativement corrélée avec Ca⁺⁺, SO₄⁻, l'argile, CaCO₃ et profondeur. Les limons sont négativement corrélés avec Ca⁺⁺, SO₄⁻, l'argile, CaCO₃ et la profondeur. Les argiles sont négativement corrélées avec le sable.

6.3. Analyse en composante principale

Le tableau XXVIII présente l'analyse en composantes principales (ACP) de l'ensemble des paramètres étudiés. Quatre composantes, ayant des valeurs propres supérieures à 1, ont été retenues, expliquant environ 83,89 % de la variance totale. Le premier axe F1 représente 47,51 % de la variance totale (Figure 25), ce qui en fait un processus majeur aisément identifiable. Il est suivi par un deuxième axe, qui en explique 20,78 %. Ces deux axes expriment 68,30 % de l'inertie totale, c'est-à-dire que 68,30 % de la variabilité totale du nuage pour les individus ou les variables est représentée par les premiers plans F1 et F2. Ce pourcentage s'avère important ; le premier plan représente bien la variabilité contenue dans l'ensemble des données. Les axes F3 et F4 n'expriment respectivement que 8,05 et 7,53 % de l'inertie totale, l'information représentée par ces axes est considérée faible. Donc, l'essentiel de l'inertie est représenté par les deux premières dimensions.

Pour les sols de Chott El Beida, un mécanisme semble être prédominant pour la chimie de la solution du sol, suivi de trois processus d'importance à peu près égale. Le premier axe factoriel oppose les éléments solubles dont la concentration augmente avec la salinité (CE), à savoir Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , Cl^- , SO_4^- aux éléments dont la concentration est contrôlée par la précipitation des minéraux comme le pH (Tableau Annexe XXV, XXVI, XXVII). Cet axe pourrait être associé au processus de salinisation. Ce scénario est habituel pour les sols salés. Ce premier axe reflète la concentration globale des solutions sous l'effet de l'évaporation et donc du climat. Habituellement cet axe porte 65 à 75% de la variabilité.

Concernant l'étude des individus (Figure 26) (Tableau Annexe XVIII, XXIX), les échantillons C11, C12, C21, C22, C31, C32, présentent les conductivités électriques les plus élevées et une forte concentration ionique avec un pH faible. Ce premier groupe concerne les échantillons localisés vers le centre du chott. Les échantillons C61, C63, C71, C72, C81, C82, sont les moins salés, les moins concentrés et les plus alcalins ; ils sont positionnés à la périphérie du chott.

Tableau XXVII. Corrélation de Pearson entre les différents paramètres « Chott El Beida »

Variables	CE	pH	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	CaCO ₃	Gypse	MO	EG	Argile	Limon	Sable	Profondeur
CE	1																
pH	-0,610	1															
Cl ⁻	0,995	-0,587	1														
SO ₄ ⁻	0,912	-0,666	0,879	1													
HCO ₃ ⁻	-0,349	0,706	-0,341	-0,428	1												
Na ⁺	0,964	-0,485	0,967	0,829	-0,288	1											
Ca ⁺⁺	0,922	-0,684	0,907	0,924	-0,413	0,799	1										
Mg ⁺⁺	0,994	-0,594	0,992	0,903	-0,336	0,951	0,922	1									
K ⁺	0,850	-0,477	0,834	0,875	-0,280	0,752	0,905	0,847	1								
CaCO ₃	-0,038	-0,389	-0,072	0,135	-0,411	-0,118	0,083	-0,073	-0,012	1							
Gypse	0,401	-0,291	0,407	0,363	-0,287	0,340	0,506	0,399	0,551	-0,230	1						
MO	-0,151	0,146	-0,133	-0,206	0,240	-0,134	-0,048	-0,122	-0,060	-0,362	0,171	1					
EG	0,462	-0,333	0,474	0,279	0,071	0,461	0,317	0,488	0,166	-0,109	-0,058	-0,070	1				
Argile	0,374	-0,717	0,350	0,499	-0,638	0,280	0,462	0,364	0,268	0,519	0,236	-0,359	0,223	1			
Limon	-0,393	0,675	-0,366	-0,518	0,646	-0,345	-0,429	-0,374	-0,272	-0,573	-0,200	0,346	-0,144	-0,944	1		
Sable	-0,136	0,342	-0,132	-0,125	0,186	-0,029	-0,229	-0,147	-0,058	-0,021	-0,177	0,128	-0,335	-0,514	0,235	1	
Profondeur	-0,325	-0,317	-0,331	-0,168	-0,538	-0,392	-0,209	-0,329	-0,268	0,428	-0,119	-0,196	-0,087	0,545	-0,486	-0,257	1

$P=0,05$ et $ddl=22$

Tableau XXVIII. Coefficients de corrélation des variables centrées réduites avec les facteurs

	F1	F2	F3	F4
CE	0,95	-0,26	0,06	0,08
pH	-0,76	-0,42	0,01	0,12
Cl⁻	0,94	-0,29	0,07	0,06
SO₄⁻	0,93	-0,07	-0,06	0,15
HCO₃⁻	-0,53	-0,59	0,32	0,01
Na⁺	0,87	-0,34	0,10	0,14
Ca⁺⁺	0,94	-0,14	-0,11	-0,03
Mg⁺⁺	0,94	-0,28	0,08	0,04
K⁺	0,84	-0,28	-0,25	0,05
CaCO₃	0,13	0,7154	-0,02	0,43
Gypse	0,47	-0,15	-0,54	-0,47
MO	-0,20	-0,38	-0,33	-0,48
EG	0,41	-0,12	0,76	-0,21
Argile	0,60	0,71	0,07	-0,14
Limon	-0,60	-0,68	0,03	-0,07
Sable	-0,26	-0,31	-0,38	0,66
Profondeur	-0,08	0,86	-0,05	-0,16
Valeur propre	8,07	3,53	1,36	1,28
Variabilité (%)	47,51	20,78	8,05	7,53
% cumulé	47,51	68,30	76,35	83,89

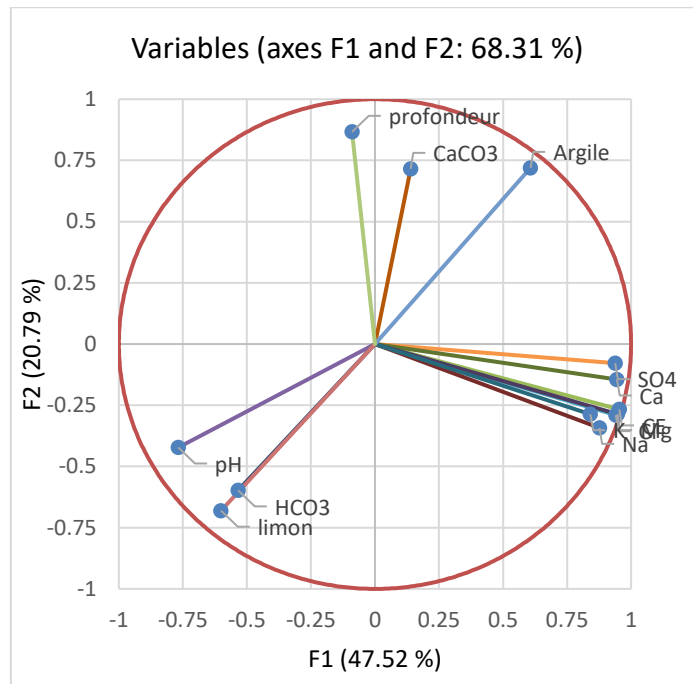


Figure 25. Graphique des variables étudiées en fonction des axes F1 et F2 (ACP)

« Chott El Beida »

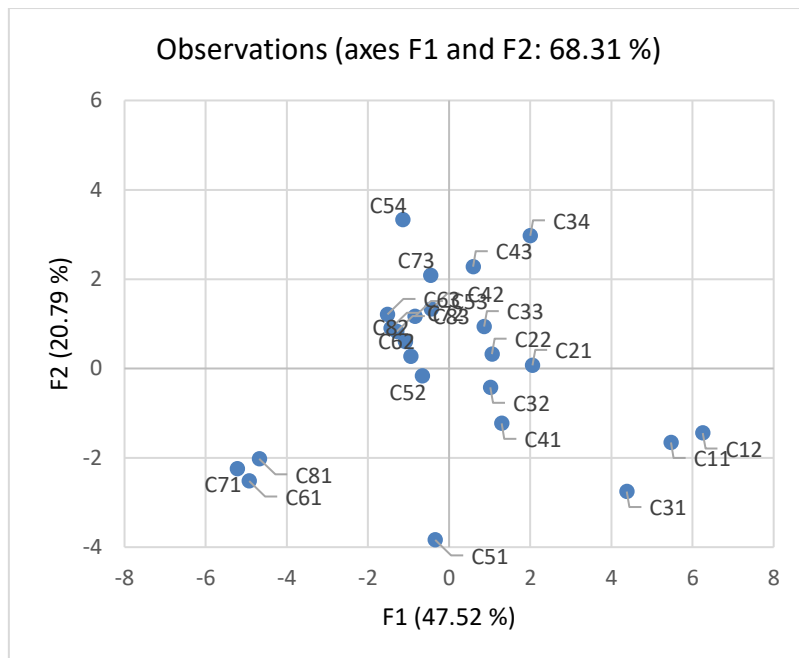


Figure 26. Graphique des individus en fonction des axes F1 et F2 (ACP)

« Chott El Beida »

6.4. Test de normalité de Shapiro-Wilk

Le tableau XXIX, présente les résultats des tests de normalité de Shapiro-Wilk réalisés sur les données de conductivité électrique (CE) obtenues à partir de différents profils pédologiques (CP3, CP4, CP5, CP6, CP7 et CP8) de Chott El Beida.

Les p-values obtenues pour ces profils sont toutes supérieures à 0,05, ce qui suggère qu'il n'existe pas de preuves suffisantes pour rejeter l'hypothèse de normalité pour ces profils.

Les données pour ces profils ne présentent pas de déviation significative par rapport à la distribution normale.

En résumé, les résultats du test de normalité de Shapiro-Wilk montrent que ces données peuvent être considérées comme normalement distribuées, ouvrant la voie à l'utilisation de méthodes statistiques paramétriques comme l'ANOVA.

Tableau XXIX. Test de normalité de Shapiro-Wilk

		Shapiro-Wilk		
		Statistiques	ddl	Sig.
CE (dS/m)	CP1			
	CP2			
	CP3	,80	4	,11
	CP4	,86	3	,27
	CP5	,95	4	,74
	CP6	,84	3	,23
	CP7	,83	3	,20
	CP8	,86	3	,28

6.5. Test d'homogénéité des variances

Les résultats présentés dans le tableau XXX montrent que, quelle que soit la méthode de calcul utilisée (moyenne, médiane ou moyenne tronquée), les p-values des tests de Levene sont toutes supérieures à 0,05. Cela signifie que le test de Levene n'a pas détecté de différences significatives entre les variances des conductivités électriques pour les différents profils pédologiques de Chott El Beida.

Étant donné que les résultats des tests de Levene montrent une homogénéité des variances ($p > 0,05$) pour chaque méthode de calcul, il est possible d'appliquer l'analyse de la variance (ANOVA) pour comparer les conductivités électriques entre les différents profils de Chott El Beida.

Tableau XXX. Test d'homogénéité des variances

		Statistique de			
		Levene	df1	df2	Sig.
CE (dS/m)	Basé sur la moyenne	1,18	7	16	,36
	Basé sur la médiane	,33	7	16	,92
	Basé sur la médiane avec ddl ajusté	,33	7	9,95	,92
	Basé sur la moyenne tronquée	1,01	7	16	,45

6.6. Analyse de la variance ANOVA

Les résultats de l'ANOVA (Tableau XXXI) montrent que la variation de la conductivité électrique (CE) entre les profils pédologiques est statistiquement significative, avec un niveau de confiance supérieur à 99,9 % ($p < 0,001$). Cela indique qu'il existe des différences importantes entre les moyennes des CE des différents profils, et que ces différences ne sont pas dues au hasard.

Tableau XXXI. Analyse de la variance ANOVA

CE (dS/m)	Somme des		Carré moyen	F	Sig.
	carrés	df			
Entre groupes	25620,16	7	3660,02	13,68	,00
Intra-groupes	4279,89	16	267,49		
Total	29900,05	23			

6.7. Comparaisons multiples (LSD)

Après avoir identifié des différences significatives dans la conductivité électrique (CE) entre les profils pédologiques grâce à l'analyse de la variance (ANOVA), un test Post-Hoc a été nécessaire pour examiner plus en détail quelles paires de profils diffèrent de manière significative. Le test Least Significant Difference (LSD) a été utilisé à cet effet. Ce test permet

d'effectuer des comparaisons multiples entre les moyennes des profils afin de déterminer précisément entre quels profils se trouvent les différences significatives.

Les résultats du test LSD sont résumés dans le tableau XXXII, où les différences significatives entre les profils sont indiquées en gras. Une p-value inférieure à 0,05 ($p < 0,05$) est considérée comme statistiquement significative au seuil de 5 %, ce qui signifie qu'il existe moins de 5 % de chances que les différences observées entre les profils soient dues au hasard.

Les comparaisons multiples ont révélé plusieurs différences significatives entre les paires de profils, (CP1 et CP2), (CP1 et CP3), (CP1 et CP4), (CP1 et CP5), (CP1 et CP6), (CP1 et CP7), (CP1 et CP8), (CP2 et CP6), (CP2 et CP7), (CP2 et CP8), (CP2 et CP3), (CP3 et CP5), (CP3 et CP6), (CP3 et CP7), (CP3 et CP8), (CP4 et CP7), (CP4 et CP8).

Tableau XXXII. Comparaisons multiples (LSD)

(I) Profil	(J) Profil	Différence		Sig.	95% Intervalle de confiance	
		moyenne (I-J)	Erreur standard		Borne inférieure	Borne supérieure
Profil 1	CP2	66,86*	16,35	,001	32,18	101,53
	CP3	66,47*	14,16	,000	36,44	96,49
	CP4	87,60*	14,93	,000	55,94	119,25
	CP5	95,88*	14,16	,000	65,85	125,90
	CP6	115,13*	14,93	,000	83,48	146,78
	CP7	116,50*	14,93	,000	84,84	148,15
	CP8	116,91*	14,93	,000	85,25	148,56
Profil 2	CP1	-66,86*	16,35	,001	-101,53	-32,18
	CP3	-,39	14,16	,978	-30,41	29,63
	CP4	20,74	14,93	,184	-10,91	52,39
	CP5	29,02	14,16	,057	-1,00	59,04
	CP6	48,27*	14,93	,005	16,62	79,92
	CP7	49,64*	14,93	,004	17,98	81,29
	CP8	50,05*	14,93	,004	18,39	81,70
Profil 3	CP1	-66,47*	14,16	,000	-96,49	-36,44
	CP2	,39	14,16	,978	-29,63	30,41
	CP4	21,13	12,49	,11	-5,35	47,61
	CP5	29,41*	11,56	,022	4,89	53,92
	CP6	48,66*	12,49	,001	22,18	75,14
	CP7	50,03*	12,49	,001	23,54	76,51
	CP8	50,44*	12,49	,001	23,95	76,92
Profil 4	CP1	-87,60*	14,93	,00	-119,25	-55,94
	CP2	-20,74	14,93	,18	-52,39	10,91

Chapitre V. Étude comparative des sols à travers une approche statistique

	CP3	-21,13	12,49	,11	-47,61	5,35
	CP5	8,28	12,49	,51	-18,20	34,76
	CP6	27,53	13,35	,05	-,77	55,84
	CP7	28,90*	13,35	,04	,59	57,20
	CP8	29,31*	13,35	,04	1,00	57,61
Profil 5	CP1	-95,88*	14,16	,00	-125,90	-65,85
	CP2	-29,02	14,16	,05	-59,04	1,00
	CP3	-29,41*	11,56	,022	-53,92	-4,89
	CP4	-8,28	12,49	,51	-34,76	18,20
	CP6	19,25	12,49	,14	-7,22	45,73
	CP7	20,62	12,49	,11	-5,86	47,10
	CP8	21,03	12,49	,11	-5,45	47,51
	Profil 6	CP1	-115,13*	14,93	,00	-146,78
CP2		-48,27*	14,93	,005	-79,92	-16,62
CP3		-48,66*	12,49	,001	-75,14	-22,18
CP4		-27,53	13,35	,05	-55,84	,77
CP5		-19,253	12,49	,14	-45,73	7,22
CP7		1,36	13,35	,92	-26,94	29,67
CP8		1,77	13,35	,89	-26,53	30,08
Profil 7		CP1	-116,50*	14,93	,00	-148,15
	CP2	-49,64*	14,93	,004	-81,29	-17,98
	CP3	-50,03*	12,49	,001	-76,51	-23,54
	CP4	-28,90*	13,35	,04	-57,20	-,59
	CP5	-20,62	12,49	,11	-47,10	5,86
	CP6	-1,36	13,35	,92	-29,67	26,94
	CP8	,41	13,35	,97	-27,89	28,71
	Profil 8	CP1	-116,91*	14,93	,00	-148,56
CP2		-50,05*	14,93	,004	-81,70	-18,39
CP3		-50,44*	12,49	,001	-76,92	-23,95
CP4		-29,31*	13,35	,04	-57,61	-1,00
CP5		-21,03	12,49	,11	-47,51	5,45
CP6		-1,77	13,35	,89	-30,08	26,53
CP7		-,41	13,35	,97	-28,71	27,89

*La différence moyenne est significative au niveau 0,05.

Variable dépendante : CE (dS/m)

7. Synthèse et discussion

Le pH est un indicateur très important, il fournit des informations importantes sur les types d'équilibre géochimique (Hem 1985 ; Narsimha et Sudarshan, 2018). Les valeurs de pH du sol

enregistrées dans les quatre sebkhas d'étude étaient neutres à alcalines (6,90 à 8,45). Elles ne dépassaient pas le seuil de dégradation du sol par la salinité fixé selon Aubert (1983) entre 8 et 9. Ces valeurs de pH correspondent à une réaction du sol typique aux environnements calcaires où les teneurs en carbonates dans les solutions du sol était contrôlée par la précipitation de la calcite (Helgeson, 1969). Les niveaux de calcaire variaient dans la zone d'étude entre 5,62 et 91,27 %. Ces taux sont assez suffisants pour augmenter le pH à une certaine valeur (Djili et Daoud, 2000). Cependant, il est utile de rappeler que les valeurs du pH ne peuvent suivre l'évolution de la teneur en carbonate que jusqu'à une valeur de 8,37, ce qui correspond au pH d'une solution soumise à l'équilibre avec une phase solide de CaCO_3 sous une pression de CO_2 de $10^{-3,5}$ atm (Garrels et Christ, 1967 ; Djili et Daoud, 1999). Ces valeurs corroborent aux valeurs caractéristiques des sols d'Afrique du Nord et du Maghreb, où des sols sodiques avec salant noir et du carbonate de sodium à pH élevé n'ont pas été signalés (Aubert, 1976). Les teneurs en calcaire sont relativement élevées, correspondant aux valeurs relevées sous un régime pluviométrique de 400 mm dans la région des Hauts Plateaux de Sétif par Djili et al. (1999) et (Salah, 2011). Plusieurs profils ont révélé une augmentation du taux de CaCO_3 dans l'horizon de subsurface, suivie d'une diminution en profondeur, un schéma également observé par Saleh (2011) dans les sols de la région de Sétif. Cette configuration suggère la présence d'un horizon d'accumulation de calcaire dans le sous-sol. Selon Boudoukha (1988), La région se caractérise par la présence généralisée d'une croûte calcaire datant du villafranchien supérieur et inférieur (Villa, 1980). Ces niveaux calcaires sont recouverts d'argiles, de marnes jaunes, puis d'une croûte tufacée sur laquelle se sont développées des couches de sels squelettiques, incluant une nouvelle croûte de sel de 10 à 20 cm d'épaisseur. Cette dernière est alimentée en carbonates par les niveaux sous-jacents et est souvent fragmentée et dispersée par les activités agricoles autour des sebkhas. La texture globale du sol était argileuse. Cette texture est dû au fait que la région d'étude repose sur un terrain quaternaire, comprenant du sable, des limons, du gravier, des cailloutis, et surtout des argiles, qui ont généralement d'une couleur grise (Villa, 1980).

La valeur élevée de la CE est attribuée à une forte salinité et une teneur élevée en sels solubles sur les sites étudiés (Vinod et al. 2009 ; Narsimha et Sudarshan, 2018).

La conductivité électrique (CE) des toposéquences étudiées a révélé des niveaux élevés de salinité, se manifestant aussi bien horizontalement, de la périphérie vers le centre des sebkhas, que verticalement, de la surface jusqu'en profondeur. Les valeurs de CE couvrent une large

gamme de salinité, variant de 0,58 dS/m à 158,69 dS/m, correspondant à des échantillons allant de non salés à hyper-salés (Durand, 1983). Une importante variation des valeurs de conductivité électrique a été constatée. Cette hétérogénéité est très courante dans les sebkhas et les chotts selon Hacini et Zatout (2012). Ces zones présentent des caractéristiques typiques d'endoréisme, avec de vases salines. Elles connaissent des cycles d'inondation en hiver, suivis d'une couverture par des croûtes de sel en été. La récolte de sel dans la région était autrefois artisanale, concentrée en périphérie de Chott El Frain, où le sel est attribué au Trias (Boudoukha, 1988). À la suite d'un épisode d'inondation ayant frappé le chott, une épaisse couche de vase a recouvert la couche de sel, ce qui a conduit à l'arrêt de la récolte de sel, selon les témoignages des villageois. Les teneurs en gypse varient considérablement, permettant de classer les échantillons de faiblement à extrêmement gypseux (Barzanji, 1973). Les teneurs en matières organiques sont très variables et relativement élevées, atteignant jusqu'à 36,55 %. Ces résultats sont cohérents avec ceux du Millennium Ecosystem Assessment (2005), selon lequel les zones humides stockent environ 30 % du carbone des sols à l'échelle mondiale.

Les résultats de l'ACP montrent que la chimie des solutions des sols dans les régions étudiées (Sebkhet El Hamiet, Chott El Frain, Sebkhet Bazer et Chott El Beida) est principalement influencée par des mécanismes liés à la salinisation, bien que des spécificités soient observées dans chaque site.

Dans tous les cas, le premier axe factoriel oppose les éléments solubles (Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , Cl^- , SO_4^{--}) dont la concentration augmente avec la salinité (CE), aux paramètres contrôlés par la précipitation des minéraux, tels que le pH et, parfois, HCO_3^- . Ce mécanisme reflète l'impact de l'évaporation et de la dissolution-précipitation des minéraux, souvent en relation avec les conditions climatiques.

À Sebkhet El Hamiet, l'augmentation des éléments solubles s'accompagne d'une diminution des bicarbonates et du pH, avec un effet marqué sur l'équilibre chimique de la solution. À Chott El Frain, le second axe met en relation les taux de calcaire, de limon, de matière organique et de gypse, soulignant l'interaction entre les propriétés du sol et les minéraux. À Sebkhet Bazer et Chott El Beida, le premier axe domine également, mais il est suivi de mécanismes secondaires d'importance similaire, impliquant des interactions complexes entre éléments grossiers, salinité et précipitation minérale. Les premiers axes factoriels expliquent une part importante de la variabilité chimique, généralement entre 57 % (Sebkhet El Hamiet)

et 75 % (Chott El Beida), confirmant le rôle prépondérant de la salinisation dans ces systèmes. Ce scénario est typique des sols salés de l'Algérie (Hamdi-Aissa et al., 2004 ; Djemai, 2007). Ce premier axe reflète la variation globale des concentrations des solutions due à l'évaporation et, par conséquent, au climat.

L'étude des individus montre que dans tous les sites, les échantillons les plus salés et concentrés se trouvent au centre des sebkhas, tandis que ceux de la périphérie présentent une salinité moindre, une concentration ionique plus faible et une alcalinité plus marquée.

En résumé, l'ACP appliquée aux paramètres standardisés met en évidence les origines de la minéralisation des solutions du sol. Elle démontre que la chimie des sels est majoritairement influencée par la dissolution des minéraux évaporitiques tels que le gypse, l'anhydrite et la halite, ainsi que par la précipitation de la calcite, aragonite et dolomite.

Les analyses statistiques des profils pédologiques dans les différents sites montrent des variations distinctes dans les niveaux de conductivité électrique (CE). A Sebkhet El Hamiet, des différences significatives de CE ont été confirmées par le test de Welch et les comparaisons multiples post-hoc. A Chott El Frain, l'ANOVA n'a pas révélé de différences statistiquement significatives entre les moyennes de CE des profils pédologiques. Ceci suggère que les variations observées sont aléatoires et non systématiques. A Sebkhet Bazer, les analyses montrent une distribution inégale des valeurs de conductivité entre les profils. A Chott El Beida, l'ANOVA a mis en évidence des variations significatives entre les moyennes des CE des profils, confirmant l'existence de différences importantes entre eux.

En conclusion, à l'exception de Chott El Frain, où les variations de CE semblent aléatoires, les autres sites (Sebkhet El Hamiet, Sebkhet Bazer, Chott El Beida) montrent des différences significatives entre les profils pédologiques, traduisant des niveaux de conductivité distincts.

8. Conclusion

L'analyse des données des propriétés physico-chimiques des quatre sebkhas révèlent que les sols étudiés présentent un pH neutre à alcalin (6,90 à 8,45), reflétant une influence du calcaire. Les teneurs élevées en carbonate de calcium (jusqu'à 91,27 %) jouent un rôle déterminant dans la régulation du pH, favorisant la précipitation de minéraux comme la calcite. La salinisation est un facteur dominant, avec des valeurs de CE allant de non salées à hyper-salées (0,58 à

158,69 dS/m). Les sols montrent une salinité croissante de la périphérie vers le centre des sebkhas et en profondeur, un phénomène typique des environnements endoréiques. Des cycles d'évaporation et d'inondation, ainsi que des teneurs variables en gypse et en sels solubles, renforcent cette dynamique.

Les analyses statistiques et l'analyse en composantes principales (ACP) révèlent que la composition chimique des sols est principalement influencée par la précipitation- dissolution des minéraux évaporitiques (halite, gypse, anhydrite) et carbonatés (calcite, dolomite). Les analyses montrent des différences significatives de CE dans la majorité des sites, à l'exception de Chott El Frain, où les variations semblent aléatoires. Cette variabilité reflète l'impact des processus locaux, tels que les apports en sels solubles, la texture argileuse et l'épaisseur des horizons de surface.

***Chapitre VI. Approche
géochimique de l'étude de
la salinisation des sols***

Chapitre VI. Approche géochimique de l'étude de la salinisation des sols

1. Introduction

Après avoir caractérisé le sol dans sa globalité par une description des toposéquences faisant l'objet de ce travail ainsi qu'une caractérisation physicochimique des échantillons de sol prélevés, dans les deux chapitres précédents. Ce chapitre s'intéresse à l'étude géochimique de la salinité et du mouvement des sels dans les sols des quatre sebkhas. Dans un premier temps il est consacré à l'étude des faciès chimiques des solutions du sol ainsi que leur évolution au cours du phénomène de concentration. Dans un deuxième temps il met en évidence l'évolution de la composition chimique de la solution au cours des phénomènes de concentration, ainsi que son état de saturation vis-à-vis des minéraux susceptibles de précipiter dans ce genre de milieu. Une étude de la distribution des sels en fonction de la profondeur sera abordée aussi. Enfin, cette étude est complétée par la détermination de la voie géochimique de salinisation par le calcul l'alcalinité résiduelle.

2. Le faciès chimique des solutions des sols

Les faciès chimiques sont exprimés en termes d'ions libres. En rapportant la concentration de chacun des cations sur la somme des cations et chacun des anions sur la somme des anions, le faciès chimique peut être représenté sur un diagramme ternaire connu sous le nom de diagramme de Piper (Piper, 1944). Vu sa part importante, l'ion NO_3^- a été pris en compte lors de la détermination du faciès chimique.

2.1. Le faciès chimique à Sebkhet El Hamiet

L'analyse trinéaire des données à l'aide du diagramme de Piper (Figure 27), a permis de faire des regroupements sur le diagramme des anions, les points sont divisés sur les deux pôles chloruré et sulfaté. La concentration des anions suit les séquences suivantes : $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$ et $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^-$; Cl^- varie de 29 à 2080 meq/l, SO_4^{2-} varie de 68 à 411,4 meq/l. Concernant les cations, la plupart des solutions sont de faciès sodique de type soit : $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ ou $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$. Na^+ varie de 122 à 1540 meq/l. Seul l'échantillon H63 où le

faciès est calcique de type $\text{Ca}^{++} > \text{Na}^{++} > \text{Mg}^{++}$. Le faciès dominant est chloruré sodique suivie de sulfaté sodique et enfin chloruré calcique.

2.2. Le faciès chimique à Chott El Frain

La Figure 27, montre que sur le diagramme des anions, tous les points sont localisés sur le pôle chloruré, le faciès est de type $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{--} > \text{HCO}_3^-$, à l'exception de l'échantillon F43 qui présente un faciès sulfaté de type $\text{SO}_4^{--} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^-$, Cl^- varie de 14 à 1296 meq/l, SO_4^{--} varie de 5,38 à 258,6 meq/l. Concernant les cations, le faciès est sodique de type $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{++} > \text{Mg}^{++}$ ou calcique de type $\text{Ca}^{++} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{++}$. Na^+ varie de 42,02 à 806,95 meq/l et Ca^{++} varie de 12,68 à 452,16 meq/l. Le faciès dominant est chloruré sodique suivie du chloruré calcique et enfin sulfaté calcique.

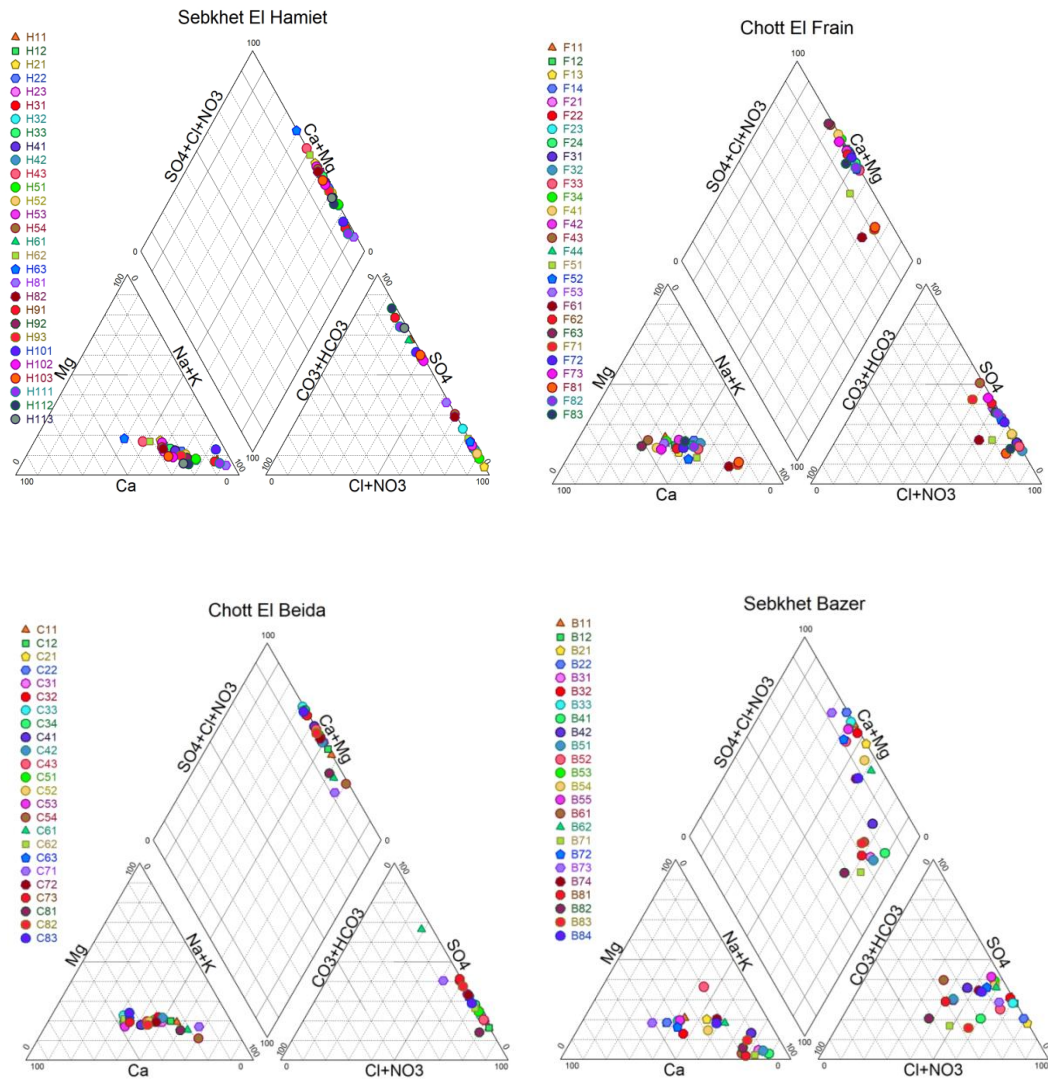
2.3. Le faciès chimique à Sebkhet Bazer

Sur le diagramme de Piper (Figure 27), il peut être observé que la quasi-totalité des échantillons sont concentrés sur le pôle chloruré sauf l'échantillon B61 présentant un faciès sulfaté et l'échantillon B82 avec un faciès alcalin. Cl^- varie de 3 à 1090 meq/l. Le faciès est de type $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{--} > \text{HCO}_3^-$ ou $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{--}$. En ce qui concerne les cations, la plupart des solutions sont de faciès sodique de type $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{++} > \text{Mg}^{++}$ ou $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{++} > \text{Ca}^{++}$. Exception faite pour les échantillons B12, B22 et B73 où le faciès est calcique de type $\text{Ca}^{++} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{++}$. Na^+ varie entre 15,33 et 723,57 meq/l. Le faciès dominant est chloruré sodique suivie du chloruré calcique et sulfaté sodique et enfin bicarbonaté sodique.

2.4. Le faciès chimique à Chott El Beida

L'analyse du diagramme de Piper (Figure 27), montre que sur le diagramme des anions, tous les échantillons sont de faciès chloruré exception faite pour l'échantillon C61 avec un faciès sulfaté. Cl^- varie de 25 à 1146 meq/l. Le faciès est de type $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{--} > \text{HCO}_3^-$ ou $\text{SO}_4^{--} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^-$. Concernant les cations, la majorité des solutions sont de faciès sodique de type $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{++} > \text{Mg}^{++}$ (Na^+ varie entre 59,44 et 812,34 meq/l) à l'exception des échantillons C33, C34, C62, C53, C63, C63, C73 et C83 où le faciès est calcique de type $\text{Ca}^{++} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{++}$ (Ca^+ varie entre 13,59 et 380,33 meq/l). Le faciès dominant est chloruré sodique suivie du chloruré calcique et enfin sulfaté sodique.

En résumé 68,57 % des solutions sont chlorurées sodiques, 17,14 % sont chlorurées calciques et 12,38 % sont sulfatées sodiques.



**Figure 27. Faciès chimique des solutions des sols des quatre sebkhas
(Diagramme de Piper)**

2.5. Evolution du faciès chimique au cours du phénomène de concentration

Lors du phénomène de concentration, des évolutions des faciès chimiques des solutions du sol peuvent arriver. Pour visualiser ces modifications, les solutions du sol des quatre sebkhas ont

été classées selon un gradient croissant de leur facteur de concentration, ceci a permis de les départager en deux groupes ; un premier groupe avec un $\log FC < 0,90$, ce sont les solutions les moins concentrées, et un second groupe avec un $\log FC > 0,90$, il s'agit des solutions les plus concentrées. La représentation graphique des deux groupes sur le diagramme de piper (Figure 28) montre que : concernant les anions, le faciès est départagé entre le chloruré et le sulfaté dans les solutions diluées, après la concentration on observe une augmentation de la part des chlorures au détriment des autres anions notamment les sulfates, En ce qui concerne les cations il y a une nette augmentation de la part du calcium en comparaison avec les solutions diluées où le faciès était quasiment sodique. Néanmoins le faciès sodique reste le plus dominant.

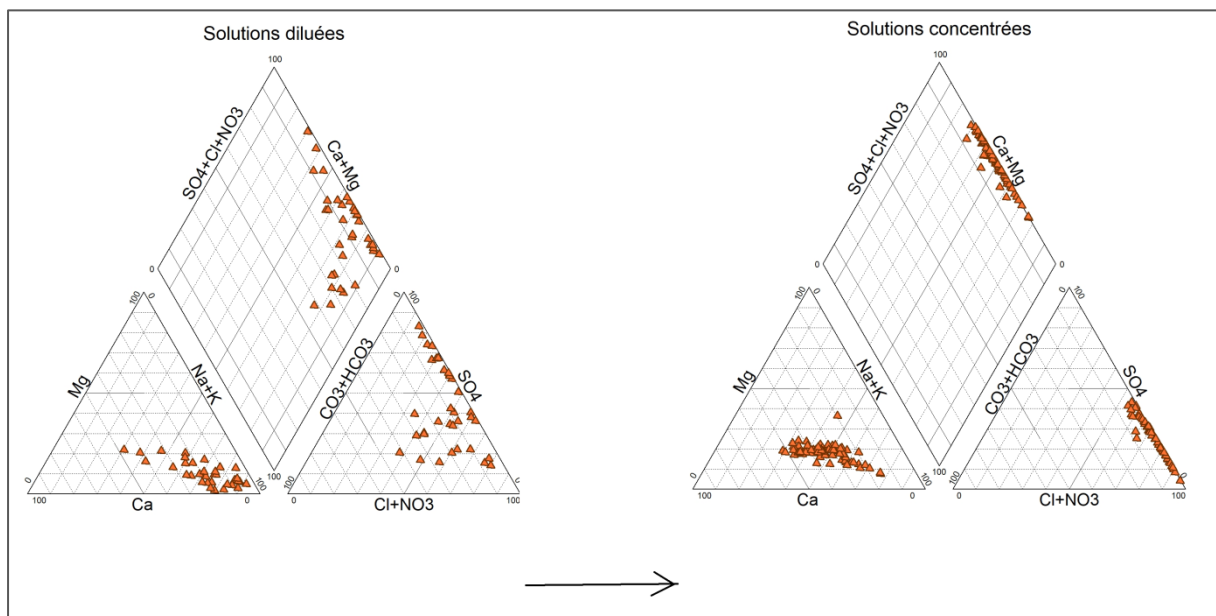


Figure 28. Evolution du faciès chimique au cours du phénomène de concentration

- **Discussion**

Les faciès dominants dans les solutions du sol étaient le chlorure de sodium (Na-Cl), suivi du sulfate de sodium (Na-SO₄) et du chlorure de calcium (Ca-Cl). Les ions les plus prévalents étaient le sodium et le chlorure. Les concentrations de ces deux ions suggèrent que les faciès chimiques des solutions du sol sont fortement influencés par la dissolution d'évaporites, principalement la halite (Brinis et al., 2015 ; Askri et al., 2016). Les échantillons présentant des

faciès calcaires étaient situés soit dans les horizons de subsurface soit en profondeur des profils. Cette distribution peut avoir été affectée par la précipitation et la dissolution de minéraux calcaires ou évaporitiques (Hamed et Dhahri, 2013 ; M'nassri et al., 2018). Ces faciès sont très courants en Afrique du Nord (Djamai et al., 2011 ; Chenaker et al., 2018) et sont caractéristiques de la voie saline neutre (Droubi, 1976 ; Ouamer-Ali et al., 2018).

Dans un environnement où le calcium est abondant et les sulfates relativement limités, les dépôts de sels blancs en surface présentent souvent une forte concentration en chlorures de calcium, de magnésium et de sodium. Ce phénomène, appelé *salan hygroscopique*, est particulièrement fréquent sur les hauts plateaux algériens (Aubert, 1976).

Dans les eaux souterraines salées des Chotts et Sebkhass, les concentrations des principaux ions en solution varient et peuvent être dominées par le chlorure, le sulfate ou le bicarbonate. La composition finale de la solution du sol est principalement déterminée par la composition initiale de l'eau douce provenant de la nappe phréatique ou des précipitations, modifiée par l'état de saturation de certains minéraux comme la calcite, le gypse et la halite (Andersen et al., 2005 ; Dogramaci et al., 2012).

3. Evolution de la composition chimique des solutions en fonction de leur concentration

Cette partie est réservée à l'étude du comportement des cations et anions majeurs lors du phénomène d'évaporation et des ions mineurs. A partir du moment où toutes les solutions sont considérées comme un seul système qui se concentre par évaporation en démarrant de la solution la plus diluée jusqu'à celle la plus concentrée ; d'où l'utilité de faire l'échantillonnage selon un gradient de salinité croissant ou décroissant.

Les concentrations ioniques ont été représentées en fonction d'un facteur de concentration (FC). Le choix de l'ion qui servira au calcul du facteur de concentration est basé sur son caractère conservatif durant la concentration de la solution. L'ion chlorure sera utilisé pour le calcul du FC. Cet élément est abondant dans la solution du sol d'une part. D'une autre part, il forme rarement des paires d'ions en s'associant à d'autres ions et ne participe pas à des phénomènes de précipitation chimiques que lorsque les solutions atteignent des concentrations trop élevées, ce qui lui confère le caractère conservatif (Valles, 1987 ; Gonzalez-Barrios, 1992 ; Barbiero, 1994 ; Boivin et al., 1995).

L'observation des figures 29, 30, 31, 32, indique que les ions majeurs sont ordonnés en fonction du facteur de concentration. Cette représentation est basée sur l'hypothèse que l'ensemble des solutions constitue un même système hydrochimique qui se concentre par évaporation or ça reste une approximation.

De première vue et sur l'ensemble des zones d'étude, la dispersion relative des points fournit une information sur les processus contrôlant les solutions du sol. Ces dernières ne sont pas uniquement sous le contrôle du phénomène d'évaporation, elles peuvent être pareillement soumises à d'autres processus chimiques d'où la dispersion des points.

3.1. Comportement du sodium

L'analyse des diagrammes des concentrations des quatre sebkhas révèle que le sodium augmente simultanément avec le facteur de concentration. Néanmoins à de faibles concentrations et lorsque $\log FC$ est inférieur à 0,67, 0,89, 0,92 et 0,97 pour Frain, Bazer, El Beida et El Hamiet respectivement, la concentration en Na^+ est supérieure aux chlorures, ceci peut être traduit par la participation du sodium à des réactions d'échanges ioniques. Notant que le sodium ne participe à des réactions d'échange qu'à de faibles concentrations de la solution du sol ; à de fortes concentrations la part du sodium participant à la réaction d'échange est négligeable en comparaison à celle dans la solution du sol. Toutefois la concentration en sodium augmente constamment pour rejoindre la courbe des chlorures avec un rapport Na / Cl inférieur à 1.

3.2. Comportement du calcium

L'évolution de la concentration en Ca^{++} est similaire dans toutes les sebkhas, ce dernier augmente proportionnellement avec le FC mais moins vite que les chlorures. Ceci peut être dû à une perte de matière dans la solution qui peut être attribué à la formation de la calcite (Droubi, 1976) car c'est le minéral le moins soluble et qui est susceptible de précipiter dans ce genre de milieu. Dans sebkhet Bazer et pour les solutions les plus diluées avec un $\log FC < 0,22$, la concentration en Ca^{++} est supérieure aux chlorures traduisant une libération du calcium en solution. Ce phénomène peut être dû à une désorption de cet élément pour laisser la place au sodium sur le complexe adsorbant.

3.3. Comportement des sulfates

L'observation des diagrammes de concentration des ions sulfates en fonction de log FC montre que la concentration en SO_4^- progresse moins vite que les chlorures avec une légère inflexion de la courbe pour les solutions les plus concentrées (log FC > 1,64 à El Frain > 1,53 à Chott El Beida) ; indiquant qu'une partie du SO_4^- a participé dans la formation d'un minéral sulfaté probablement le gypse. A Sebket El Hamiet le comportement est légèrement différent ; la concentration en sulfates est indépendante de FC, ceci traduit que les sulfates sont impliqués dans des précipitations chimiques même à de faibles concentrations de la solution du sol. La confrontation de ces résultats avec ceux du faciès chimique montre que les solutions les plus diluées et jusqu'à un log FC = 0,78, présentent un faciès sulfaté. Au-delà de cette valeur, les solutions sont marquées par un faciès chloruré ; ce qui peut traduire une précipitation du gypse même à de faibles concentrations de la solution du sol.

3.4. Comportement du potassium

Le comportement du potassium est relativement similaire dans toutes les sebkhas ; ce dernier augmente proportionnellement avec le FC mais avec un nuage de points plus ou moins dispersé. Le potassium peut être contrôlé dans la solution par plusieurs processus à la fois.

3.5. Comportement du magnésium

La concentration en magnésium est relativement régulière, Mg^{++} augmente avec le facteur de concentration avec parfois une dispersion des points. Les valeurs sont nettement inférieures à celles des chlorures ; ceci peut être dû à sa participation à la précipitation d'un minéral magnésien ; il s'agit bien de la dolomite.

3.6. Comportement de l'alcalinité

Les concentrations en HCO_3^- sont stables et indépendantes du FC, elles tendent légèrement à la baisse. Ce comportement confirme la loi du T dans le cas de la précipitation de la calcite avec une alcalinité résiduelle négative.

- *Discussion*

L'étude de la composition chimique des solutions en fonction de leurs concentrations a montré que la concentration en calcium (Ca^{++}) augmentait légèrement à mesure que la solution devenait plus concentrée. Ce comportement peut être dû à la soustraction des ions calcium de la solution du sol par précipitation chimique ou échange ionique. Le calcium et les sulfates présentaient le même comportement lorsque les solutions étaient concentrées. Ces deux ions étaient soustraits de la solution pour précipiter le gypse (Djamai et al., 2011 ; M'nassri et al., 2018 ; Bouteraa et al., 2019). La diminution de l'alcalinité lorsque la solution était concentrée peut s'expliquer par une ARc négative après la précipitation de la calcite (Djamai et al., 2011 ; Abdennour et al., 2021).

Les ions Cl^- , Na^+ et SO_4^{--} étaient les ions les plus dominants dans la solution du sol en raison de la dissolution de sels évaporatifs tels que la halite. Le sodium et les chlorures évoluaient de manière similaire. Cette relation montre que la concentration de ces deux ions est contrôlée par la dissolution de la halite (Askri et Al-Shanfari, 2017). Dans les bassins endoréiques, la présence abondante de minéraux sodiques dans les roches parentales, tels que les amphiboles, les pyroxènes sodiques et les plagioclases sodiques, contribue à une libération significative d'ions Na^+ (Monteiro et al., 2012). Le réapprovisionnement et l'écoulement à travers les terrains en pente, ainsi que le déversement au fond de la cuvette, peuvent accentuer le phénomène (Fitzpatrick et al., 1994).

Étant donné que le sodium dans la solution du sol n'est pas régulé par des processus de précipitation, son retrait à faibles concentrations résulte de réactions d'échange ioniques avec complexe adsorbant. (Houha et al., 2008). De plus, Ca^{++} et Na^+ présentaient un coefficient de corrélation élevé, suggérant que des processus d'échange de cations se produisent. La concentration en Na^+ augmente suite à un équilibre entre la précipitation de la calcite et d'autres minéraux lors de la concentration des solutions du sol par évaporation durant la saison estivale, et la libération de cations divalents pendant la saison des pluies. La précipitation des minéraux contenant du calcium et du magnésium entraîne une augmentation relative de la concentration d'ions Na^+ en solution. En conséquence, les ions échangeables Ca^{++} et Mg^{++} sont remplacés par des ions Na^+ sur le complexe d'échange (Sajil Kumar et James, 2016 ; Bui, 2017 ; Sajil Kumar, 2020). Ce processus augmente les valeurs de l'ESP et conduit à la sodification des sols. Ce

phénomène n'est appréciable qu'à de faibles concentrations (Laoufi, 2010 ; Bouteraa et al., 2019 ; Ncibi et al., 2020).

Les concentrations de potassium (K^+) et de magnésium (Mg^{++}) évoluent proportionnellement avec le facteur de concentration, mais avec moins d'intensité que les chlorures. Cela suggère que le potassium ne participe pas aux phénomènes de précipitation minérale, mais peut être impliqué dans les échanges ioniques (Wang et al., 2004), étant donné que les sols étudiés présentent des taux élevés d'argile et de matière organique. Selon Ait Mechedal et al., (2017), le potassium présente un comportement très complexe en milieu salé. Il est très variable selon la forme qu'elle soit totale, soluble, échangeable ou rétrogradé.

Le magnésium, en revanche, est contrôlé par la précipitation de dolomite (Bradai et Douaoui, 2013). Selon les diagrammes de concentration, il s'avère que le contrôle du Ca^{++} apparaît plus fort que celui du Mg^{++} au cours du processus de concentration par évaporation (Abdelhafid et al., 2019).

Dans ce type d'environnement, caractérisé par des alternances de phases de concentration et de dilution, de nombreux processus se produisent. La sodicité affecte les propriétés hydrodynamiques du sol. Elle limite l'infiltration de l'eau, limitant ainsi la pénétration en profondeur des eaux de pluie à faible salinité. Par ailleurs, l'évapotranspiration intensifie la concentration des eaux, ce qui accroît la sodicité dans les couches superficielles du sol.

L'efficacité du lessivage du sodium (Na^+) dépend de la concentration en ions calcium (Ca^{++}) dans les solutions du sol, entraînant une saturation en sodium plus marquée dans les horizons profonds. En surface, des concentrations plus élevées en calcium (Ca^{++}) et magnésium (Mg^{++}) peuvent favoriser une dissolution accrue de la calcite, particulièrement en zones humides où le milieu est saturé d'eau et où la pression partielle en CO_2 demeure élevée (Lamini, 2020).

En plus des ions majeurs, des niveaux élevés de salinité sont souvent concomitants avec une augmentation des concentrations de certains ions tels que le bore (Smedley et al., 2005 ; Deng et al., 2009), le fluorure (Jacks et al., 2005 ; Li et al., 2019), le sélénium (Naftz et al., 2008 ; Santucci et al., 2016 ; Ait Mechedal et al., 2024) et l'arsenic (Scanlon et al., 2009 ; Rango et al., 2013 ; Li et al., 2020).

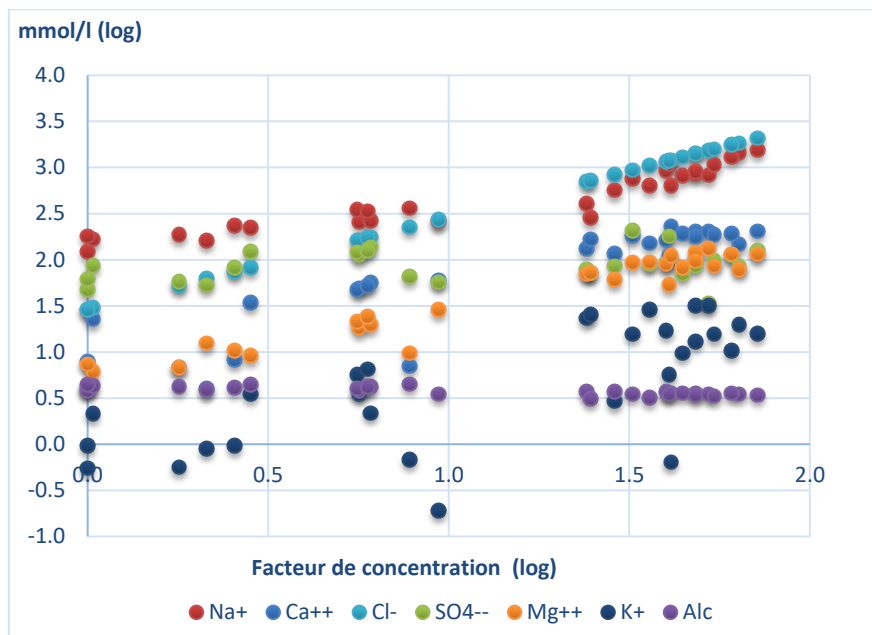


Figure 29. Evolution de la composition chimique des solutions du sol en fonction de leur concentration « Sebkhet El Hamiet »

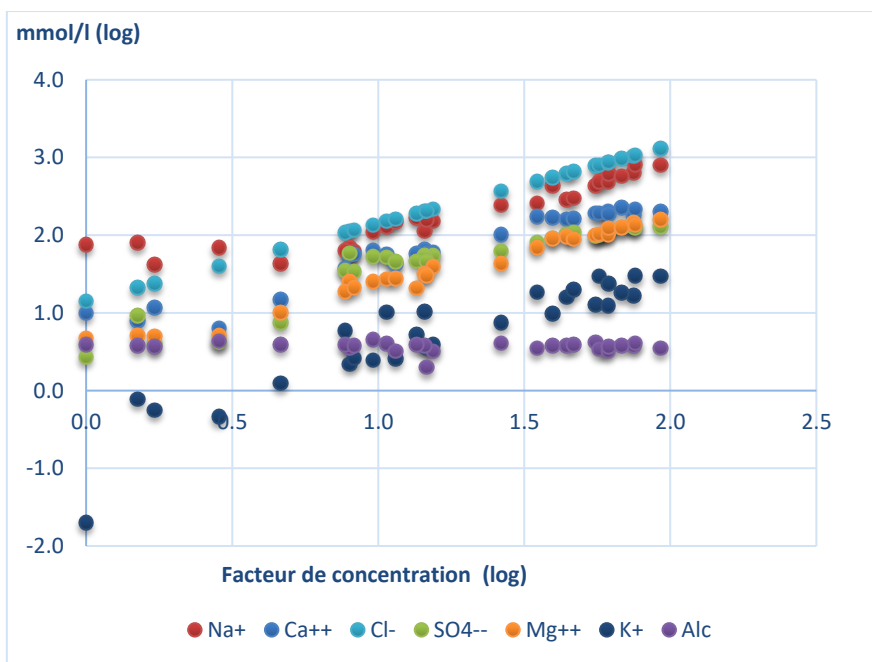


Figure 30. Evolution de la composition chimique des solutions du sol en fonction de leur concentration « Chott El Frain »

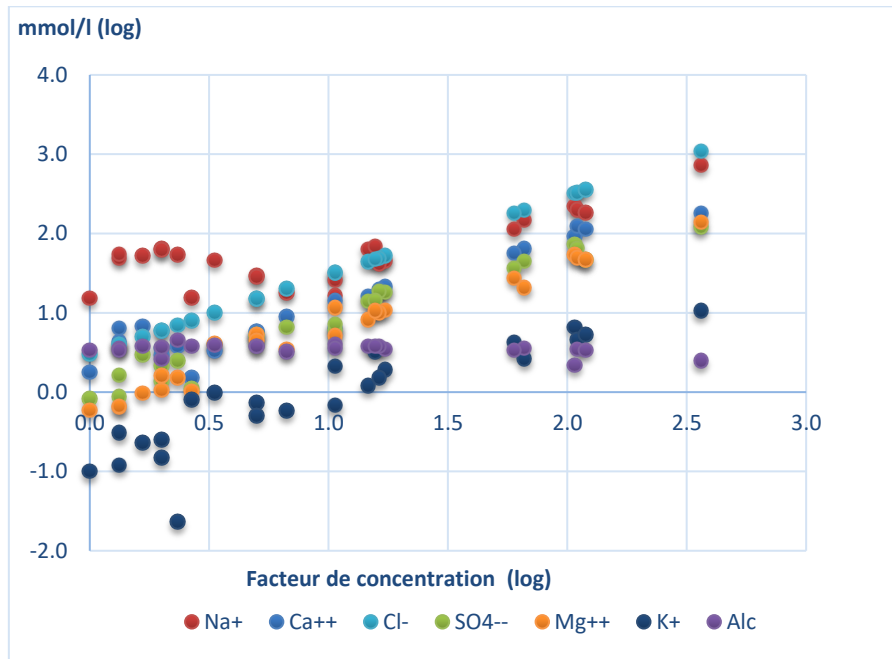


Figure 31. Evolution de la composition chimique des solutions du sol en fonction de leur concentration « Sebkhet Bazer »

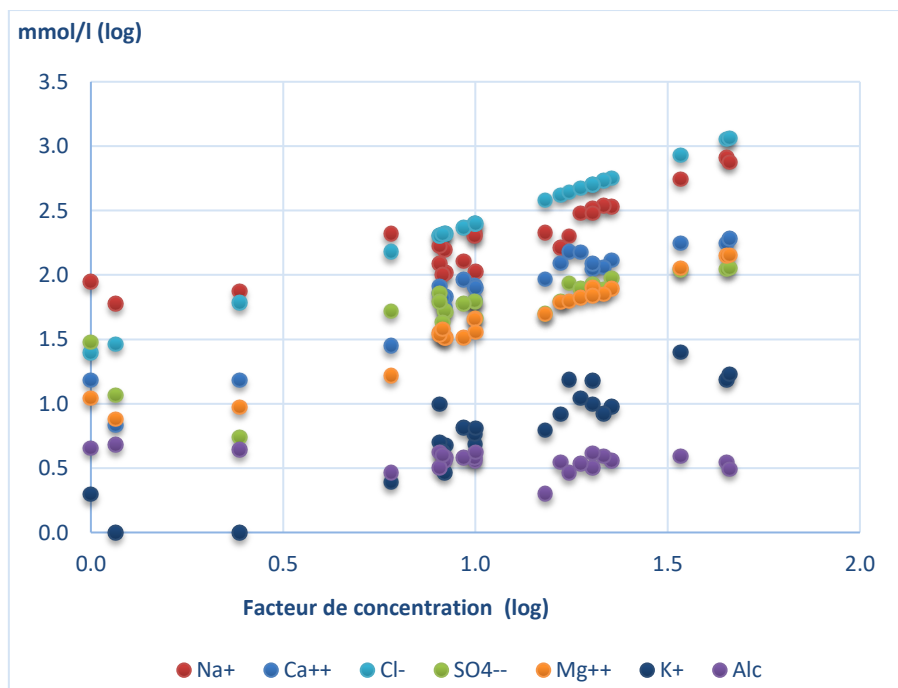


Figure 32. Evolution de la composition chimique des solutions du sol en fonction de leur concentration « Chott El Beida »

4. Les tests de saturation vis-à-vis des minéraux susceptibles de précipiter

Les tests de saturation peuvent être utilisés pour étudier les eaux souterraines ainsi que les solutions de sol. L'indice de saturation (IS) est essentiel pour envisager la minéralogie de la solution du sol à partir des données de bilan ionique sans collecter des échantillons de la phase solide et analyser la minéralogie (Deutsch, 1997). Dans cette étude, ces tests seront appliqués à 105 solutions extraites d'échantillons de sol prélevés sur les quatre Sebkhass. Les résultats des calculs, effectués à l'aide du modèle PhreeqC, sont présentés en fonction du degré de minéralisation des solutions de sol. Chaque minéral est associé à une équation de dissolution spécifique. En appliquant la loi d'action de masse, il est possible d'écrire, à l'équilibre, la relation entre les activités ioniques des ions dissous constituant le minéral.

Les solutions de sol ont été testées vis-à-vis des minéraux suivants : calcite, aragonite, dolomite, gypse, anhydrite et halite. Les réactions de dissociation ainsi que les produits de solubilité des différents minéraux sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau XXXIII. Produits de solubilité des différents minéraux étudiés

Minéral	Réaction de dissociation	Produit de solubilité (K)
Calcite	$\text{CaCO}_3 \rightleftharpoons \text{Ca}^{++} + \text{CO}_3^{--}$	$10^{-8,37}$
Aragonite	$\text{CaCO}_3 \rightleftharpoons \text{Ca}^{++} + \text{CO}_3^{--}$	$6,10^{-9}$
Dolomite	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 \rightleftharpoons \text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++} + 2\text{CO}_3^{--}$	10^{-17}
Gypse	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Ca}^{++} + \text{SO}_4^{--} + 2\text{H}_2\text{O}$	$10^{-4,85}$
Anhydrite	$\text{CaSO}_4 \rightleftharpoons \text{Ca}^{++} + \text{SO}_4^{--}$	$10^{-4,70}$
Halite	$\text{NaCl} \rightleftharpoons \text{Na}^+ + \text{Cl}^-$	$10^{1,58}$

4.1. L'état de saturation des solutions de sols dans Sebkheth El Hamiet

L'analyse du niveau de saturation des 28 échantillons de sol prélevés à Sebkheth El Hamiet (Annexe XXXI) et (Figure 33 (a), (b), (c)), montrent que l'ensemble des solutions ont atteint l'état d'équilibre vis-à-vis de la calcite, l'aragonite et la dolomite. Les tests de saturation vis-à-vis du gypse et de l'anhydrite montrent que l'état d'équilibre est atteint pour toutes les

solutions à l'exception des échantillons : H11, H61, H81, H91 et H101 (Figures 33 (d) (e)) ; il peut être remarqué que tous ces échantillons appartiennent à des horizons de surface et présentent des valeurs de conductivité électriques assez faibles. Toutes les solutions sont sous saturées vis-à-vis de la halite.

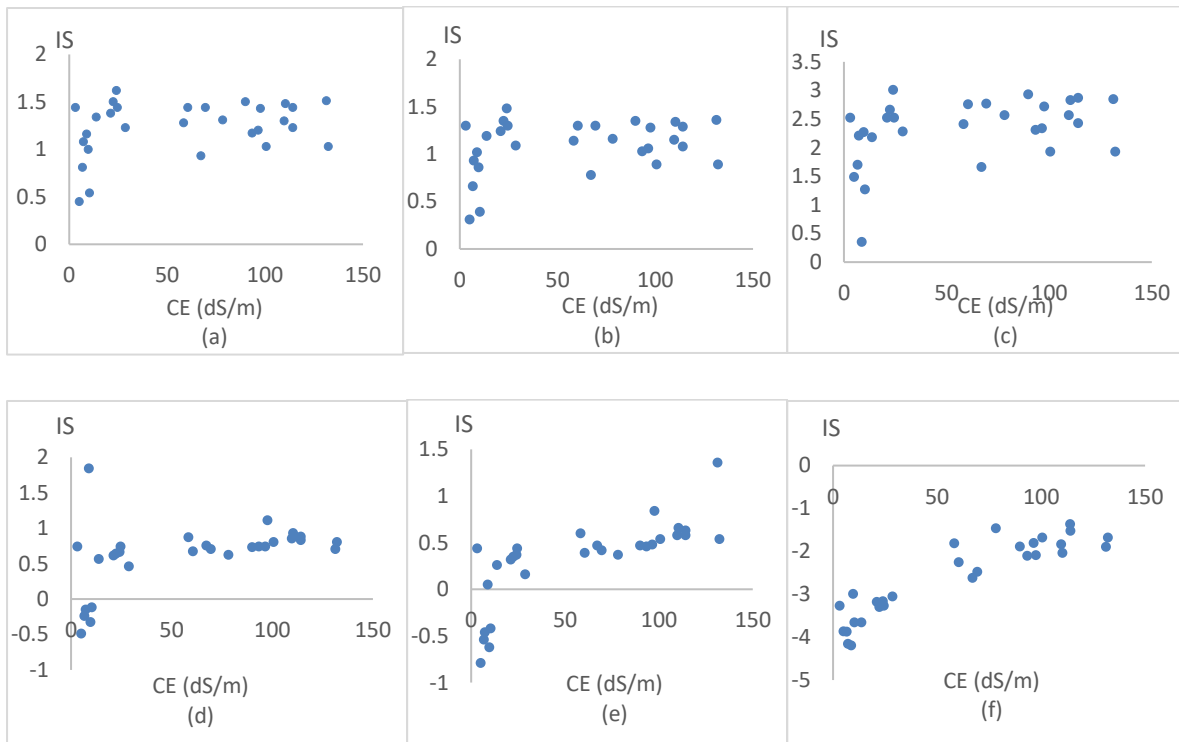


Figure 33. Evolution de l'indice de saturation des minéraux en fonction de la CE dans Sebket El Hamiet

(a) Calcite ; (b) Aragonite ; (c) Dolomite ; (d) Gypse ; (e) Anhydrite ;(f) Halite

4.2. L'état de saturation des solutions de sols dans Chott El Frain

Les calculs des indices de saturation (Annexe XXXI), montrent que l'ensemble des solutions ont atteint leurs états d'équilibre été vis-à-vis de la calcite, l'aragonite et la dolomite (Figure 34 (a) (b) (c)).

Les tests de saturation vis-à-vis du gypse et de l'anhydrite (Figures 34 (d) (e)), montrent que l'état d'équilibre est atteint pour toutes les solutions à l'exception des échantillons F51, F61, et F83 qui sont en sous-saturation. Toutes les solutions sont sous-saturées vis-à-vis de la halite.

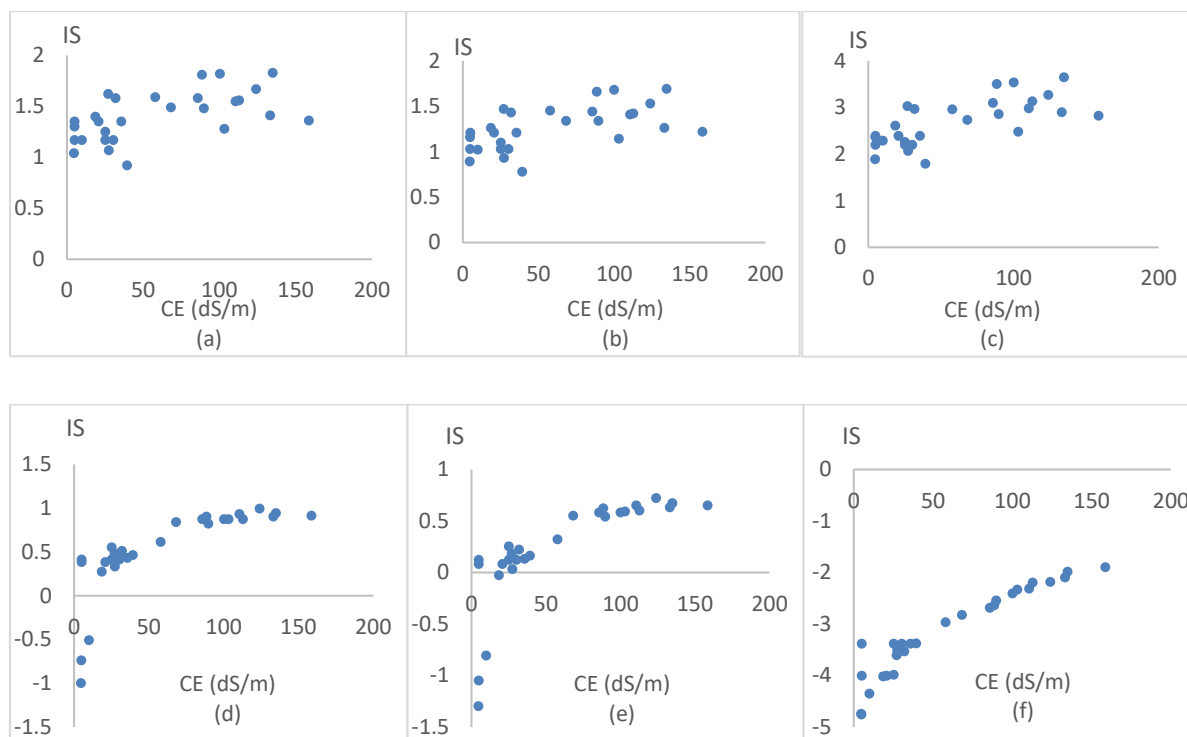


Figure 34. Evolution de l'indice de saturation des minéraux en fonction de la CE dans Chott El Frain
 Calcite ; (b) Aragonite ; (c) Dolomite ; (d) Gypse ; (e) Anhydrite ;(f) Halite

4.3. L'état de saturation des solutions de sols dans Sebket Bazer

Les indices de saturation calculés (Annexe XXXII) ainsi que la Figure 35 (a), (b) et (c), révèlent une saturation des solutions en minéraux carbonatés, notamment en calcite, aragonite et dolomite. Cela indique que ces minéraux atteignent un équilibre dans les conditions géochimiques actuelles du sol.

En revanche, les tests de saturation pour le gypse et l'anhydrite (Figures 35 (d) et (e)) montrent une sous-saturation dans la majorité des échantillons. Cependant, les échantillons (B11, B12, B21, B22, B32, B33) montrent un état de saturation pour le gypse et l'anhydrite.

Enfin, toutes les solutions sont sous-saturées par rapport à la halite, suggérant une très faible concentration d'ions sodium et chlorure dans les conditions actuelles. Cette sous-saturation en halite indique que les précipitations de ce sel sont peu probables dans les conditions d'aridité présentes.

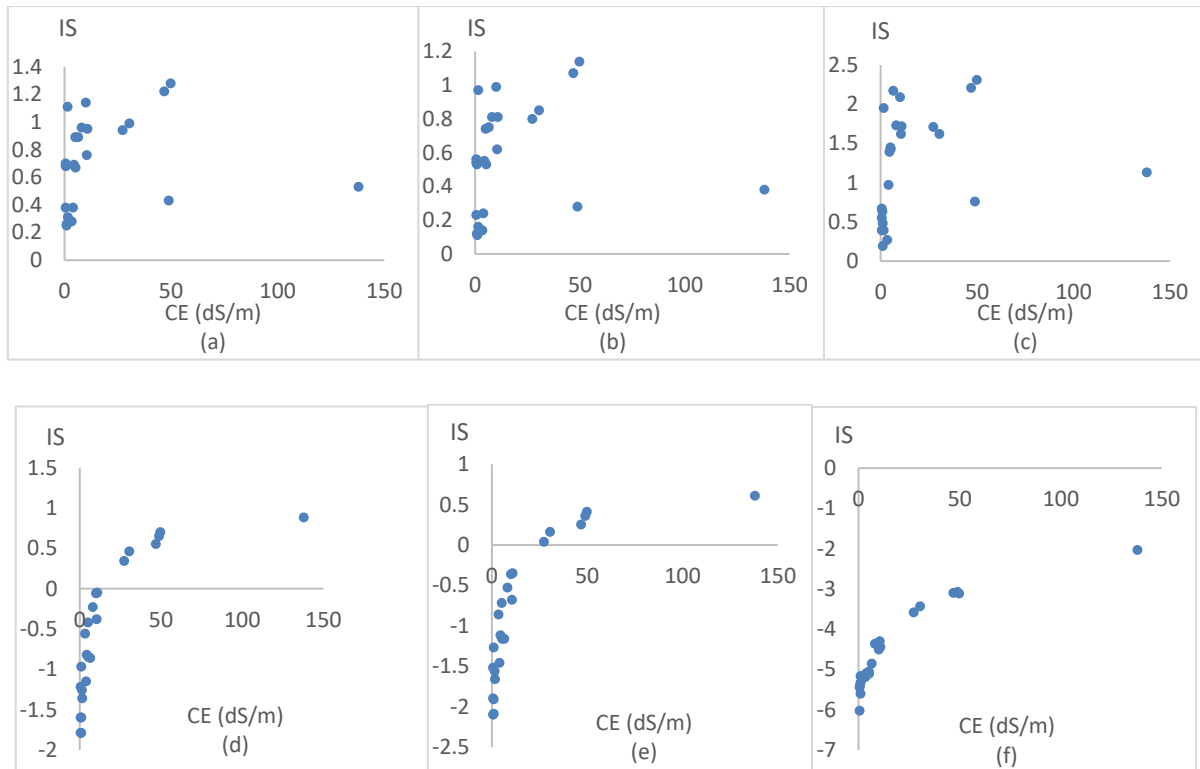


Figure 35. Evolution de l'indice de saturation des minéraux en fonction de la CE dans Sebket Bazer

(a) Calcite ; (b) Aragonite ; (c) Dolomite ; (d) Gypse ; (e) Anhydrite ;(f) Halite

4.4. L'état de saturation des solutions de sols dans Chott El Beida

D'après les tests de saturation (Annexe XXXIII), toutes les solutions sont saturées en calcite, aragonite et dolomite (Figure 36 (a), (b), (c)). Les tests de saturation pour le gypse (Figure 36 (d)) indiquent que l'état d'équilibre est atteint pour toutes les solutions à l'exception des échantillons C61, C71 et C81, qui sont en sous-saturation. Ces échantillons présentent également les conductivités électriques les plus faibles,

respectivement de 15,25, 7,57 et 9,45 dS/m. Les tests de saturation pour l'anhydrite (Figure 36 (e)) montrent que les solutions sont saturées, à l'exception des échantillons C54, C61, C71 et C81. Enfin, toutes les solutions sont en sous-saturation par rapport à la halite.

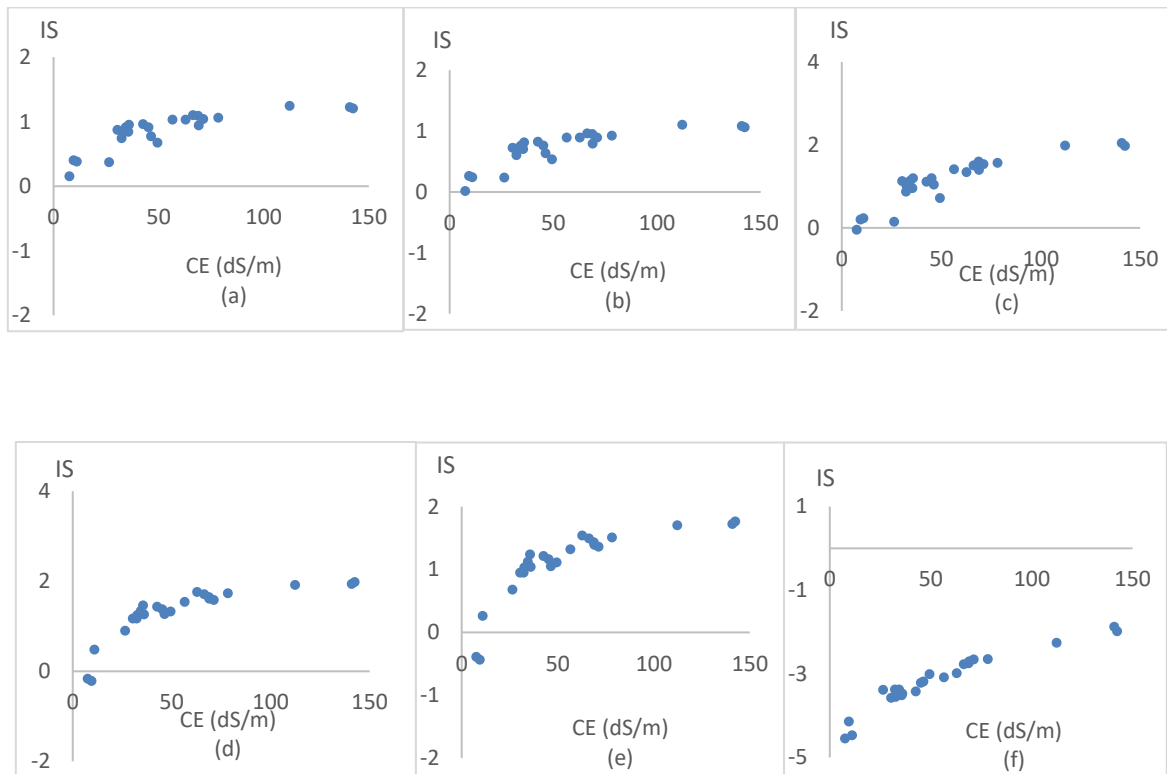


Figure 36. Evolution de l'indice de saturation des minéraux en fonction de la CE dans Chott El Beida
(a) Calcite ; (b) Aragonite ; (c) Dolomite ; (d) Gypse ; (e) Anhydrite ;(f) Halite

- *Discussion*

Il est important de souligner le rôle de l'évaporation dans l'enrichissement en sels du sol, particulièrement dans les bassins fermés des milieux arides et semi-arides (Wagner, 2011 ; Herrera et al., 2016). Des études ont démontré que dans de tels environnements, l'évaporation est le principal moteur de la précipitation minérale où elle peut conduire à la formation de vastes dépôts de sels (Goudie et Viles, 2012).

Cet enrichissement s'intensifie lorsque le niveau de la nappe phréatique est bas, que l'évaporation dépasse les précipitations, et que le lessivage des sels accumulés est insuffisant

ou absent (Cary et al., 2015). Ce phénomène est observé dans Chott El Frain. Dans les trois autres zones étudiées, les profils pédologiques révèlent une nappe phréatique moins profonde. À Sebket Bazer, lac salé permanent qui ne s'assèche pas en été, la toposéquence a été effectuée à l'extérieur de la sebkha pour des raisons pratiques, rendant le niveau de la nappe invisible lors de l'établissement des profils pédologiques.

Les tests de saturation, calculés avec le modèle PhreeqC pour tous les échantillons de sol, montrent une tendance des minéraux carbonatés à précipiter. Cependant, les minéraux sulfurés à faible indice de saturation (IS) tendent à se dissoudre. La composition chimique des sels dans ces milieux semble être principalement déterminée par la dissolution de la halite, du gypse et de l'anhydrite. Les minéraux sulfurés, en particulier le gypse et l'anhydrite pour des solutions faiblement salines, ainsi que la halite, sont sous-saturés et ont tendance à se dissoudre, ce qui corrobore les résultats obtenus par Hamdi-Aissa et al. (2004) et Al-Homidy et al. (2017) pour les environnements de sebkha. Ces minéraux constituent ainsi la principale source de minéralisation de la solution du sol, produisant une concentration continue de solution saline. Leur origine est attribuée aux dépôts miopliocènes-quaternaires (Figure 6), où la précipitation de la calcite, aragonite et dolomite est associée à des échanges ioniques avec les minéraux argileux (M'nassri et al., 2018).

Les résultats des tests de saturation pour les carbonates ne sont pas surprenants. Ils peuvent être confirmés de deux manières : premièrement, par les observations de terrain, où tous les horizons présentent une réaction positive à l'acide chlorhydrique, confirmant la présence de CaCO_3 , avec des accumulations sous forme de pseudo-mycélium, comme dans les horizons H12, H22, H32, H81, H82, H92, H102, H112, H113, F41, F42, F51, F61, F63, C31, C52, C72 et C83, ainsi que des amas ou nodules de CaCO_3 . Deuxièmement, par les analyses quantitatives des carbonates de calcium, dont les valeurs varient entre 5,62 et 91,27 %. Il est à noter que tous les minéraux précipités contiennent du calcium et du magnésium dans leur structure. Contrairement aux climats humides, où les cations et les anions sont généralement lessivés du système sol et transportés vers les basses terres ou les aquifères souterrains (Zinck et Metternicht, 2009), dans les climats arides et semi-arides, ces cations restent souvent dans le complexe d'échange du sol ou précipitent sous forme de minéraux secondaires lorsque la concentration ionique atteint la saturation. Les sels peu solubles comme le carbonate de calcium (CaCO_3), le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et la magnésite (MgCO_3) précipitent facilement dans

ces conditions. Les travaux de Frenkel (1984) ont montré que les eaux de surface et souterraines dans les régions arides et semi-arides sont presque toutes saturées en CaCO_3 et contiennent également des concentrations élevées de sulfate de calcium, qui peuvent également précipiter dans le sol (Guo et Wang, 2005 ; Avrahamov et al., 2014 ; Narsimha et Sudarshan, 2018).

L'état de sous-saturation par rapport à la halite explique le faciès chimique identifié. Le faciès chimique prédominant est chloruré sodique, résultant de la dissolution des minéraux évaporitiques, ce qui provoque la minéralisation de la solution. Les conditions d'aridité ne sont pas suffisantes pour précipiter des évaporites (Vallès et al., 1997). Lorsque les conditions d'aridité sont plus accentuées, des sels plus solubles que le gypse peuvent précipiter dans le sol. Ils sont appelés « sels solubles » et englobent les minéraux diagnostiques qui définissent les sols salins selon IUSS Working Group WRB (2022). Ces sels comprennent les carbonates de sodium (trona, thermonatrite), les sulfates de sodium (par exemple, thenardite), les sulfates de magnésium (par exemple, hexahydrate, epsomite), le chlorure de potassium (sylvite), les chlorures de magnésium (par exemple, bischofite) et le sel le plus soluble et courant, le chlorure de sodium (NaCl , halite) (Hamdi Aissa et al., 2004 ; Stavi et al., 2021).

5. La distribution verticale de la salinité dans le profil (Profils salins)

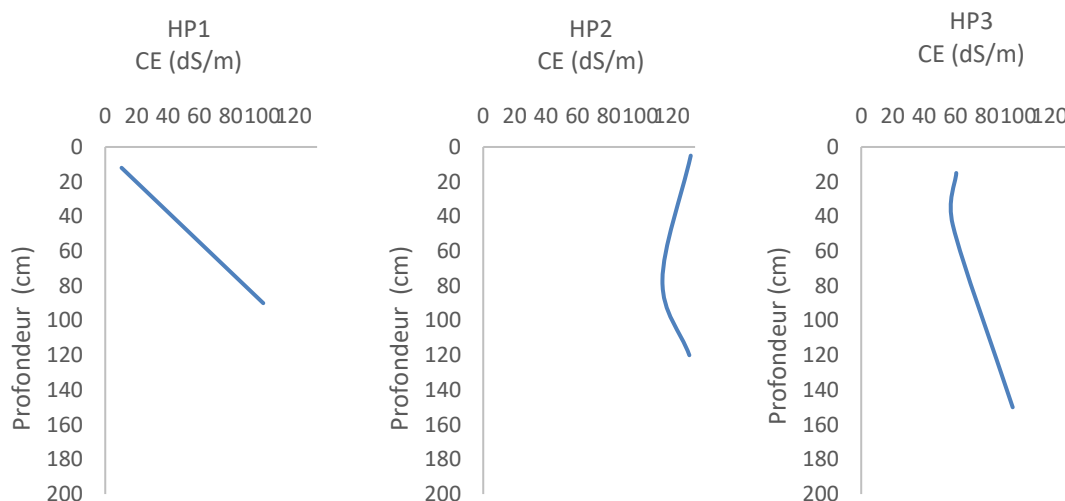
En raison des mouvements verticaux de la solution du sol et de la nappe sous-jacente, il s'établit une distribution de la salinité entre la nappe, qui constitue la source de sel, et la surface du sol. Etudier un profil salin consiste en effet à l'étude des rapports entre la phase solide (minéraux) et la phase liquide ; définit par la nappe et la solution du sol. En réalité ces deux dernières sont en échange constant étant donné que la nappe se trouve à quelques centimètres dans certains profils.

Une vaste littérature explore la surveillance des zones humides salines par le biais de capteurs à distance. Cependant, Li et al. (2013) ont souligné que peu de littérature est disponible sur la variabilité tridimensionnelle des sols, particulièrement en zones humides salines. Ils précisent que ces technologies ne fournissent pas d'informations sur la distribution verticale de la salinité. De plus, elles ne permettent pas de mesurer directement la salinité du sol, car la réponse des capteurs est souvent perturbée par la végétation, les efflorescences, l'humidité du sol ou d'autres facteurs variables. Les techniques d'induction électromagnétique, quant à elles,

présentent des limitations pratiques, notamment dans les zones boueuses où les nappes phréatiques sont peu profondes, comme c'est souvent le cas dans les zones humides (Metternicht et Zinck, 2003 ; Herrero et Castañeda, 2015). D'où la nécessité de réaliser des études de terrain pour avoir une information précise sur les mouvements des sels dans ces milieux particuliers.

5.1. Etude de la distribution verticale de la salinité à Sebket El Hamiet

L'observation des profils salins sur la figure 37 mène à classer ces derniers en trois catégories distinctes. Les profils HP1, HP3, HP4, HP6, HP8, HP9, HP10 et HP11, sont de type descendant correspondant au profil de type D. selon Servant (1975). Ils reflètent une répartition saline caractérisée par une augmentation progressive de la salinité en fonction de la profondeur. Le maximum de salure est à plus d'un mètre. Ces profils sont en voie de désalinisation. La seconde catégorie concerne le profil HP5, qui correspond au profil salin de type B, selon Servant (1975). La distribution saline est au maximum dans l'horizon de moyenne profondeur. Le profil HP2, est de type C ; la distribution saline atteint son maximum dans l'horizon superficiel et en profondeur avec une désalinisation dans l'horizon de subsurface.



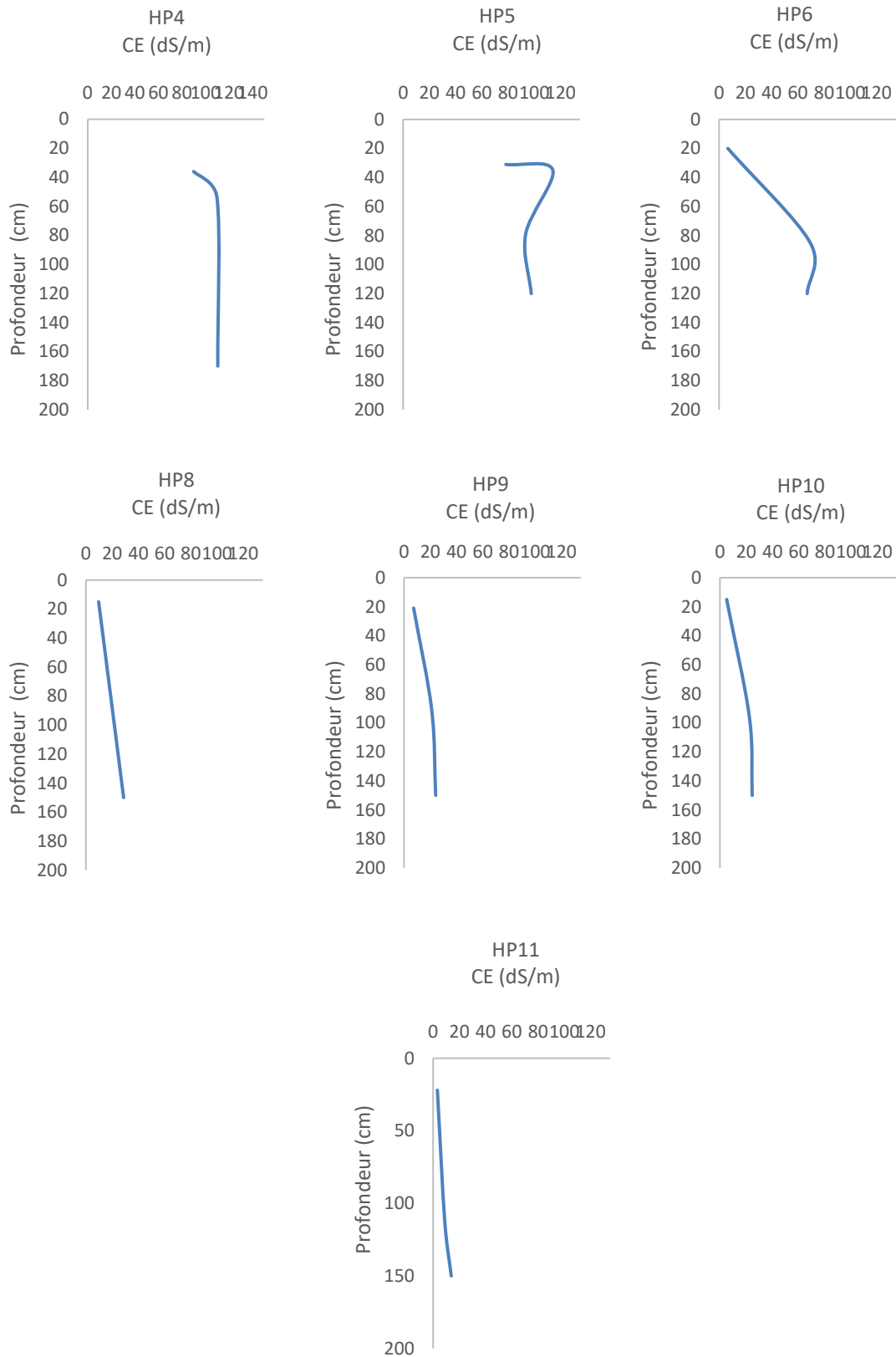
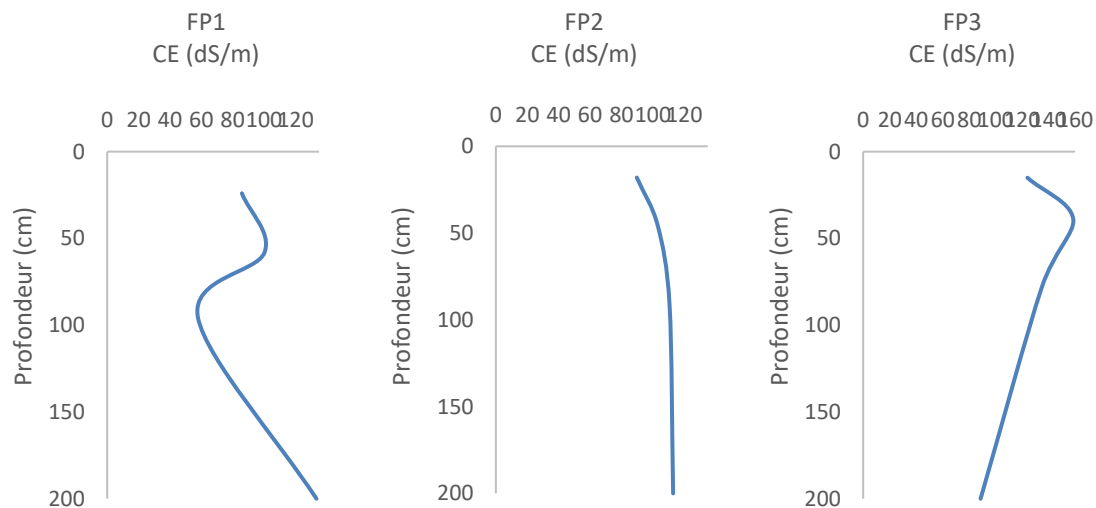


Figure 37. Les profils salins dans la toposéquence de Sebket El Hamiet

5.2. Etude de la distribution verticale de la salinité à Chott El Frain

L'analyse des profils salins de Chott El Frain (Figure 38) permet de les classer en quatre catégories. Les profils FP2, FP6 et FP7 sont de type descendant, correspondant aux profils de type D selon la classification de Servant (1975). Ces profils montrent un gradient de salinité en diminution, indiquant un processus de désalinisation en cours.

La deuxième catégorie regroupe les profils FP3, FP5 et FP8, classés comme de type B selon Servant (1975). Dans ces profils, la concentration saline atteint son maximum en subsurface. Le profil FP4 est de type A, où la salinité atteint son maximum dans l'horizon superficiel. Enfin, le profil FP1 présente une distribution particulière. Il se situe entre les types B et C, avec une couche d'accumulation de sel à environ 60 cm de profondeur, au-dessus d'une zone de désalinisation située vers 90 cm de profondeur.



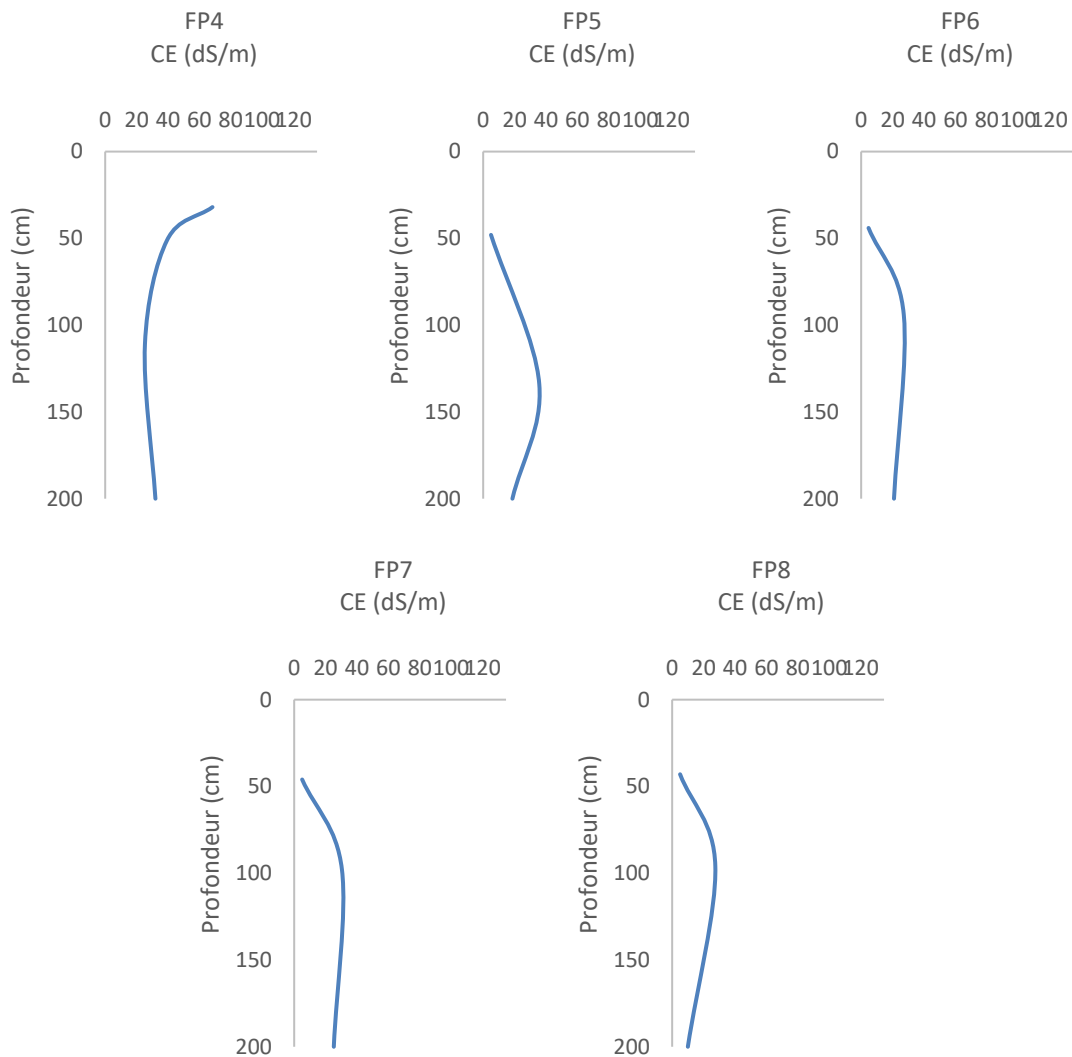


Figure 38. Les profils salins dans la toposéquence de Chott El Frain

5.3. Etude de la distribution verticale de la salinité à Sebket Bazer

Dans Sebket Bazer, les profils salins (Figure 39) peuvent être distingués en trois catégories. BP1, BP4, BP7 et BP8, avec un profil vertical où l'état de salinité est relativement homogène tout au long du profil. Le profil BP2 est de type A ; où la distribution saline atteint son maximum dans l'horizon de surface. Quant aux profils BP3, BP5, et BP6, ils correspondent à un profil de type D, marqué par un gradient de salinité décroissant, ce qui, selon Servant (1975), indiquerait un processus de désalinisation en cours.

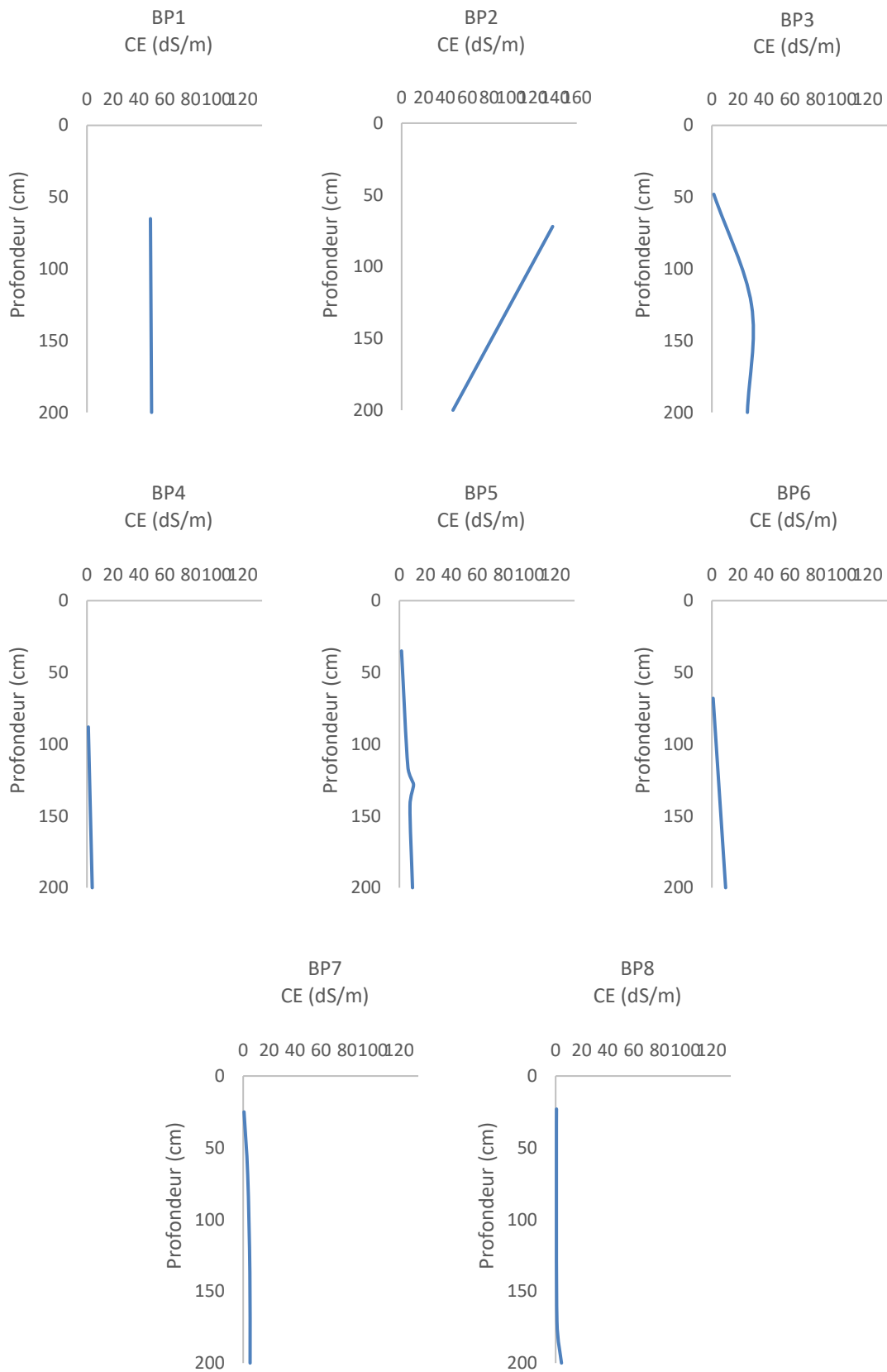
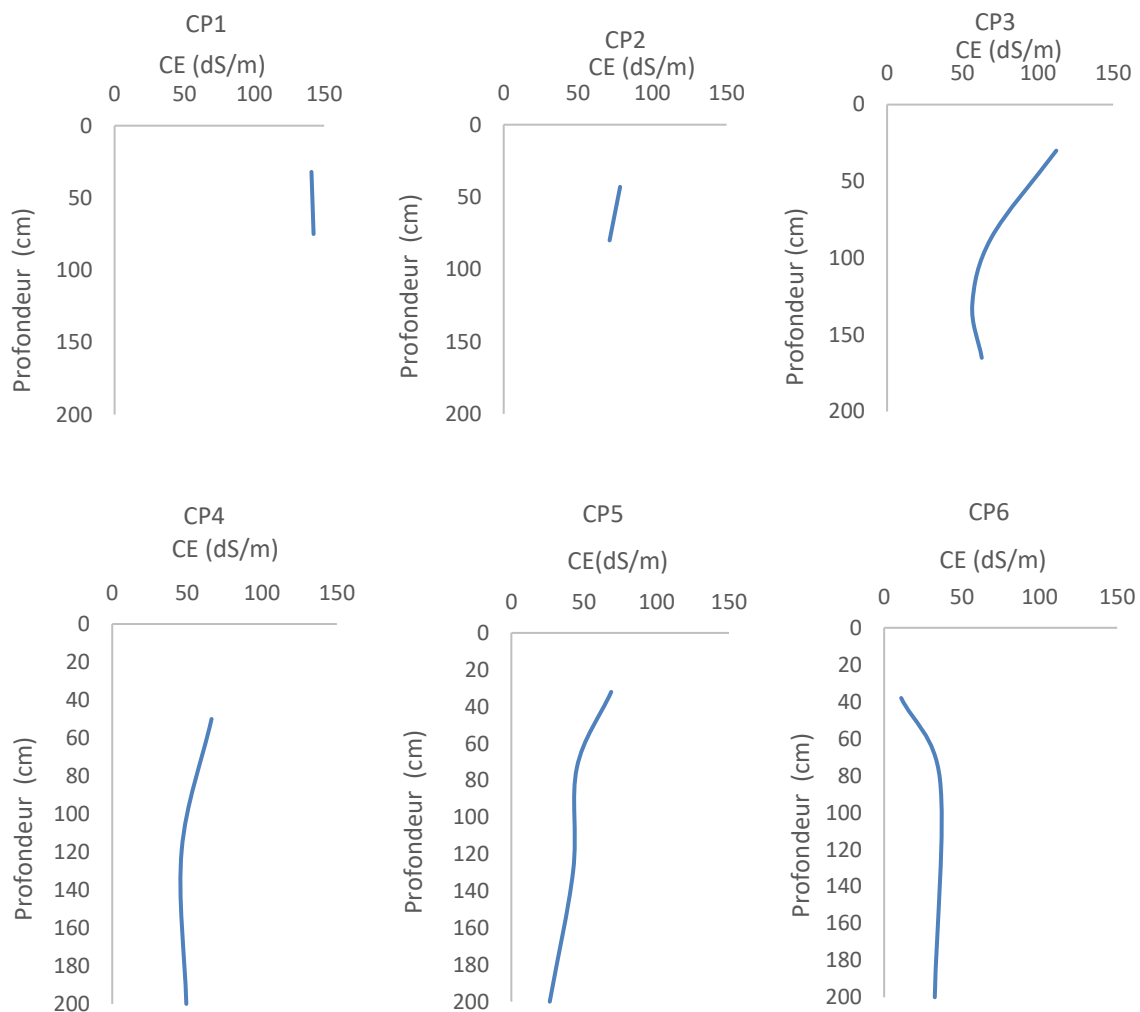


Figure 39. Les profils salins dans la toposequence de Sebkhet Bazer

5.4. Etude de la distribution verticale de la salinité à Chott El Beida

L'étude des profils salins de Chott El Beida (Figure 40) montre que les profils salins CP6, CP7 et CP8 présentent un gradient de salinité décroissant, correspondant aux profils de type D, selon la classification de Servant (1975). En revanche, les profils CP2, CP3, CP4 et CP5 montrent un gradient ascendant, typique des profils de type A, et semblent indiquer un processus de salinisation en cours. Le profil CP1, situé dans la dépression salée, se distingue par une salinité relativement homogène sur toute la profondeur.

Cette répartition spatiale des types de profils salins suggère que les profils les plus éloignés de la dépression pourraient être en phase de désalinisation.



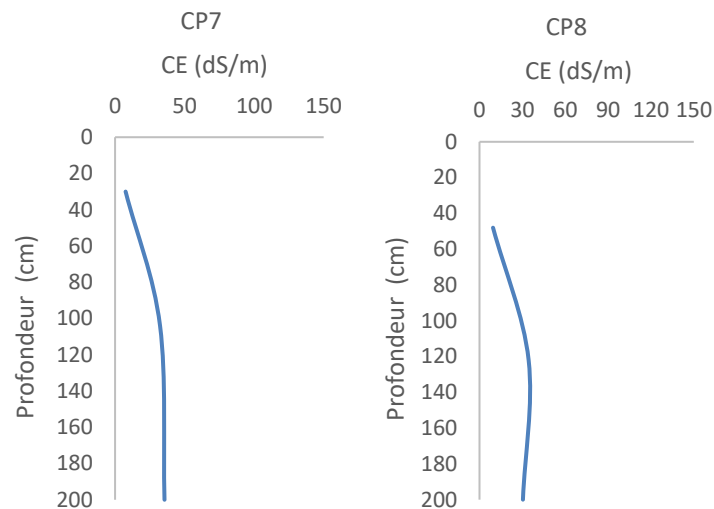


Figure 40. Les profils salins dans la toposéquence de Chott El Beida

- *Discussion*

L'étude de la distribution verticale de la salinité dans les différentes sebkhas révèle que les profils étudiés sont départagés sur les quatre types de profils salins.

Les profils descendants de type D sont caractérisés par une évolution de la salinité avec la profondeur atteignant un maximum à plus d'un mètre, conformément à la classification de Servant (1975). Ces profils sont observés à Sebkhet El Hamiet dans les profils HP1, HP3, HP4, HP6, HP8, HP9, HP10 et HP11, à Chott El Frain dans les profils FP2, FP6 et FP7, à Sebkhet Bazer dans les profils BP3, BP5, BP6. Enfin à Chott El Beida dans les profils CP6, CP7 et CP8. Ces profils montrent un gradient de salinité descendant, suggérant un processus de désalinisation en cours.

Les profils ascendants de type B présentent une concentration saline maximale en subsurface souvent associée à un processus de salinisation. Ce type de profil est observé à Sebkhet El Hamiet dans le profil HP5 à Chott El Frain dans les profils FP3, FP5, FP8 Ces profils indiquent que la salinité est en augmentation avec une concentration maximale de sel en subsurface, généralement à une profondeur moyenne.

Les profils de type A (ascendant, en voie de salinisation) présentent une distribution saline atteignant son maximum à la surface, souvent accompagnée d'un processus de salinisation,

comme le décrit Servant (1975). Ces profils sont observés à Chott El Frain dans le profil FP4, à Sebkhet Bazer dans les profils BP2 et à Chott El Beida dans les profils CP2, CP3, CP4 et CP5.

Profil de type C où la distribution saline atteint son maximum dans l'horizon superficiel et en profondeur avec une désalinisation dans l'horizon de subsurface, ce type de profil est observé à Sebkhet El Hamiet dans le profil HP2.

Profils verticaux homogènes, ces profils présentent une distribution uniforme de la salinité, sans variation significative avec la profondeur. Ces profils sont observés à Sebkhet Bazer dans les profils BP1, BP4, BP7, BP8, et à Chott El Beiba dans le profil CP1. Ils se caractérisent par une salinité relativement homogène sur toute la profondeur du profil.

Enfin, le profil FP1 présente une particularité en se situant entre les types B et C, avec une accumulation de sel à environ 60 cm de profondeur, au-dessus d'une zone de désalinisation vers 90 cm.

La distribution verticale de la salinité des sols étudiés est influencée par plusieurs facteurs. Les conditions météorologiques antérieures, les conditions hydrologiques associées, la situation topographique du profil, les ruissellements des eaux salées en surface (Herrero et Castañeda, 2015). Ces facteurs accentuent l'accumulation des sels à un niveau particulier dans le profil. Les sols situés en position basse, étaient plus fortement influencés par la nappe phréatique saline et souvent inondés par des ruissellements de surface.

Les profils situés au cœur de la dépression des chotts et sebkhas se trouvent en position plus basse par rapport aux autres zones environnantes. En conséquence, ils subissent une influence accrue de la nappe phréatique, souvent saturée en sels. Ces zones basses sont fréquemment inondées par les eaux de ruissellement en provenance des terres situées en amont, notamment lors des épisodes de pluies intenses. Ces ruissellements transportent non seulement des sédiments mais aussi des sels, augmentant ainsi la salinité des sols de la cuvette. Par ailleurs, ces sols étaient souvent inondés par des ruissellements de surface venant des champs supérieurs, qui étaient utilisés pour cultiver du blé, en culture pluviale (Herrero et Castañeda, 2015).

Dans certains cas, l'accumulation de sels à des niveaux spécifiques résulte d'une forte dispersivité et imperméabilité du sol (Qadir et al., 2007). Ces caractéristiques sont directement influencées par la sodicité élevée des couches d'argile présentes dans le matériau parental sédimentaire d'origine quaternaire. La forte concentration en sodium favorise la dispersion des particules d'argile, ce qui provoque une déstabilisation de la structure du sol et réduit sa perméabilité (Stavi et al., 2021). En conséquence, l'eau, plutôt que de s'infiltrer, a tendance à stagner et à s'évaporer à la surface, conduisant à une accumulation progressive de sels. Ce processus est typique des environnements arides et semi-arides, où l'évaporation élevée dépasse souvent les apports d'eau douce, intensifiant ainsi la salinisation des sols dans ces milieux. (Herrero et Castañeda, 2015).

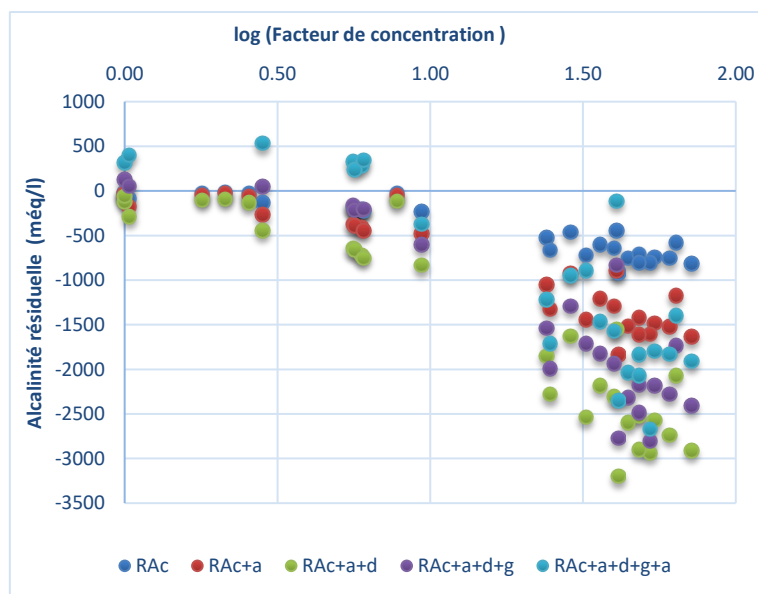
Les zones humides des régions arides et semi-arides sont très exposées à la salinisation. En raison de leur faible élévation, elles accumulent facilement les eaux de surface. La salinisation dans ces zones dépend beaucoup de l'interaction entre les eaux souterraines et les eaux de surface. En période de sécheresse, les eaux souterraines lorsqu'elles sont peu salines peuvent limiter la salinisation en compensant l'eau de surface évaporée, maintenant ainsi une salinité modérée. En revanche, quand les eaux souterraines sont salines et que leur niveau monte, en raison de régulations fluviales, la salinité en surface augmente, ce qui peut entraîner la formation de marais salants ou de zones très salées. Dans les zones où les eaux souterraines sont très profondes, la salinisation sera moins marquée (Jolly et al., 2008 ; Stavi et al., 2017 ; Stavi et al., 2021).

6. L'alcalinité résiduelle et l'alcalinité résiduelle généralisée

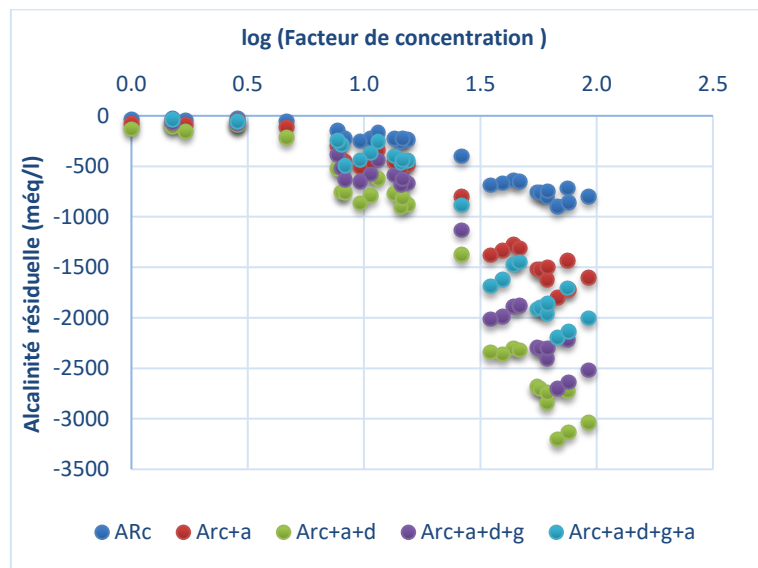
L'alcalinité est définie comme la somme des cations pouvant accepter des protons (Bourrié, 1975). Dans les milieux alcalins, elle peut se réduire à l'alcalinité carbonatée (Valles, 1985), calculée par différence entre les cations et les anions non carbonatés. Cependant, les mécanismes de précipitation et de dissolution des minéraux notamment les carbonatés peuvent entraîner des modifications de l'alcalinité dans la solution du sol. Ce processus se produit lorsque des espèces aqueuses seront soustraites de la solution (en cas de précipitation) ou fournies (en cas de dissolution) (Condom, 2000).

Les calculs des indices de saturation vis-à-vis des minéraux ont révélé un état de sursaturation pour les minéraux suivants : la calcite, l'aragonite, la dolomite, le gypse et l'anhydrite. Afin d'analyser l'évolution de l'alcalinité des solutions du sol suite à la précipitation de ces minéraux, l'alcalinité résiduelle (AR) et l'alcalinité résiduelle généralisée (ARg) (Droubi, 1976) ont été déterminées. L'ARg a été évaluée en tenant compte de la précipitation successive des minéraux mentionnés précédemment.

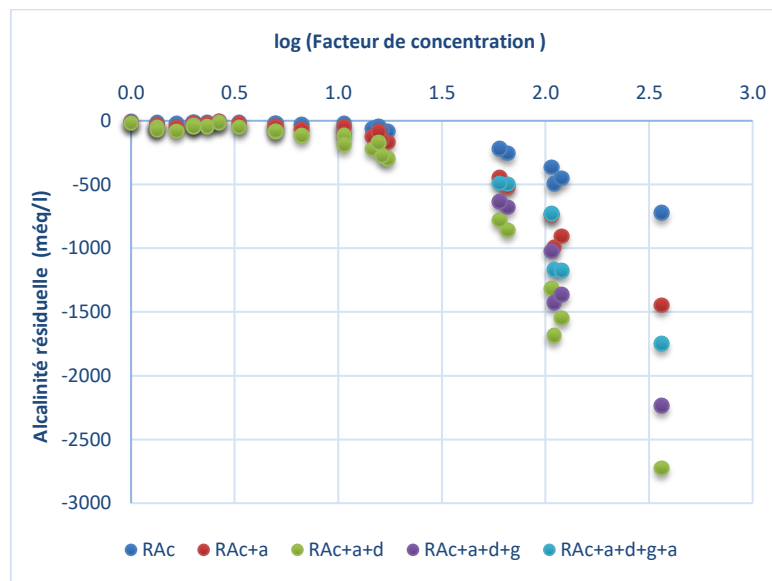
L'alcalinité résiduelle généralisée (ARg), est un concept plus élaboré qui tient compte de la précipitation successive de plusieurs minéraux. Elle est calculée à chaque étape de la précipitation, en soustrayant progressivement les équivalents de cations de l'alcalinité, ou en ajoutant les équivalents d'anions contenus dans la composition du minéral précipité. Chaque étape de précipitation peut soit augmenter, soit diminuer l'alcalinité du sol. Un signe positif ou négatif de l'ARg indique respectivement si le sol évolue vers une voie saline neutre ou alcaline, comme décrit par Cheverry (1974). Autrement dit, une alcalinité négative indique une tendance vers une salinité neutre, tandis qu'une alcalinité positive peut signaler un risque accru de salinisation alcaline, un phénomène particulièrement préoccupant dans les régions arides et semi-aride (Ouamer-Ali et al., 2018 ; Minhas et al., 2021 ; Abdennour et al., 2021).



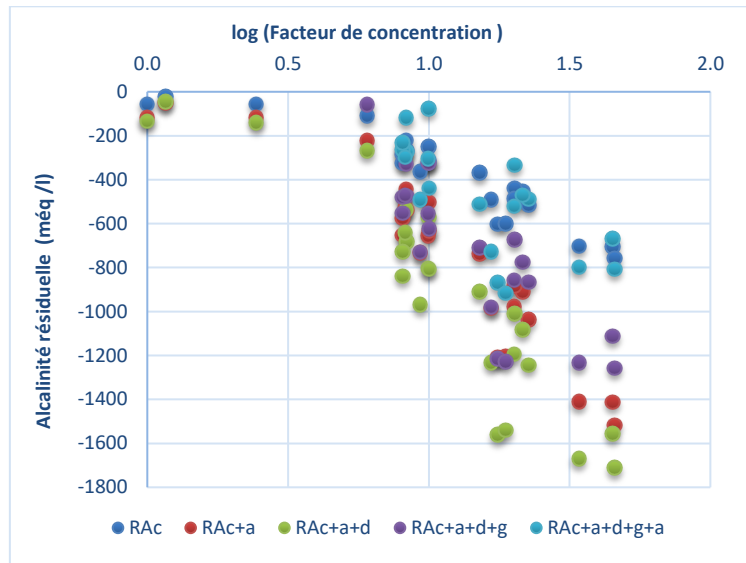
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 41. Évolution de l'alcalinité résiduelle en fonction du facteur de concentration

(ARc : alcalinité résiduelle calcite ; ARc+a : alcalinité résiduelle calcite + aragonite ; ARc+a+d : alcalinité résiduelle calcite + aragonite + dolomite ; ARc+a+d+g : alcalinité résiduelle calcite + aragonite + dolomite + gypse ; ARc+a+d+g+a : alcalinité résiduelle calcite + aragonite + dolomite + gypse + anhydrite)

(a) Sebkheth El Hamiet ; (b) Chott El Frain ; (c) SebkhethBazer ; (d) Chott El Beida

L'étude du comportement de l'alcalinité résiduelle calcite (ARc) dans toutes les sebkhas révèle que dès le début de l'évaporation, les activités des ions CO_3^{2-} et Ca^{++} en solution atteignent rapidement le produit de solubilité de la calcite, provoquant ainsi sa précipitation. L'alcalinité résiduelle calculée est négative dans les solutions de sol les moins concentrées et devient négative dans les solutions les plus concentrées selon la figure 41. La valeur la plus élevée, a été enregistrée à Sebkheth Bazer avec une valeur de -2,24, tandis que la valeur la plus basse, de -916,36, a été observée à Sebkheth El Hamiet.

Toutefois, une $\text{ARc} < 0$, entraîne une diminution continue de l'alcalinité de la solution ainsi que du pH. Cependant, pour maintenir l'équilibre de la calcite, le produit $[\text{Ca}^{++}][\text{CO}_3^{2-}]$ doit rester constant, ce qui implique une augmentation de la concentration en Ca^{++} selon la loi du T. Ces variations sont effectivement observées dans les diagrammes des concentrations (Figures 29, 30, 31 et 32).

Dans cette étude, l'évolution du signe de l'alcalinité résiduelle généralisée (ARg) a été analysée en calculant celle-ci après la précipitation des minéraux confirmée par les tests de saturation à savoir la calcite, l'aragonite, la dolomite, le gypse, et l'anhydrite. De ce fait, à chaque nouvelle précipitation est conforme à la loi de T. Il est important de noter que, parallèlement, les concentrations des éléments qui ne participent à la formation d'aucun minéral continuent d'augmenter de manière régulière.

À Sebkhet El Hamiet (Figure 41 (a)), les valeurs de l'Arg (l'ARc+a, l'ARc+a+d) (Annexe XXXIV), suivent un comportement similaire en fonction du facteur de concentration. L'alcalinité résiduelle est légèrement négative dans les solutions diluées, puis devient nettement négative avec l'augmentation de la concentration.

Il convient de souligner que l'alcalinité résiduelle suit une évolution similaire lors de la précipitation de l'aragonite. Bien que ces deux minéraux calcite et aragonite possèdent la même formule chimique, toutefois ils se forment dans des conditions distinctes.

Lorsque le produit de solubilité de la dolomite est atteint, l'alcalinité résiduelle reste négative, le pH continue de diminuer, et la concentration en ions CO_3^{2-} diminue également. En revanche, les concentrations en calcium et en magnésium augmentent simultanément avec le facteur de concentration.

L'augmentation de la concentration en calcium après la précipitation de la dolomite, ainsi que la présence des sulfates qui n'ont pas participé à la précipitation d'autres minéraux auparavant, conduisent ensuite à la précipitation du gypse. À ce stade, l'alcalinité résiduelle (ARc+a+d+g) change de comportement elle augmente jusqu'à atteindre des valeurs positives. Ce phénomène peut se produire lorsque, au moment où l'équilibre avec le gypse est atteint, la concentration en sulfates est supérieure à celle en calcium. Les résultats de calcul de l'AR peuvent confirmer les hypothèses formulées à partir des diagrammes de concentration. En conséquence, le pH et la concentration en CO_3^{2-} augmentent, tandis que la concentration en calcium diminue et que celle en ions SO_4^{2-} augmente.

Le même comportement se répète lors de la précipitation de l'anhydrite, l'ARc+a+d+g+a est positive et continue à augmenter en fonction du facteur de concentration.

En bref, l'AR_g diminue à chaque étape après la précipitation de la calcite, l'aragonite, puis de la dolomite, indiquant que les solutions diluées suivent la voie saline neutre à faciès chlorurée ou sulfatée tel qu'indiqué par les diagrammes de Piper (Figure 29). Cette situation peut entraîner une détérioration de la structure du sol (Abdennour, 2021). De même, ce type de faciès chimique est néfaste pour la croissance des cultures. En revanche, l'AR_g augmente à nouveau après la précipitation du gypse et devient positive, puis augmente davantage après la précipitation de l'anhydrite. Ce genre de comportement confirme que la solution tend à suivre une voie alcaline.

À Chott El Frain, Sebkhet Bazer et Chott El Beida (Figure 41 (b) (c) (d)), l'alcalinité résiduelle généralisée présente un comportement similaire. Les valeurs de l'AR_{c+a}, l'AR_{c+a+d}, l'AR_{c+a+d+g}, et l'AR_{c+a+d+g+a} (Annexes XXXV, XXXVI et XXXVII), évoluent de manière comparable en fonction du facteur de concentration. Dans les solutions diluées, l'alcalinité résiduelle (AR) est légèrement négative, mais elle devient nettement plus négative à mesure que la concentration de la solution du sol augmente. Toutefois, l'AR diminue progressivement après la précipitation de l'aragonite, puis de la dolomite, ce qui indique que les solutions suivent une voie saline neutre. Par la suite, l'AR augmente de nouveau après la précipitation du gypse, puis augmente davantage après la précipitation de l'anhydrite, tout en maintenant son signe négatif contrairement à Sebkhet El Hamiet. Cette augmentation dans la valeur de l'alcalinité résiduelle généralisée après la précipitation du gypse puis de l'anhydrite, suggère que la solution tend à suivre une voie alcaline si la solution continue à se concentrer.

En fin, la solution initiale présentait une teneur en calcium supérieure à son alcalinité. Avec la concentration de la solution et la cristallisation de la calcite, la teneur en calcium a continué d'augmenter, tandis que l'alcalinité a continué de diminuer. Ainsi, le risque d'alcalinisation est exclu, puisque le calcium est le cation dominant. Le sol a évolué selon une voie saline neutre. Après la précipitation de l'aragonite, de la dolomite, du gypse et de l'anhydrite, l'alcalinité résiduelle généralisée est devenue fortement négative. L'augmentation de la concentration en Ca⁺⁺ due à la dissolution du gypse provoque la précipitation de la calcite (Mohallel et al., 2016 ; Abdennour et al., 2021), ce qui confirme à nouveau l'évolution du sol dans la voie saline neutre. Selon les résultats obtenus par Ouamer-Ali et al. (2018), la précipitation de la calcite dans les zones salées d'un climat méditerranéen aride a empêché l'évolution des sols de manière alcaline (Laoufi et al., 2023).

7. Conclusion

Les résultats de l'investigation géochimique indiquent que la dissolution des sels évaporitiques, tels que la halite, le gypse et l'anhydrite, joue un rôle majeur dans la composition chimique des solutions du sol, dominées par les ions Na^+ , Cl^- et SO_4^{2-} . Les phénomènes de précipitation, notamment la formation de calcite, dolomite, et gypse, influencent fortement les profils salins, qui varient en fonction de la profondeur et des conditions hydrologiques locales.

Les résultats révèlent que la concentration en ions calcium et magnésium varie en fonction des processus de précipitation et d'échange ionique, ce qui contribue à la sodification des sols dans certaines zones. Les profils salins observés, qu'ils soient descendants, ascendants ou homogènes, sont le reflet des interactions entre évaporation, nappes phréatiques salines et ruissellements, avec une influence notable de la topographie et du climat local. L'augmentation de l'alcalinité résiduelle après la précipitation du gypse et de l'anhydrite, et l'évolution des concentrations en calcium et sulfate, suggèrent une tendance de la solution à suivre une voie alcaline en conditions de concentration accrue.

Conclusion générale

Conclusion générale

La présente investigation permet de mieux appréhender le rôle de la salinité des sols dans les milieux humides. Elle ouvre la voie à une gestion améliorée des milieux salins protégés. De même, elles constituent également un socle précieux pour adapter les pratiques agricoles et renforcer l'aménagement du territoire, contribuant ainsi à une exploitation durable des ressources naturelles et à la préservation des zones humides.

La présente étude repose sur trois principaux objectifs :

D'une part, réaliser une caractérisation pédologique détaillée des toposéquences de quatre zones humides de l'éco-complexe Sud-Sétifien, à savoir Sebket El Hamiet, Chott El Frain, Sebket Bazer et Chott El Beida, dont trois ont une importance internationale selon la convention de Ramsar. Cette analyse offrira une description détaillée des caractéristiques spécifiques de ces sols ;

D'autre part, identifier la variabilité de la salinité de manière quantitative et qualitative, en analysant sa répartition horizontale dans le paysage et verticale en fonction de la profondeur du sol par des profils salins ;

De plus, effectuer une analyse géochimique détaillée de la salinité des sols dans ces quatre zones humides, en déterminant les faciès géochimiques dominants, les niveaux de saturation des minéraux susceptibles de précipiter et en identifiant les voies géochimiques de la salinisation à l'aide du modèle d'équilibre géochimique PhreeqC.

Les principaux résultats obtenus dans cette étude se résument comme suit :

L'étude descriptive des 34 profils pédologiques appartenant à Sebket El Hamiet, Chott El Frain, Sebket Bazer et Chott El Beida révèle la présence d'une texture relativement fine, et une structure allant de particulière à massive, avec une porosité de taille généralement moyenne, selon le profil et l'horizon considéré. De même, les profils sont partout calcaires avec une présence de taches d'oxydo-réduction, mettent en évidence les conditions d'humidité particulières. Ces caractéristiques constituent les principaux traits morphologiques de ces sols salés de l'éco-complexe Sud-Sétifien.

Conclusion générale

Les analyses physico-chimiques révèlent que les sols sont caractérisés par des textures argileuses et des teneurs élevées en calcaire, avec un pH allant de neutre à alcalin. La salinité est marquée et varie horizontalement et verticalement en fonction des profils pédologiques. Une analyse en composantes principales montre que la dissolution de minéraux évaporitiques (gypse, halite, anhydrite) et la précipitation des phases carbonatées sont les principaux processus géochimiques influençant la composition chimique des solutions du sol. Ces processus sont étroitement liés aux conditions climatiques, en particulier à l'évaporation.

Les profils salins révèlent une salinité plus élevée au centre des sebkhas et une moindre concentration ionique en périphérie. Les analyses ont montré des variations significatives de la conductivité électrique (CE) dans trois des quatre sites, ce qui reflète une hétérogénéité des conditions géochimiques. À Chott El Frain, les variations de CE sont aléatoires, sans schéma clair. Les faciès chimiques des solutions du sol sont dominés par les ions sodium et chlorure, avec une prédominance des minéraux évaporitiques comme la halite. La précipitation des minéraux calcaires comme la calcite et la dolomite est également observée, en particulier dans les horizons de subsurface.

Les ions calcium et sodium montrent des interactions complexes avec les minéraux argileux, avec des variations de leur concentration en fonction des processus de précipitation. Les tests de saturation ont révélé que les minéraux carbonatés peuvent précipiter dans ces sols, tandis que les minéraux sulfurés, comme le gypse et l'anhydrite, restent sous-saturés. Cette dynamique de dissolution et de précipitation est renforcée par l'aridité des conditions climatiques.

Les profils pédologiques analysés montrent des variations dans la distribution verticale de la salinité. À Sebkhet El Hamiet, Sebkhet Bazer et Chott El Beida, la salinité augmente généralement avec la profondeur, atteignant un maximum sous un mètre, notamment dans les zones influencées par la nappe phréatique saline. En revanche, à Chott El Frain, des profils ascendants montrent une concentration maximale de sel en surface, liée à l'évaporation directe de l'eau en surface. À Sebkhet El Hamiet, des profils de type C montrent des zones de salinisation et de désalinisation concomitantes, avec une concentration maximale de sel à la fois en surface et en profondeur.

L'étude du comportement de l'alcalinité résiduelle calcite (ARc) dans les sebkhas montre que cette dernière est négative dans les solutions les moins concentrées et devient de plus en plus

Conclusion générale

négligable à mesure que la concentration augmente, réduisant l'alcalinité et le pH. Pour maintenir l'équilibre de la calcite, la concentration en Ca^{++} augmente.

Dans toutes les sebkhas étudiées, l'évolution de l'alcalinité résiduelle (ARg) suit un comportement similaire, avec des valeurs légèrement négatives dans les solutions diluées et devenant plus négatives avec l'augmentation de la concentration de la solution du sol. Après la précipitation de la dolomite, l'augmentation du calcium et la présence de sulfates entraînent la précipitation du gypse. À ce stade, l'ARg change de comportement et tend à augmenter.

Le même processus s'applique lors de la précipitation de l'anhydrite, où l'ARg continue d'augmenter.

Des différences locales sont observées dans les sebkhas de Chott El Frain, Sebket Bazer et Chott El Beida, où l'ARg après la précipitation du gypse et de l'anhydrite augmente mais en conservant son signe négatif, contrairement à Sebket El Hamiet où elle augmente jusqu'à atteindre des valeurs positives.

L'évolution de l'ARg indique que les solutions diluées suivent une voie saline neutre, dominée par le chlorure ou le sulfate. Cependant, après la précipitation du gypse et de l'anhydrite, l'ARg augmente, suggérant une tendance vers une voie alcaline. Ceci peut entraîner une dégradation des sols.

Enfin, cette étude approfondie des sols des sebkhas des hauts plateaux de l'est algérien offre d'abord des données sur le sol qui peuvent servir de base pour des études ultérieures. Elle fournit des informations sur les mécanismes de salinisation et la géochimie des sols dans ces environnements semi-arides. Les résultats peuvent aider à la gestion de la salinité dans ces zones sensibles et à la lutte contre la dégradation des sols.

En guise de perspectives, les résultats de cette étude peuvent servir non seulement dans le domaine de la conservation écologique et de la gestion des zones humides, mais également dans la lutte contre la dégradation des sols en zones arides. En identifiant les causes et les impacts de la salinisation des sols dans ces écosystèmes sensibles, cette recherche pourrait guider le développement de stratégies pour préserver les ressources pédologiques. Par ailleurs, les connaissances acquises pourraient être étendues à des applications pratiques en agriculture et en aménagement du territoire dans les régions arides, où la gestion de la salinité des sols

Conclusion générale

constitue un enjeu majeur. Ils pourraient également servir de base pour le développement de modèles prédictifs visant à évaluer l'impact futur du changement climatique sur ces écosystèmes.

La connaissance des caractéristiques pédologiques et géochimiques de ces zones humides est importante pour évaluer les risques et les vulnérabilités de cet environnement. Ce travail permettra de mieux comprendre la fonction de la salinité dans l'Eco-complexe Sud-Sétifien, ce qui apportera un soutien réel à d'autres disciplines telles que l'hydrologie, l'hydrogéologie et l'écologie.

***Références
bibliographiques***

Références bibliographiques

- Abdelhafid, Y., Rechachi, M. Z., & Halitim, A. (2019). Caractérisation géochimique des eaux d'irrigation de la palmeraie d'Oumache (oasis des Ziban, sud-est de l'Algérie). *Revue des sciences de l'eau*, 32(1), 69-81.
- Abdenmour, M. A., Douaoui, A., Barrena, J., Pulido, M., Bradai, A., Bennacer, A., Piccini, C., & Alfonso-Torreno, A. (2021). Geochemical characterization of the salinity of irrigated soils in arid regions (Biskra, SE Algeria). *Acta Geochimica*, 40(2), 234–250. <https://doi.org/10.1007/s11631-020-00426-2>
- Abdenmour MA, Douaoui A, Bradai A, Bennacer A, Pulido Fernández M. 2019b. Application of kriging techniques for assessing the salinity of irrigated soils : the case of El Ghrousperimeter, Biskra, Algeria. *Span J Soil Sci* 9:105–124. <https://doi.org/10.3232/SJSS.2019.V9.N2.04>
- Abrid, D. (2015). Caractérisation physico-chimique, minéralogique et géochimique des sédiments de la retenue du barrage Sidi Chahed et des sols du bassin versant de l'Oued Mikkés (Thèse de doctorat, Université Moulay Ismail, Maroc). 233.
- Adrover, M., Moya, G., & Vadell, J. (2017). Seasonal and depth variation of soil chemical and biological properties in alfalfa crops irrigated with treated wastewater and saline groundwater. *Geoderma*, 286, 54–63. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.10.024>
- Ait Mechedal, M., Laoufi, H., Ouamer-ali, K. K., Djili, Y., Daoud, Y., & Sims, D. B. (2024). Studying the influence of soil characteristics on selenium distribution in Bas-Chelif soils, Algeria, and predicting speciation patterns. *Geochemistry International*, 62(9), 897–907. <https://doi.org/10.1134/S0016702924700460>
- Ait Mechedal, M., Ouamer-Ali, K., Djili, K., & Daoud, Y. (2018). Determination of total selenium content in salty soils in Lower Cheliff (Algeria). *Nature Environment and Pollution Technology*, 17(3), 877–882.
- Ait Mechedal, M., Ouamer-ali, K., & Daoud, Y. (2017). Evaluation du statut potassique des sols salés du Bas-Cheliff. *Revue Nature et Technologie*, 9(1), 08-13.

- Alexandre, C., Borralho, T., & Durão, A. (2018). Evaluation of salinization and sodification in irrigated areas with limited soil data: Case study in southern Portugal. *Spanish Journal of Soil Science*, 8(1), 102-120. <https://doi.org/10.3232/SJSS.2018.V8.N1.07>
- Al-Homidy, A., Dahim, M., & Abd Al Aal, A. (2017). Improvement of geotechnical properties of sabkha soil utilizing cement kiln dust. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9(4). <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.11.012>
- Aliat, T. (2017). Les écosystèmes humides des hautes plaines orientales algériennes (Thèse de doctorat, Université de Sétif). 121 p.
- Andersen, M. S., Nyvang, V., Jakobsen, R., & Postma, D. (2005). Geochemical processes and solute transport at the seawater/freshwater interface of a sandy aquifer. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(16), 3979-3994. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2005.03.017>
- Annani, F. (2013). Essai de biotypologie des zones humides du constantinois [Doctoral dissertation, Université Badji Mokhtar d'Annaba]. 150 p.
- Aragüés Lafarga, R., Medina Pueyo, E. T., Zribi, W., Clavería Laborda, I., Álvaro Fuentes, J., & Faci González, J. M. (2014). Soil salinization as a threat to the sustainability of deficit irrigation under present and expected climate change scenarios.
- Askri, B., Ahmed, A. T., Al-Shanfari, R. A., Bouhlila, R., & Al-Farsi, K. B. (2016). Isotopic and geochemical identifications of groundwater salinization processes in Salalah coastal plain, Sultanate of Oman. *Chemie der Erde*, 76, 243–255.
- Askri, B., & Al-Shanfari, R. A. (2017). Assessment of hydro-chemical processes inducing groundwater salinisation in coastal regions: Case study of the Salalah Plain, Sultanate of Oman. In O. Abdalla, A. Kacimov, M. Chen, A. Al-Maktoumi, T. Al-Hosni, & I. Clark (Eds.), *Water resources in arid areas: The way forward* (pp. 351–368). Springer, Berlin.
- Aubert, G. (1976). Les sols sodiques en Afrique du Nord. *Annales INA*, Alger, 6(1), 185-195.
- Aubert, G. (1983). Observations sur les caractéristiques, la dénomination et la classification des sols salés ou salsodiques. *Cahier ORSTOM, Série Pédologie*, XX (1), 73–78.

- Avrahamov, N., Antler, G., Yechieli, Y., Gavrieli, I., Joye, S. B., Saxton, M., Turchyn, A. V., & Sivan, O. (2014). Anaerobic oxidation of methane by sulfate in hypersaline groundwater of the Dead Sea aquifer. *Geobiology*, 12(6), 511-528. <https://doi.org/10.1111/gbi.12095>
- Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1985). Water quality for agriculture. Irrigation Drainage Paper 29, Rev. 1. Food and Agriculture Organisation, Rome, p. 174.
- Ayadi, I., Habib, H., & D., Y. (2008, September 4). XIIIth World Water Congress. Montpellier, France: International Water Resources Association.
- Baaziz, N. (2012). Statut et écologie de l'avifaune aquatique de la sebkha de Bazer-Sakra (El Eulma, Sétif) : Phénologie et distribution spatio-temporelle (Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba). 82 p.
- Baaziz, N., Mayache, B., Saheb, M., Bensaci, E., Ounissi, M., Metallaoui, S., & Houamdi, M. (2011). Statut phénologique et reproduction des peuplements d'oiseaux d'eau dans l'éco-complexe de zones humides de Sétif (Hauts plateaux, Est de l'Algérie). *Bulletin de l'Institut Scientifique de Rabat*, 32(2), 77-87.
- Bahir, M., Ouhamdouch, S., & Carreira, P. M. (2018). Geochemical and isotopic approach to decrypt the groundwater salinization origin of coastal aquifers from semi-arid areas (Essaouira basin, Western Morocco). *Environmental Earth Sciences*, 77(19). <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7663-4>
- Balla, A. (2012). Synthèse écologique sur les zones humides algériennes d'importance internationale "Sites Ramsar" [Master's thesis, University of Batna, Algeria].
- Barbiero, L. (1994). Les sols alcalinisés sur socle dans la vallée du fleuve Niger, origines de l'alcalinisation et évolution des sols sous irrigation [Doctoral dissertation, École nationale supérieure agronomique de Rennes].
- Barkat, B., & Abed-Meraim, K. (2004). Algorithms for blind components separation and extraction from the time-frequency distribution of their mixture. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2004, 1-9.
- Barzanji, A. F. (1973). Gypsiferous soils of Iraq (Ph. D. Thesis). University of Gent, 199 p.

- Bates, B. C., Kundzewicz, Z. W., Wu, S., & Palutikof, J. P. (2008). Le changement climatique et l'eau. Document technique publié par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Secrétariat du GIEC, Genève, éd.
- Belagoune, F., & Boutoutaou, D. (2013). Hydrological Study of Watersheds Arid and Semi-Arid South-Eastern Algeria (Chott Melghir, Chott El Hodna and Highlands Constantine). *International Journal of Geosciences*, 4(10), Article 410145. <https://doi.org/10.4236/ijg.2013.410145>
- Benabadji, N. (1999). Physionomie, organisation et composition floristique des Atrilexaies au Sud de Tlemcen (Chott El-Gharbi), Algérie. *Journal International Atriplex in-Vivo*, No. 8, Université Paris Orsay, 1-9.
- Benaradj, A., Boucherit, H., & Mederdel, K. (2013). Remontée biologique de la steppe à *Stippa tenacissima* L. après une mise en défens dans la station de Noufikha (Naama-Algérie). *Annales de L'INRGREF*, 18, numéro spécial, 107-121.
- Bensaci, E. (2011). Eco-éthologie du flamant rose *Phoenicopterus roseus* dans la Vallée de Oued Righ (Sahara oriental algérien). Université du 08 mai 1945, Guelma. 183 p.
- Bertraneu, J., & Cruys, H. (1955). Contributions à l'étude géologique des monts du Hodna. I. Le massif du Bou Taleb par J. Bertraneu, II. La région de Tocqueville et de Bordj-R'Dir par H. Cruys.
- Besser, H., Mokadem, N., Redhouania, B., Rhimi, N., Khlifi, F., Ayadi, Y., Omar, Z., Bouajila, A., & Hamed, Y. (2017). GIS-based evaluation of groundwater quality and estimation of soil salinization and land degradation risks in an arid Mediterranean site (SW Tunisia). *Arabian Journal of Geosciences*, 10, 350. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3148-0>
- Blackmore, A. V., & Miller, R. D. (1961). Tactoid size and osmotic swelling in calcium montmorillonite. *Soil Science Society of America Journal*, 25(3), 169-173.
- Boivin, P., De Pury, P., & Vedy, J. C. (1995). Alcalinisation des sols irrigués dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal : Diagnostique par évaluation du stock de carbonates. Travail pratique de diplôme, École polytechnique fédérale de Lausanne, Suisse.

- Boudoukha, A. (1988). Étude hydrogéologique et modélisation du système aquifère ferme d'El Eulma-Ain Lahdjar (Région est de Sétif-Algérie) (Doctoral dissertation). Université de Besançon.
- Boudoukha, A. (1998). Hydrogéologie des hautes plaines sétifiennes (qualité chimique).
- Boumezbour, A. (2004). Atlas des zones humides algériennes. Direction générale des forêts.
- Bourrié, G. (1976). Relation entre le pH, l'alcalinité et les équilibres de CO₂ dans les eaux naturelles. *Sciences du sol*, 3, 145-159.
- Bouterraa, O., Mebarki, A., Bouaicha, F., Nouaceur, Z., & Laignel, B. (2019). Groundwater quality assessment using multivariate analysis, geostatistical modeling, and water quality index (WQI): a case study in the Boumerzoug-El Khroub valley of Northeast Algeria. *Acta Geochimica*, 38, 796–814.
- Bowler, J. M. (1976). Aridity in Australia: age, origins and expression in aeolian landforms and sediments. *Earth-science reviews*, 12(2-3), 279-310.
- Bradai, A., & Douaoui, A. (2013). Evolution géochimique de la solution des sols irrigués par les eaux à alcalinité résiduelle positive en conditions contrôlées. Application au Bas-Chélif. *Nature et Technologie*, 8, 27–32.
- Brander, L. M., Raymond, J. G., Florax, M., & Vermaat, J. E. (2006). The empirics of wetland valuation: A comprehensive summary and a meta-analysis of the literature. *Environmental Resource Economics*, 33, 223–250.
- Brinis, N., Boudoukha, A., & Hamel, A. A. (2015). Analyse statistique et géochimique de la dynamique des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines du synclinal de Ghassira Algérie orientale. *Larhyss Journal*, 22, 123-137.
- Britton, R. H., & Crivelli, A. J. (1993). Wetlands of southern Europe and North Africa: Mediterranean wetlands. In D. F. Whigham, D. Dykyjova, & S. Hejny (Eds.), *Wetlands of the World: Inventory, Ecology, and Management* (pp. 129–194). Springer, Netherlands.
- Bui, E. N. (2013). Soil salinity: A neglected factor in plant ecology and biogeography. *Journal of Arid Environments*, 92, 14–25. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2012.12.014>

- Bui, E. N. (2017). Causes of soil salinization, sodification, and alkalization. In Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780199389414.013.264>
- Caire, A. (1957). Étude géologique de la chaîne des Biban (Bulletin, Service de la carte géologique d'Algérie, Nouvelle série, numéro 16, 2 tomes).
- Caruso, A., Pierre, C., Blanc-Valleron, M. M., & Rouchy, J. M. (2015). Carbonate deposition and diagenesis in evaporitic environments: The evaporative and sulphur-bearing limestones during the settlement of the Messinian salinity crisis in Sicily and Calabria. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 429, 136–162. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2015.03.035>
- Cary, L., Petelet-Giraud, E., Bertrand, G., Kloppmann, W., Aquilina, L., Martins, V., Hirata, R., Montenegro, S., Pauwels, H., Chatton, E., Franzen, M., & Aurouet, A. (2015). Origins and processes of groundwater salinization in the urban coastal aquifers of Recife (Pernambuco, Brazil): A multi-isotope approach. *Science of the Total Environment*, 530–531, 411–429. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.015>
- Casby-Horton, S., Herrero, J., & Rolong, N. A. (2015). Gypsum soils—Their morphology, classification, function, and landscapes. *Advances in Agronomy*, 130, 231-290.
- Cassel, F., Goorahoo, D. & Sharmasarkar, S. Salinization and Yield Potential of a Salt-Laden Californian Soil: an In Situ Geophysical Analysis. *Water Air Soil Pollut* 226, 422 (2015). <https://doi.org/10.1007/s11270-015-2682-1>
- Chenaker, H., Houha, H., & Vallès, V. (2018). Hydrogeochemistry and geothermometry of thermal water from north-eastern Algeria. *Geothermics*, 75, 137-145. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.04.009>
- 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 de doctorat, Université Louis Pasteur Strasbourg, 175 p.)
- Chi, Y., Zheng, W., Shi, H., Sun, J., & Fu, Z. (2018). Spatial heterogeneity of estuarine wetland ecosystem health influenced by complex natural and anthropogenic factors. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.085>

- Chhabra, R. (2005). Classification of salt-affected soils. *Arid Land Research and Management*, 19, 61–79.
- Chown, E. H., Daigneault, R., Mueller, W., & Mortensen, J. K. (1992). Tectonic evolution of the northern volcanic zone, Abitibi belt, Quebec. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 29(10), 2211–2225.
- Clément, B. (2010). Les zones humides intérieures de Bretagne : intérêts, évolution, enjeux de leur protection. In Colloque « La biodiversité des milieux aquatiques de Bretagne » (pp. 37-41). Guingamp : Eau & Rivières de Bretagne.
- Coleman, M. (2000). Review and discussion on the evaporation rate of brines. *Actis Environmental Services*, 12.
- Condom, N. (2000). Analyse et modélisation couplée des processus hydro-géochimiques de la salinisation des sols : Application aux sols rizicoles irrigués de l'Office du Niger (Mali) (Thèse de doctorat). ENA Montpellier.
- Cook, B. I., Smerdon, J. E., Seager, R., & Coats, S. (2014). Global warming and 21st century drying. *Climate Dynamics*, 43(9–10), 2607–2627. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2075-y>
- Coque, R., Tricat, J., & Cailleux, A. (1972). Le modèle des régions sèches, traité de géomorphologie. *Annales de Géographie*, 81, 734-740.
- Daliakopoulos, G. I. N., Tsanis, I. K., Koutroulis, A., Kourgialas, N. N., Varouchakis, A. E., Karatzas, G. P., & Ritsema, C. J. (2016). The threat of soil salinity: A European scale review. *Science of the Total Environment*, 573, 727–739. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.177>
- Daoud, Y., & Halitim, A. (1994). Irrigation et salinisation au Sahara algérien. *Sécheresse*, 3(5), 151-160.
- De Groot, R., Brander, L., Van der Ploeg, S., Costanza, R., Bernard, F., Braat, L., Christie, M., Crossman, N., Ghermandi, A., Hein, L., Hussain, S., Kumar, P., McVittie, A., Portela, R., -Rodriguez L.C., Brink P.T. & Van Beukering, P. (2012). Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. *Ecosystem services*, 1(1), 50-61.

- Deleau, P., & Laffitte, R. (1951). Carte géologique du Nord-Est Algérien, échelle 1/500 000 (Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba). Service de la Carte Géologique de l'Algérie des eaux souterraines. 186 p.
- Demnati, F., Boubaker, Z., Allache, F., & Ernoul, L. (2020). Ecosystem services in salt lakes: An ethnobotanic case study of halophytes from Algeria. *Ecologia mediterranea*, 46(2), 35-46.
- Deng, Y. M., Wang, Y. X., & Ma, T. (2009). Isotope and minor element geochemistry of high arsenic groundwater from Hangjinhouqi, the Hetao Plain, Inner Mongolia. *Applied Geochemistry*, 24, 587–599. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2008.12.018>
- Department of Natural Resources (DNR). (1997). Salinity management handbook. Brisbane, Australia.
- Deutsch, W. J., & Siegel, R. (1997). Groundwater geochemistry: Fundamentals and applications to contamination (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003069942>
- D.G.F. (2004). Atlas des zones humides algériennes d'importance internationales. Alger : D.G.F. édition.
- Djamai, R. (2007). Contribution à l'étude de la salinité des sols et des eaux du système endoréique du lac Fetzara (Nord-est algérien). Approche géochimique et évolution spatiotemporelle des phénomènes (Thèse de doctorat d'état, INA Alger). 167 p.
- Djamai, R., Fadel, D., Laifa, A., Benslama, M., Daoud, Y., & Vallès, V. (2011). Le concept d'alcalinité résiduelle et évolution géochimique des processus. Application aux sols salés du lac Fetzara (Nord-Est algérien). *Synthèse Revue des Sciences et Technologies*, 23, 90–98.
- Djemmal, S. (2018). Étude des sources thermominérales de la région de Sétif dans leur contexte structural (Est Algérien) (Thèse de doctorat, Université Batna 2). 153 p.
- Djenba, S. (2015). Influence des paramètres géologique, géomorphologique et hydrogéologique sur le comportement mécanique des sols de la wilaya de Sétif, Algérie (Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider - Biskra).
- Djili, K., & Daoud, Y. (2000). Influence des hauteurs des précipitations sur la répartition du calcaire et du pourcentage de sodium échangeable dans les sols du Nord de l'Algérie. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 11(1), 37-43.

- Djili, K., & Daoud, Y. (1999). Relation entre le pH et la teneur en carbonate de calcium des sols : Cas des sols du Nord Algérien. *Agrochimica*, XLIII (3–4), 173–177.
- Djili, K., Daoud, Y., & Ayache, N. (1999). Analyse de la distribution du calcaire dans l'Algérie septentrionale. *EGS*, 6(3), 201–213.
- Dogramaci, S., Skrzypek, G., Dodson, W., & Grierson, P. F. (2012). Stable isotope and hydrochemical evolution of groundwater in the semi-arid Hamersley Basin of subtropical northwest Australia. *Journal of Hydrology*, 475, 281-293. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.10.004>
- Domínguez-Beisiegel, M., Castañeda, C., & Herrero, J. (2013). Two microenvironments at the soil surface of saline wetlands in Monegros, Spain. *Soil Science Society of America Journal*, 77(2), 653-663. <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0014>
- Donaire, J. J. S. (2000). Descriptive and functional wetland typology and classification. *Observatorio medioambiental*, (3), 311-340.
- Douaoui, A. (2005). Variabilité Spatiale de la salinité et sa relation avec certaines caractéristiques des sols de la plaine du Bas-Chéiff (Doctoral dissertation, INA).
- Douaoui, A., Gascuel-Odoux, C., & Walter, C. (2004). Infiltrabilité et érodibilité de sols salinisés de la plaine du Bas Chéiff (Algérie). *Mesures au laboratoire sous simulation de pluie*. *EGS*, 11(4), 379–392.
- Dresch, J. (1954). Mouvements du sol quaternaire au Maghreb Oriental. *Annales de Géographie*, 63, 61-62.
- Driessen, P., Deckers, J., Spaargaren, O., & Nachtergaele, F. (2001). Lecture notes on the major soils of the world. Rome: Food and Agriculture Organization. Available at: <http://www.fao.org/3/y1899e/y1899e.pdf>
- Droubi, A. (1976). Géochimie des sols et des solutions concentrées par évaporation. Modèle thermodynamique de simulation. Application aux sols salés du Tchad (Mémoire des Sciences Géologiques, n° 46, 177 p.)
- Dubost, D. (2002). Ecologie, aménagement et développement agricole des oasis algériennes. Biskra : C.R.S.T.R.A. édition.

- Dupuis, M. (1969). Dosage des carbonates dans les fractions granulométriques de quelques sols calcaires et dolomitiques. *Annales Agronomiques*, 20, 61-68.
- Durand, P., Gascuel-Oudou, C., Kao, C., & Merot, P. (2000). Une typologie hydrologique des petites zones humides ripariennes. *Etude et gestion des sols*, 7(3), 207-218. INRA, CEMAGREF.
- Durand, J. H. (1983). *Les sols irrigables*. Agence de coopération culturelle et technique. P.U. France, 190 p.
- Durand-Delga, M. (1969). Mise au point sur la structure du Nord-Est de la Berbérie. *Publications du Service Géologique d'Algérie*, n° 39, 89-131.
- Eaton, F. M. (1950). Significance of carbonates in irrigation waters. *Soil Science*, 69, 123-133.
- Egbueri, J. C. (2019). Evaluation and characterization of the groundwater quality and hydrogeochemistry of Ogbaru farming district in southeastern Nigeria. *SN Applied Sciences*, 1(8), 851. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0853-1>
- Favre, F. (2000). *Interactions entre oxydoreduction et dynamiques salines dans un vertisol irrigué par submersion* (Thèse de doctorat, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, n° 2132).
- Fitzpatrick, R. W., Boucher, S. C., Naidu, R., & Fritsch, E. (1994). Environmental consequences of soil sodicity. *Soil Research*, 32(5), 1069–1093.
- Frenkel, H. (1984). Reassessment of water quality criteria for irrigation. In I. Shainberg & J. Shalhevet (Eds.), *Soil salinity under irrigation: Process and management* (pp. 298–318). Springer.
- Garrels, R. M., & Christ, C. L. (1967). *Équilibres des minéraux et de leurs solutions aqueuses*. Paris, France : Éditions Gauthier-Villars.
- Ghassemi, F., Jakeman, A. J., & Nix, H. A. (1995). *Salinisation of land and water resources: Human causes, extent, management and case studies*. CABI Publishing.

- Gratzfeld, J. (2004). Industries dans les zones arides et semi-arides : Planification et gestion de l'environnement. Gland et Cambridge : UICN édition.
- Gratzfeld, J. (Ed.). (2004). Industries extractives dans les zones arides et semi-arides : planification et gestion de l'environnement (Vol. 1). IUCN.
- Gonzalez-Barrios, J. L. (1992). Eaux d'irrigation et salinité des sols en zone aride mexicaine [Doctoral dissertation, Université de Montpellier].
- Gorji, T., Tanik, A., & Sertel, E. (2015). Soil salinity prediction, monitoring and mapping using modern technologies. *Procedia Earth and Planetary Science*, 15, 507–512. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.08.062>
- Goudie, A. S., & Viles, H. A. (2012). Weathering and the global carbon cycle: Geomorphological perspectives. *Earth-Science Reviews*, 113(1-2), 59–71.
- Guan, Y., & Liu, G. (2003). Remote sensing detection of dynamic variation of the saline land in the Yellow River Delta. *Remote Sensing of Land and Resources*, 15, 19-22. <https://doi.org/10.6046/gtzyyg.2003.02.05>
- Guiraud, R. (1973). Evolution post-triasique de l'avant-pays de la chaîne alpine en Algérie (Doctoral dissertation, Toulouse).
- Guo, H. M., & Wang, Y. X. (2005). Geochemical characteristics of shallow groundwater in Datong Basin, northwestern China. *Journal of Geochemical Exploration*, 87(3), 109–120. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2005.08.002>
- Gupta, R. K., Bhumbla, D. K., & Abrol, I. P. (1984). Effect of sodicity, pH, organic matter, and-calcium carbonate on the dispersion behavior of soils. *Soil Science*, 137(4), 245-251.
- Guyot, G. (1999). Climatologie de l'environnement : Cours et exercices corrigés. Dunod.
- Hachemi, K., Amrouni, Y., Daoudi, M., & Bamousa, A. O. (2020). Diachronic study of the great Sebkhha of Oran (western Algeria) based on SAR radar images (1992–2011). *Journal of Taibah University for Science*, 14(1), 1433–1446. <https://doi.org/10.1080/16583655.2020.1825183>

- Hacini, M., & Zatout, M. (2012). Évolution de la salinité des eaux du chott de Ain El Beida (Cuvette de Ouargla). *International Journal of Environment and Water*, 1, 236–243.
- Hadj Miloud, S., Djili, K., & Benidir, M. (2018). Fuzzy logic expert system for classifying solonchaks of Algeria. *Applied and Environmental Soil Science*, 2018(1), 8741567. <https://doi.org/10.1155/2018/8741567>
- Halitim, A. (1985). *Sols des régions arides d'Algérie*. Alger: O.P.U.
- Hallegatte, S., Green, C., Nicholls, R. J., & Corfee-Morlot, J. (2013). Future flood losses in major coastal cities. *Nature climate change*, 3(9), 802-806.
- Hamdi-Aissa, B., Vallès, V., Aventurier, A., & Ribolzi, O. (2004). Soils and brine geochemistry and mineralogy of hyperarid desert playa, Ouargla Basin, Algerian Sahara. *Arid Land Research and Management*, 18(2), 103-126.
- Hamed, Y., & Dhahri, F. (2013). Hydro-geochemical and isotopic composition of groundwater, with emphasis on sources of salinity, in the aquifer system in Northwestern Tunisia. *Journal of African Earth Sciences*, 83, 10–24.
- Herrera, C., Custodio, E., Chong, G., Lamban, L. J., Riquelme, R., Wilke, H., Jodar, J., Urrutia, J., Urqueta, H., Sarmiento, A., Gamboa, C., & Lictevout, E. (2016). Groundwater flow in a closed basin with a saline shallow lake in a volcanic area: Laguna Tuyajto, northern Chilean Altiplano of the Andes. *Science of the Total Environment*, 541, 303–318. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.060>
- Hem, J. D. (1985). *Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water* (3rd ed., U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2254). University of Virginia, Charlottesville. 263 p.
- Helgeson, H. C. (1969). Thermodynamics of hydrothermal systems at elevated temperatures and pressures. *American Journal of Science*, 267, 729–804.
- Herrero, J., & Castañeda, C. (2013). Changes in soil salinity in the habitats of five halophytes after 20 years. *Catena*, 109, 58-71. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.05.011>
- Herrero, J., & Castañeda, C. (2015). Temporal changes in soil salinity at four saline wetlands in NE Spain. *Catena*, 133, 145–156. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.04.017>

- Herrero, J., & Castaneda, C. (2009). Delineation and functional status monitoring in small saline wetlands of NE Spain. *Journal of Environmental Management*, 90, 2212-2218. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.06.026>
- Heurteaux, P., & Servant, J. (1979). Transferts et stockage de l'eau et des sels dans le profil pédologique des sols halomorphes camarguais. *Revue d'Écologie*, 51-91.
- Houha, B., Kherici, N., Kachi, S., & Vallès, V. (2008). Hydrochemical differentiation of salinization process of the water in endoreic semi-arid basin: Case of Remila Basin, Algeria. *American Journal of Applied Sciences*, 5(7), 891–895.
- Houhamdi, M., Maazi, M. C., Seddik, S., Bouaguel, L., Bougoudjil, S., & Saheb, M. (2009). Statut et écologie de l'Érismature à tête blanche (*Oxyura leucocephala*) dans les hauts plateaux de l'Est de l'Algérie. *Aves*, 46(1), 9-19.
- Huang, J., Li, Y., Fu, C., Chen, F., Fu, Q., Dai, A., Shinoda, M., Ma, Z., Guo, W., Li, Z., Zhang, L., Liu, Y., Yu, H., He, Y., Xie, Y., Guan, X., Ji, M., Lin, L., Wang, S., Yan, H., & Wang, G. (2017). Dryland climate change: Recent progress and challenges. *Reviews of Geophysics*, 55(3), 719–778.
- Iddir, M. A., Mahdi, H., & Djili, L. (2019). Electromagnetic induction prediction of soil salinity by extrapolated calibration model in M'Sila (Algeria). *Nature Environment and Pollution Technology*, 18(2), 387–394.
- Incorvaia, G. (2004). Étude des facteurs potentiellement limitant la répartition du Fennec *Fennecus zerda* (Doctoral dissertation). Université Claude Bernard Lyon 1, France.
- Issanova, G. T., Abuduwaili, J., Mamutov, Z. U., Kaldybaev, A. A., Saparov, G. A., & Bazarbaeva, T. A. (2017). Saline soils and identification of salt accumulation provinces in Kazakhstan. *Aridnye Ekosistemy*, 23(4), 37–45. <https://doi.org/10.1134/S2079096117040035>
- IUSS Working Group WRB. (2022). 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.

- Ivushkin, K., Bartholomeus, H., Bregt, A. K., Pulatov, A., Kempen, B., & De Sousa, L. (2019). Global mapping of soil salinity change. *Remote Sensing of Environment*, 231, Article 111260. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111260>
- Jacks, G., Bhattacharya, P., Chaudhary, V., & Singh, K. P. (2005). Controls on the genesis of some high-F groundwaters in India. *Applied Geochemistry*, 20(2), 221–228. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2004.07.002>
- Jamil, A., Riaz, S., Ashraf, M., & Foolad, M. R. (2011). Gene expression profiling of plants under salt stress. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 30, 435–458. <https://doi.org/10.1080/07352689.2011.605739>
- Jia, Y. F., Guo, H. M., Xi, B. D., Jiang, Y. H., Zhang, Z., Yuan, R. X., Yi, W. X., & Xue, X. L. (2017). Sources of groundwater salinity and potential impact on arsenic mobility in the western Hetao Basin, Inner Mongolia. *Science of The Total Environment*, 601-602, 691–702. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.196>
- Jolly, I. D., McEwan, K. L., & Holland, K. L. (2008). A review of groundwater-surface water interactions in arid/semi-arid wetlands and the consequences of salinity for wetland ecology. *Ecohydrology*, 1(1), 43–58. <https://doi.org/10.1002/eco.61>
- Joly, F. (2006). Les eaux sauvages des régions arides. Notions de base sur l'hydrologie des déserts. *Géomorphologie: Relief, processus, environnement*, 4, 285-298.
- Kaiser, H. F. (1960). The application of electronic computers to factor analysis. *Educational and Psychological Measurements*, 20, 141–151.
- Kazi Tani, N. (1970). Contribution à l'étude du Djebel Fernane et des monts de Bensrouer (étude sédimentologique et structurale) (Thèse de 3e cycle, Université d'Alger). 156 p.
- Khammoudj, D. (2009). Dynamique des systèmes et stratégie d'aménagement et gestion de la ressource en eau en zone semi-aride : cas de la région d'El Eulma, W de Sétif (Thèse de Doctorat, Université Annaba, Algérie).
- Khaznadar, M., Vogiatzakis, I. N., & Griffiths, G. H. (2009). Land degradation and vegetation distribution in Chott El Beida Wetland, Algeria. *Journal of Arid Environments*, 73(3), 369–377.

- Kieken, M. (1962). Les traits essentiels de la géologie algérienne. In Livre à la mémoire du professeur Paul Fallot (Mémoire hors-série de la Société géologique de France, t. I, pp. 545-644).
- Koopmanschap, E., Hammami, M., & Klok, C. (2011). Lac Ayata dans la Vallée d'Oued Righ. Quick-scan of options and preliminary recommendations for the management of Lake Ayata in the Valley of Oued Righ. Wageningen : Centre for Development Innovation, Wageningen UR.
- Kraiem, Z. (2015). Les nappes phréatiques du Chott (Sud-Ouest tunisien) : Caractérisation, mécanismes de minéralisation et étude de valorisation (Thèse de doctorat). Université de Sfax, École Nationale d'Ingénieurs de Sfax.
- Koull, N., & Chehma, A. (2016). Soil characteristics and plant distribution in saline wetlands of Oued Righ, Northeastern Algeria. *Journal of Arid Land*, 8(6), 948–959. <https://doi.org/10.1007/s40333-016-0060-5>
- Koull, N., Chehma, A., Hamouda, N., Bellahcene, O., & Guezzoun, N. (2016). Qualité des eaux des zones humides du bas Sahara algérien. *Revue des BioRessources*, 6, 113–124.
- Lamini, A. (2020). Étude géochimique et minéralogique comparative sebkha de N'goussa et chott Baghdad d'El Hadjira (Ouargla) (Thèse de doctorat). Université Kasdi Merbah Ouargla.
- Laoufi, H. (2010). Geochemical processes of salinization Lower-Chélif soils (Thèse de Magister, ENSA, El Harrach, Alger). 99 p.
- Laoufi, H., Ait Mechedal, M., & Daoud, Y. (2023). Salinisation of soils in semi-arid endorheic zone: Case of Chott El Beida (Algeria). *Land Degradation & Development*, 34(18), 5923–5939. <https://doi.org/10.1002/ldr.4887>
- Le Houérou, H. N. (1992). Vegetation and land use in the Mediterranean Basin by the year 2050: A prospection study. In L. Jeftic, J. D. Milliman, & G. Sestini (Eds.), *Climatic change and the Mediterranean* (pp. 159-166). Edward Arnold.
- Li, C. C., Gao, X. B., Liu, Y. S., & Wang, Y. X. (2019). Impact of anthropogenic activities on the enrichment of fluoride and salinity in groundwater in the Yuncheng Basin constrained by

Cl/Br ratio, $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{13}\text{C}$, and $\delta^7\text{Li}$ isotopes. *Journal of Hydrology*, 579, 124211. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124211>

-Li, C., Gao, X., Li, S., & et al. (2020). A review of the distribution, sources, genesis, and environmental concerns of salinity in groundwater. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(41), 41157–41174. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10354-6>

-Li, H., Shi, Z., Webster, R., & Triantafyllis, J. (2013). Mapping the three-dimensional variation of soil salinity in a rice-paddy soil. *Geoderma*, 195–196, 31-41. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.11.005>

-Li, J., Pu, L., Zhu, M., & Zhang, R. (2012). The present situation and hot issues in the salt-affected soil research. *Acta Geographica Sinica*, 67(9), 1233–1245. <https://doi.org/10.11821/xb201209008>

-Litalien, A., & Zeeb, B. (2020). Curing the earth: A review of anthropogenic soil salinization and plant-based strategies for sustainable mitigation. *Science of the Total Environment*, 698, 134235.

-Liu, Q., Li, F., Zhang, Q., Li, J., Zhang, Y., Tu, C., & Ouyang, Z. (2014). Impact of water diversion on the hydrogeochemical characterization of surface water and groundwater in the Yellow River Delta. *Applied Geochemistry*, 48, 83-92. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.07.009>

-Liu, Q., Liu, G., Huang, C., & Xie, C. (2015). Comparison of tasseled cap transformations based on the selective bands of Landsat 8 OLI TOA reflectance images. *International Journal of Remote Sensing*, 36(2), 417–441. <https://doi.org/10.1080/01431161.2014.995274>

-Ma, L., Ma, F., Li, J., Gu, Q., Yang, S., Wu, D., Feng, J., & Ding, J. (2017). Characterizing and modeling regional-scale variations in soil salinity in the arid oasis of Tarim Basin, China. *Geoderma*, 305, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.05.016>

-Ma, L., Yang, S., Simayi, Z., Gu, Q., Li, J., Yang, X., & Ding, J. (2018). Modeling variations in soil salinity in the oasis of Junggar Basin, China. *Land Degradation & Development*, 29(3), 551-562. <https://doi.org/10.1002/ldr.2890>

- Martinez-Beltran, J., & Manzur, C. L. (2005). Overview of salinity problems in the world and FAO strategies to address the problem. Proceedings of the International Salinity Forum, Riverside, California, April 2005, 311–313.
- Mateo-Sagasta, J., & Burke, J. (2011). Agriculture and water quality interactions: A global overview. SOLAW Background Thematic Report - TR08.
- Mathieu, C., & Pieltain, F. (2003). Analyse chimique des sols : Méthodes choisies. Éditions Tec et Doc/Lavoisier. 408 p.
- Medjani, F., Aissani, B., Labar, S., Djidel, M., Ducrot, D., Masse, A., & Hamilton, C. M. L. (2017). Identifying saline wetlands in an arid desert climate using Landsat remote sensing imagery. Application on Ouargla Basin, southeastern Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 10, 1-11.
- Mees, F., Casteneda, C., Herrero, J., & Van Ranst, E. (2012). The nature and significance of variations in gypsum crystal morphology in dry lake basins. *Journal of Sedimentary Research*, 82(1), 37-52.
- Merchán, D., Auqué, L. F., Acero, P., Gimeno, M. J., & Causapé, J. (2015). Geochemical processes controlling water salinization in an irrigated basin in Spain: Identification of natural and anthropogenic influence. *Science of the Total Environment*, 502, 330–343. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.041>
- Merot, P., Barriuso, E., Beaujouan, V., Benoit, P., Bidois, J., Bourrie, G., Burel, F., Chaplot, V., Charnay, M.-P., Clement, B., Clement, J.-C., Cotonnec, A., Curmi, P., Durand, P., Ganzetti, I., Gascuel-Oudou, C., Grimaldi, C., Hollier Larousse, A., Hubert-Moy, L., Jaffrezic, A., Kao, C., Merot, P.-H., Molenat, J., Ouin, A., Pinay, G., Pivette, E., Regimbeau, C., Ruiz, L., Troccaz, O., Trolard, F., Walter, C., & Zida, M. (2000). TY-FON, typologie fonctionnelle des zones humides de fond de vallée en vue de la régulation de la pollution diffuse. PNRZH, Programme national de recherche sur les zones humides. Rapport de synthèse final. INRA, Rennes. 115 p.
- Metternicht, G. I., & Zinck, J. A. (2003). Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints. *Remote sensing of environment*, 85(1), 1-20.
- Metternicht, G., & Zinck, J. A. (2008). Soil salinity and salinization hazard. In *Remote sensing of soil salinization* (pp. 1-16). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420065039.pt1>

- Michard, A. (1989). Rare earth element systematics in hydrothermal fluids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(3), 745-750.
- Minhas, P. S., Bali, A., Bhardwaj, A. K., Singh, A., & Yadav, R. K. (2021). Structural stability and hydraulic characteristics of soils irrigated for two decades with waters having residual alkalinity and its neutralization with gypsum and sulfuric acid. *Agricultural Water Management*, 244, 106609. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106609>
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human well-being: Wetlands and water synthesis*. World Resources Institute.
- Mirzavand, M., Ghasemieh, H., Sadatinejad, S., & Bagheri, R. (2020b). Delineating the source and mechanism of groundwater salinization in crucial declining aquifer using multi-chemo-isotopes approaches. *Journal of Hydrology*, 586, 124877. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124877>
- Mirzavand, M., Ghasemieh, H., Sadatinejad, S. J., & Bagheri, R. (2020c). An overview on source, mechanism and investigation approaches in groundwater salinization studies. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 17, 2463–2476. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02647-7>
- M'nassri, S., Lotfi, D., Yann, L., Gerhard, S., Mohamed, H., & Rajouene, M. (2018). Identifying the origin of groundwater salinisation in the Sidi El Hani basin (central-eastern Tunisia). *Journal of African Earth Sciences*, 147, 443–449.
- Mohallel, S. A., Metwally, S. E., Gomaa, E. A., Fathy, M., & Sayed Alahl, A. A. (2016). Assessment of scaling formation during solar desalination using PhreeqC modeling in El Gebail and El Qaa plain areas: southwest Sinai. *Renewable Wind Water Sol*, 3, 4. <https://doi.org/10.1186/s40807-016-0024-6>
- Monteiro, F. M., Fonseca, M. M., Madeira, M. A., & Herbillon, A. J. (2012). Driving factors determining the occurrence of sodic soils in dry subhumid Mediterranean areas. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 175(1), 94–100. <https://doi.org/10.1002/jpln.201000056>
- Montoroi, J. P. (2005). *Sols et environnement : sols sales et environnements*. Dunod.

- Morgan, N. C., & Boy, V. (1982). An ecological survey of standing waters in North West Africa: I. Rapid survey and classification. *Biological Conservation*, 24(1), 5-44.
- Naftz, D. L., Bullen, T. D., Stolp, B. J., & Wilkowske, C. D. (2008). Utilizing geochemical, hydrologic, and boron isotopic data to assess the success of a salinity and selenium remediation project, Upper Colorado River Basin, Utah. *Science of the Total Environment*, 392(1), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.10.047>
- Narsimha, A., & Sudarshan, V. (2018). Geochemical characterization and evaluation of groundwater suitability for domestic and agricultural utility in semi-arid region of Basara, Telangana State, South India. *Applied Water Science*, 8(44). <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0682-1>
- Ncibi, K., Chaar, H., Hadji, R., Baccari, N., Sebei, A., Khelifi, F., Abess, M., & Hamed, Y. (2020). A GIS-based statistical model for assessing groundwater susceptibility index in shallow aquifer in Central Tunisia (Sidi Bouzid basin). *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 98. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-5112-7>
- Nelson, P. N., & Oades, J. M. (1998). Organic matter, sodicity, and soil structure. In M. E. Sumner & R. Naidu (Eds.), *Sodic soils* (pp. 51–75). Oxford University Press.
- Oster, J. D., & Jayawardane, N. S. (1998). Agricultural management of sodic soils. In M. E. Sumner & R. Naidu (Eds.), *Sodic soils: Distribution, properties, management, and environmental consequences* (pp. 124-147). Oxford University Press.
- Oster, J. D., Shainberg, I., & Abrol, I. P. (1999). Reclamation of salt-affected soils. *Agricultural drainage*, 38, 659-691. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr38.c19>
- Ouamer-Ali, K., Daoud, Y., & Djili, K. (2018). Assessment and evaluation of the conservative character of the calcite residual alkalinity in drain waters – A case of saline soils under an arid Mediterranean climate. *Nature Environment and Pollution Technology*, 17(4), 1175–1182.
- Paix, M., Lanhai, L., Xi, C., Varenayam, A., Nyongesah, M., & Habiyaemye, G. (2013). Physicochemical properties of saline soils and aeolian dust. *Land Degradation & Development*, 24(5), 539–547. <https://doi.org/10.1002/ldr.1148>

- Pansu, M., & Gautheyrou, J. (2006). Handbook of Soil Analysis. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1-993.
- Parkhurst, D. L., & Appelo, C. A. J. (1999). User's Guide to PhreeqC (Version 2): A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One-Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations. Water-Resources Investigations Report 99 : 312.
- Pearce, F., & Crivelli, A. J. (1994). Caractéristiques générales des zones humides méditerranéennes (MedWet : Conservation des zones humides méditerranéennes, No. 1). Tour du Valat.
- Pinay, G., Black, V. J., Planty-Tabacchi, A. M., Gumiero, B., & Décamps, H. (2000). Geomorphic control of denitrification in large river floodplain soils. Biogeochemistry, 50(2), 163-182. <https://doi.org/10.1023/A:1006317004639>
- Piper, A. M. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. Eos, Transactions American Geophysical Union, 25, 914–928. <https://doi.org/10.1029/TR025i006p00914>
- Pitman, M. G., & Läuchli, A. (2002). Global impact of salinity and agricultural ecosystems. Salinity: environment-plants-molecules, 3, 20. https://doi.org/10.1007/0-306-48155-3_1
- Poulsen, D. L., Simmons, C. T., Le Galle La Salle, C., & Cox, J. W. (2006). Assessing catchment-scale spatial and temporal patterns of groundwater and stream salinity. Hydrogeology Journal, 14, 1339-1359. <https://doi.org/10.1007/s10040-006-0065-9>
- Qadir, M., Noble, A. D., Schubert, S., Thomas, R. J., & Arslan, A. (2006). Sodicty-induced land degradation and its sustainable management: Problems and prospects. Land Degradation & Development, 17(6), 661-676. <https://doi.org/10.1002/ldr.751>
- Qadir, M., Oster, J. D., Schubert, S., Noble, A. D., & Sahrawat, K. L. (2007). Phytoremediation of sodic and saline-sodic soils. Advances in Agronomy, 96, 197–247. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(07\)96006-X](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(07)96006-X)

- Qadir, M., Quill rou, E., Nangia, V., Murtaza, G., Singh, M., Thomas, R. J., Drechsel, P., & Noble, A. D. (2014). Economics of salt-induced land degradation and restoration. *Natural Resources Forum*, 38(4), 282-295. <https://doi.org/10.1111/1477-8947.12054>
- Rango, T., Bianchini, G., Beccaluva, L., & Tassinari, R. (2010). Geochemistry and water quality assessment of central Main Ethiopian Rift natural waters with emphasis on source and occurrence of fluoride and arsenic. *Journal of African Earth Sciences*, 57(5), 479–491. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2009.12.005>
- Rango, T., Vengosh, A., Dwyer, G., & Bianchini, G. (2013). Mobilization of arsenic and other naturally occurring contaminants in groundwater of the Main Ethiopian Rift aquifers. *Water Research*, 47(15), 5801-5818. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.07.002>
- Ranjbar, F., & Jalali, M. (2016). The combination of geostatistics and geochemical simulation for the site-specific management of soil salinity and sodicity. *Computers and Electronics in Agriculture*, 121, 301-312. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.11.011>
- Ramsar. (2013). *Le manuel de la convention de Ramsar : Guide de la convention sur les zones humides* (6e  d.). Secrétariat de la convention de Ramsar.
- Renaud, A. (2015). *Management et contrôle de gestion environnemental*.  ditions EMS.
- Rengasamy, P. (2006). World salinization with emphasis on Australia. *Journal of Experimental Botany*, 57(5), 1017-1023. <https://doi.org/10.1093/jxb/erj108>
- Rengasamy, P., & Sumner, M. E. (1998). Processes involved in sodic behaviour. In M. E. Sumner & R. Naidu (Eds.), *Sodic soils: Distribution, properties, management, and environmental consequences* (pp. 35-50). New York Press.
- Remili, S. (2019). *Contribution géochimique, minéralogique et optimisation du processus de cristallisation du sel par énergie solaire : Cas du chott Merouane-El-Oued* (Thèse de doctorat, Université Larbi Tebessi - Tebessa).
- Rhoades, J. D. (1992). Instrumental field methods of salinity appraisal. In G. C. Topp, W. D. Reynolds, & R. E. Green (Eds.), *Advances in Measurement of Soil Physical Properties: Bringing Theory into Practice* (pp. 231-248). Madison, WI: Soil Science Society of America.

- Rhoades, J. D., & Loveday, J. (1990). Salinity in irrigated agriculture. In B. A. Stewart & D. R. Nielsen (Eds.), *Irrigation of agricultural crops* (pp. 1089–1142). American Society of Agronomy.
- Richter, B. C., & Kreitler, C. W. (1993a). Identification of sources of ground-water salinization using geochemical techniques. 273 pp.
- Richter, B. C., & Kreitler, C. W. (1993b). *Geochemical techniques for identifying sources of groundwater salinization*. CRC Press, Boca Raton.
- Rodier, J. (2016). *L'analyse de l'eau : Contrôle et interprétation*. Dunod. 1824 p.
- Sajil Kumar, P. J., & James, E. J. (2016). Identification of hydrogeochemical processes in the Coimbatore District, Tamil Nadu, India. *Hydrological Sciences Journal*, 61, 719-731. <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1022551>
- Sajil Kumar, P. J. (2020). Hydrogeochemical and multivariate statistical appraisal of pollution sources in the groundwater of the lower Bhavani River basin in Tamil Nadu. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 4, 40–51. <https://doi.org/10.1080/24749508.2019.1574156>
- Saleh, J. (2011). *Morphologie et propriétés des calcisols : Référence des hautes plaines sétifiennes (Mémoire de magister)*. ENSA, 73 p.
- Samraoui, B., Chakri, K., & Samraoui, F. (2006). Large branchiopods (Branchiopoda: Anostraca, Notostraca, and Spinicaudata) from the salt lakes of Algeria. *Journal of Limnology*, 65, 83-88.
- Santucci, L., Carol, E., & Kruse, E. (2016). Identification of palaeo-seawater intrusion in groundwater using minor ions in a semi-confined aquifer of the Rio de la Plata littoral (Argentina). *Science of the Total Environment*, 566-567, 1640–1648. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.066>
- Scanlon, B. R., Nicot, J. P., Reedy, R. C., Kurtzman, D., Mukherjee, A., & Nordstrom, D. K. (2009). Elevated naturally occurring arsenic in a semi-arid oxidizing system, southern high plain aquifer, Texas, USA. *Applied Geochemistry*, 24(11), 2061–2071. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2009.08.004>

- Scudiero, E., Corwin, D. L., Anderson, R. G., Yemoto, K., Clary, W., Wang, Z., & Skaggs, T. H. (2017). Remote sensing is a viable tool for mapping soil salinity in agricultural lands. *California Agriculture*, 71(4).
- Semar, A., Hartani, T., & Bachir, H. (2019). Soil and water salinity evaluation in new agriculture land under arid climate, the case of the Hassi Miloud area, Algeria. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 4(40). <https://doi.org/10.1007/s41207-019-0130-0>
- Servant, J. (1975). Contribution à l'étude pédologique des terrains halomorphes. L'exemple des sols salés du Sud et du Sud-Ouest de la France (Tome 1). ENSA Montpellier, 194 p.
- Servant, J. M. (1976). Sur quelques aspects de la pédogénèse en milieu halomorphe : l'exemple des sols salés de la région méditerranéenne française. *Annales de l'INRA*, 6(1), 225-245.
- Shainberg, I., & Letey, J. (1984). Response of soil to sodic and saline conditions. *Hilgardia*, 52, 1-57.
- Shahid, M., Dumat, C., Khan Niazi, N., & Khalid, S. (2018a). Global scale arsenic pollution: Increase the scientific knowledge to reduce human exposure. *VertigO - la Revue Électronique en Sciences de l'Environnement*. <https://doi.org/10.4000/vertigo.21331>
- Shrivastava, P., & Kumar, R. (2015). Soil salinity: A serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 22(2), 123–131.
- Simler, R. (2014). Diagrammes Software. Consulté à l'adresse <http://www.lha.univ-avignon.fr/LHA-Logiciels.htm>
- Singh, A. (2015). Soil salinization and waterlogging: A threat to environment and agricultural sustainability. *Ecological Indicators*, 57, 128–130.
- Si Bachir, A., Barbraud, C., Doumandji, S., & Hafner, H. (2008). Nest site selection and breeding success in an expanding species, the Cattle Egret *Bubulcus ibis*. *Ardea*, 96(1), 99–107.

- Sigg, L., Stumm, W., & Behra, P. (1992). *Chimie des milieux aquatiques : Chimie des eaux naturelles et des interfaces dans l'environnement*. Paris : Masson.
- Six, J., Paustian, K., Elliott, E. T., & Combrink, C. (2000). Soil structure and soil organic matter: I. Distribution of aggregate size classes and aggregate-associated carbon. *Soil Science Society of America Journal*, 64(2), 681-689.
- Smedley, P. L., Kinniburgh, D. G., Macdonald, D. M. J., Nicolli, H. B., Barros, A. J., Tullio, J. O., Pearce, J. M., & Alonso, M. S. (2005). Arsenic associations in sediments from the loess aquifer of La Pampa, Argentina. *Applied Geochemistry*, 20(5), 989–1016. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2004.10.005>
- Sparks, D. L. (2003). *Environmental Soil Chemistry*. Academic Press. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-656445-7.50014-0>
- Sposito, G. (1984). *The Surface Chemistry of Soils*. Oxford University Press.
- Stavi, I., Thevs, N., & Priori, S. (2021). Soil salinity and sodicity in drylands: A review of causes, effects, monitoring, and restoration measures. *Frontiers in Environmental Science*, 9, Article 712831. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.712831>
- Stumm, W., & Morgan, J. J. (1981). *Aquatic chemistry: An introduction emphasizing chemical equilibria in natural waters* (2nd ed.). John Wiley & Sons Ltd.
- Stavi, I., Shem-Tov, R., Ragolsky, G., & Lekach, J. (2017). Ancient to recent-past runoff harvesting agriculture in recharge playas of the hyper-arid Southern Israel. *Water*, 9(12), 991. <https://doi.org/10.3390/w9120991>
- Sterling, S. M., Ducharne, A., & Polcher, J. (2013). The impact of global land-cover change on the terrestrial water cycle. *Nature Climate Change*, 3(4), 385-390.
- Stone, O. R. (1967). A desert glossary. *Earth-Science Reviews*, 3, 211-268.
- Suarez, D. L. (2001). Sodic soil reclamation: Modelling and field study. *Australian Journal of Soil Research*, 39(6), 1225–1246.
- Suarez, D. L., & Rhoades, J. D. (1982). The apparent solubility of calcium carbonate in soils. *Soil Science Society of America Journal*.

- Sverdrup, H., & Warfvinge, P. (1988). Lake liming in different types of acid lakes using various types of calcite powders and methods. *Water, Air, and Soil Pollution*, 41, 189–222. <https://doi.org/10.1007/BF00160351>
- Sverdrup, H., & Warfvinge, P. (1988). Weathering of primary silicate minerals in the natural soil environment in relation to a chemical weathering model. *Water, Air, and Soil Pollution*, 38, 387–408.
- Szabolcs, I. (1994). Salt affected soils as the ecosystem for halophytes. Halophytes as a resource for livestock and for rehabilitation of degraded lands, 19-24.
- Tanji, K. (Ed.). (1990). Agricultural salinity assessment and management (ASCE Manuals & Reports on Engineering Practice No. 71, pp. 262–304). ASCE.
- Toumi, A., Reggam, A., Alayat, H., & Houhamdi, M. (2016). Caractérisation physico-chimique des eaux de l'écosystème lacustre: cas du Lac des Oiseaux (Extrême NE-Algérien) Physico-chemical characterization of waters of the lake ecosystem: Case of Lake of Birds (Far NE-Algerian). *Journal of Materials and Environmental Science*, 7, 139-147.
- Tremblay, D., Barraud, R., Carcaud, N., Davodeau, H., & Montembault, D. (2007). Le sel pour une terre durable. *La Revue du BRGM*.
- U.S. Salinity Laboratory Staff. (1954). Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils (U.S.D.A. Handbook No. 60). 160 p.
- Valles, V. (1985). Etude et modélisation des transferts d'eau et de sels dans un sol argileux (Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse). 146 p.
- Valles, V. (1987). Modélisation des transferts d'eau et de sels dans un sol argileux. Application au calcul des doses d'irrigation [Doctoral dissertation, Institut national polytechnique de Toulouse - École nationale supérieure agronomique].
- Valles, V., Rezagui, M., Auque, L., Semadi, A., Roger, L., & Zougari, H. (1997). Geochemistry of saline soils in two arid zones of the Mediterranean basin. I. Geochemistry of the Chott Melghir-Mehrouane watershed in Algeria. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 11(1), 71–84. <https://doi.org/10.1080/15324989709381460>

- Van Beek, C., & Van Breemen, N. (1973). The alkalinity of alkali soils. *Journal of Soil Science*, 24(1), 129-136.
- Van Beek, C. L., & Tóth, G. (Eds.). (2012). Risk assessment methodologies of soil threats in Europe (JRC Scientific and Policy Reports EUR). Office for Official Publications of the European Communities. <http://dx.doi.org/10.2788/47096>
- Van Olphen, H. (1977). An introduction to clay colloid chemistry: For clay technologists, geologists and soil scientists (2nd ed.). Wiley.
- Van Reeuwijk, L. P. (1987). Procedures for soil analysis (Technical Paper No. 9). International Soil Reference and Information Centre.2
- Vautard, R., Gobiet, A., Sobolowski, S., Kjellström, E., Stegehuis, A., Watkiss, P., Mendlik, T., Landgren, O., Nikulin, G., Teichmann, C., & Jacob, D. (2014). The European climate under a 2°C global warming. *Environmental Research Letters*, 9(3), 034006.
- Verhoeven, J. T. A., & Setter, T. L. (2010). Agricultural use of wetlands: Opportunities and limitations. *Annals of Botany*, 105, 155–163. <https://doi.org/10.1093/aob/mcp172>
- Villa, J. M. (1980). La chaîne alpine d’Algérie orientale et les confins algéro-tunisiens (Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, France).
- Wagner, W. (2011). Groundwater in the Arab Middle East. Springer Science & Business Media.
- Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37, 29–38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
- Walter, J., Lück, E., Bauriegel, A., Facklam, M., & Zeitz, J. (2018). Seasonal dynamics of soil salinity in peatlands: A geophysical approach. *Geoderma*, 310, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.08.022>
- Wang, J. J., Harrell, D. L., & Bell, P. F. (2004). Potassium buffering characteristics of three soils low in exchangeable potassium. *Soil Science Society of America Journal*, 68, 654–661.

- Wang, H., Hsieh, Y. P., Harwell, M. A., & Huang, W. (2007). Modeling soil salinity distribution along topographic gradients in tidal salt marshes in Atlantic and Gulf coastal regions. *Ecological modelling*, 201(3-4), 429-439.
- Wang, Y., Deng, C., Liu, Y., Niu, Z., & Li, Y. (2018). Identifying change in spatial accumulation of soil salinity in an inland river watershed, China. *Science of the Total Environment*, 621, 177-185. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.222>
- Warren, J. K. (2016). *Evaporites: A geological compendium* (2nd ed.). Springer.
- Wicke, B., Smeets, E., Dornburg, V., Vashev, B., Gaiser, T., Turkenburg, W., & Faaij, A. (2011). The global technical and economic potential of bioenergy from salt-affected soils. *Energy & Environmental Science*, 4(8), 2669-2681.
- Williams, W. D. (1998). The management of inland saline waters. *Guidelines of Lake Management* (Vol. 6). ILEC/UNEP.
- Williams, W. D. (2001). Anthropogenic salinisation of inland waters. *Hydrobiologia*, 466(1), 329–337. <https://doi.org/10.1023/A:1014598509028>
- Williams, W. D. (2002). Environmental threats to salt lakes and the likely status of inland saline ecosystems in 2025. *Environmental Conservation*, 29(2), 154-167. <https://doi.org/10.1017/S0376892902000103>
- Yuan, C., Sun, J., Liu, W., Wang, J., & Zhao, M. (2019). Mapping coastal wetland soil salinity in different seasons using an improved comprehensive land surface factor system. *Ecological Indicators*, 107, 105517. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105517>
- Yu, J., Li, Y., Han, G., Zhou, D., Fu, Y., Guan, B., Wang, G., Ning, K., Wu, H., & Wang, J. (2014). The spatial distribution characteristics of soil salinity in the coastal zone of the Yellow River Delta. *Environmental Earth Sciences*, 72(2), 589-599.
- Yu, Y., Shi, X., Wang, H., Yue, C., Chen, S., Liu, Y., Hu, L., & Qiao, S. (2013). Effects of dams on water and sediment delivery to the sea by the Huanghe (Yellow River): The special role of water-sediment modulation. *Anthropocene*, 3, 72-82.
- Zarroca, M., Bach, J., Linares, R., & Pellicer, X. M. (2011). Electrical methods (VES and ERT) for identifying, mapping and monitoring different saline domains in a coastal plain region

(Alt Empordà, Northern Spain). *Journal of Hydrology*, 409(1–2), 407-422.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.08.015>

-Ziza, F., Daoud, Y., Laboudi, A., Zouahra, A., & Bradai, R. (2012). Évolution de la salinité dans les périmètres de mise en valeur et conséquences sur la diminution des rendements du blé dans une région saharienne : Cas de la région d'Adrar. *Algerian Journal of Arid Environment*, 2(2), 4–15.

-Zinck, J. A., & Metternicht, G. (2009). Soil salinity and hazard. In G. Metternicht & J. A. Zinck (Eds.), *Remote Sensing of Soil Salinization: Impact on Land Management* (pp. 3–20). CRC Press Taylor & Francis Group.

-Zovko, M., Lulić, S., & Balog, K. (2018). A geostatistical Vis-NIR spectroscopy index to assess the incipient soil salinization in the Neretva River valley, Croatia. *Geoderma*, 332, 89-97. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.005>

Annexes

Annexe**Annexe I. Les types de climat selon l'indice d'aridité de De Martonne**

Valeurs de l'indice	Le type du climat
$0 < I < 5$	Hyper-aride
$5 < I < 10$	Aride
$10 < I < 20$	Semi-aride
$20 < I < 30$	Semi-humide
$30 < I < 50$	Humide

Annexe II. Résultats des analyses physico-chimiques « Sebket El Hamiet »

Echantillon	pH	CE (dS/m)	CaCO ₃ (%)	Gypse (%)	MO (%)	Eléments Grossiers (%)	Argile (%)	Limon (%)	Sable (%)	Texture USDA
H11	7,83	10,41	23,92	45,24	2,0	0	55,7	41,9	5,35	Clay
H12	7,24	100,71	19,57	23,82	1,8	0	49,9	44,3	6,5	Silty Clay
H21	7,73	132,26	25,69	14,46	20,9	0	57,8	35,07	5,78	Clay
H22	7,65	114,2	15,25	50,62	10,0	0	58,6	33,65	6,06	Clay
H23	7,7	131,35	41,32	26,12	27,6	0	56,42	40,4	4,31	Clay
H31	7,78	60,58	22,19	20,66	25,6	0	58,7	37,9	3,69	Clay
H32	7,69	58,4	8,87	61,69	5,8	0	56,7	38,6	4,75	Clay
H33	7,43	96,54	17,83	23,46	13,8	0	57,5	35,8	5,5	Clay
H41	7,75	89,98	16,1	28,19	6,2	0	54,6	40,8	5,4	Clay
H42	7,48	109,78	9,04	35,12	26,3	0	25,1	69,85	8,6	Silt Loam
H43	7,63	110,47	18,7	10,03	12,7	0	50,7	44,2	6,9	Silty Clay
H51	7,58	78,33	13,4	36,90	2,2	0	60,15	35	4,88	Clay
H52	7,42	114,17	6,52	45,60	22,9	0	64,95	29,7	3,45	Clay
H53	7,48	93,44	5,62	40,73	1,4	0	61,2	34,7	3,7	Clay
H54	7,7	97,7	37,15	9,74	27,6	0	56,47	40,8	3,19	Silty Clay
H61	8,12	6,76	32,97	2,50	36,6	0	53	39,4	2,6	Silty Clay
H62	7,73	69,53	14,35	35,71	6,4	0	56,5	40,91	2,56	Silty Clay
H63	7,17	67,21	47,24	5,01	13,9	0	57,5	39,71	2,56	Clay
H81	8,36	9,72	24,88	14,31	20,0	0	50,6	37,3	11,1	Clay
H82	7,75	28,75	19,4	32,32	19,5	0	55,5	34	5,76	Clay
H91	8,34	7,36	31,75	7,67	9,7	0	24	69,77	10,71	Silt Loam
H92	8,05	21,12	13,75	42,8	13,2	0	56,25	40,65	2,92	Silty Clay
H93	8,27	24,14	16,87	38,08	6,6	0	49,5	20	31,38	Clay
H101	8	5,13	34,5	1,91	28,1	0	45,3	36,55	22,33	Clay
H102	8,17	22,46	44,71	13,57	11,1	0	54,25	42,65	2,92	Silty Clay
H103	8,03	24,6	21,57	12,25	9,9	0	53,2	38,5	8,12	Clay
H111	7,87	3,25	39,58	52,98	14,9	0	34	60,57	5,16	Silty Clay Loam
H112	8,02	8,86	23,25	4,57	14,9	0	42,9	39,06	21,43	Clay
H113	8,09	13,84	29,75	5,75	9,8	0	46,4	34,45	23,33	Clay

Annexe

Annexe III. Résultats des analyses physico-chimiques « Chott El Frain »

Echantillon	pH	CE (dS/m)	CaCO ₃ (%)	Gypse (%)	MO (%)	Éléments Grossiers (%)	Argile (%)	Limon (%)	Sable (%)	Texture USDA
F11	7,83	85,84	8,34	23,61	1,6	0	55,1	42,7	6,99	Clay
F12	8,01	100,3	6,02	25,97	2,1	0	59,7	34	11,96	Clay
F13	7,9	57,94	39,61	13,87	2,0	0	57,15	32,9	10,35	Clay
F14	7,64	133,38	52,81	7,97	1,7	0	53,15	36,37	5,86	Silty Clay
F21	7,7	89,84	9,03	27,15	2,8	0	54,2	34	7,2	Clay
F22	7,5	103,27	7,18	24,94	2,3	0	54,7	34,9	6,42	Clay
F23	7,81	110,69	47,03	20,51	0,0	0	60,15	29,55	9,95	Clay
F24	7,8	112,97	58,14	7,97	1,4	0	52,5	34,7	12,44	Clay
F31	7,85	124,08	10,65	27,45	1,9	0	53,6	33,4	13,3	Clay
F32	7,6	158,69	11,35	26,42	2,4	0	60,1	30,9	6,25	Clay
F33	8,03	135,001	68,1	7,67	1,8	0	66,5	25,9	6,1	Clay
F34	8,08	88,68	46,33	5,75	1,5	0	53,2	36,6	9,25	Clay
F41	7,7	68,37	31,73	10,92	1,6	0	62,9	36,06	4,43	Clay
F42	7,44	39,46	48,64	5,75	1,9	0	61,8	36,93	4,5	Clay
F43	7,75	25,33	80,38	9,15	1,3	0	64,8	30,9	4,4	Clay
F44	8,04	32,001	63,47	6,05	1,6	0	65,9	25,9	6,27	Clay
F51	8,1	4,99	20,15	15,64	6,4	0	54,2	42,9	3,05	Silty Clay
F52	7,8	35,75	49,11	7,67	3,4	0	53,45	43,1	4,4	Silty Clay
F53	7,95	18,63	83,86	12,39	1,6	0	66,5	27,3	4,79	Clay
F61	7,87	4,71	17,83	28,92	6,2	0	50,25	43,94	5,84	Silty Clay
F62	8,1	27,17	12,97	6,78	3,0	0	48,35	43,5	8,7	silty clay
F63	7,75	20,93	91,27	4,72	1,3	0	65,45	29,45	3,35	Clay
F71	8,18	5,08	17,36	22,58	4,9	0	50,3	44,2	4,69	Silty Clay
F72	7,93	30,44	14,12	19,63	2,4	0	49,5	42,65	8,25	Silty Clay
F73	8,05	25,25	76,44	19,04	1,8	0	54,13	42,3	2,85	Silty Clay
F81	8,2	5,04	14,12	23,17	4,2	0	48,7	43,25	9,4	Silty Clay
F82	7,7	27,5	37,98	20,07	0,0	0	49,56	43,07	8,35	Silty Clay
F83	7,91	9,99	80,61	18,3	1,3	0	67,5	26,8	2,9	Clay

Annexe

Annexe IV. Résultats des analyses physico-chimiques « Sebket Bazer »

Echantillon	pH	CE (dS/m)	CaCO ₃ (%)	Gypse (%)	MO (%)	Éléments Grossiers (%)	Argile (%)	Limon (%)	Sable (%)	Texture USDA
B11	6,99	48,95	43,09	0,155	1,4	8,76	48,15	39,6	10	Silty Clay
B12	7,55	49,83	35,45	5,045	0,0	0	45,3	43,3	12,7	Silty Clay
B21	6,9	138,01	40,31	1,88	2,2	6,59	48,2	41,25	9,46	Silty Clay
B22	7,51	46,92	28,27	7,53	1,6	0	61,5	32	3,85	Clay
B31	8,23	1,51	29,19	9,22	2,3	3,35	48,15	39,9	10,63	Silty Clay
B32	7,4	30,53	39,85	18,508	1,1	2,85	47,9	38,63	11,75	Silty Clay
B33	7,41	27,39	23,17	27,52	1,0	2,35	61,37	29,2	7,29	Clay
B41	7,67	1,061	36,6	0,665	1,8	0	49,2	38,65	11,13	Clay
B42	7,61	4,063	43,56	0,6	1,5	4,03	54,7	42,69	3,39	Silty Clay
B51	7,5	1,613	34,52	19,92	1,5	0	53,8	42,9	3,65	Silty Clay
B52	7,92	6,546	27,8	37,05	1,3	0	56,7	39,05	5,15	Clay
B53	7,64	10,88	18,07	12,39	1,1	0	47,5	40,06	9,71	Silty Clay
B54	7,7	8,14	8,11	11,51	0,0	0	46,75	38,9	11,36	Silty Clay
B55	7,83	10,1	22,24	9,81	1,2	0	47,5	38,8	11,75	Silty Clay
B61	7,6	0,97	39,39	1,62	1,7	1,56	48,6	41	11,25	Silty Clay
B62	7,66	10,6	15,99	10,18	1,2	3,75	56,5	38,9	4,4	Clay
B71	7,77	0,65	38,91	8,705	0,0	0	54,45	40,45	4,5	Silty Clay
B72	7,19	3,49	41,47	27,89	1,4	0	55,2	39,75	3,35	Silty Clay
B73	7,6	5,141	40,77	5,755	1,7	0	67,8	27,25	3,01	Clay
B74	7,69	5,315	22,01	28,94	1,5	0	52,79	40	8,25	Clay
B81	7,68	0,658	44,48	0,515	2,2	0,99	54,56	41,65	3,3	Silty Clay
B82	7,76	0,588	50,5	1,25	1,6	0	56,19	38,97	4,85	Clay
B83	7,7	1,024	44,48	1,105	2,9	0	54,25	43,65	3,09	Silty Clay
B84	7,71	4,496	27,11	1,14	16,4	5,49	55,6	39,34	4,56	Clay

Annexe V. Résultats des analyses physico-chimiques « Chott El Beida »

Echantillon	pH	CE (dS/m)	CaCO ₃ (%)	Gypse (%)	MO (%)	Éléments Grossiers (%)	Argile (%)	Limon (%)	Sable (%)	Texture USDA
C11	7,86	140,9	28,12	18,97	2,0	20,15	60,5	29,8	6,3	Clay
C12	7,32	142,4	28,33	28,93	1,8	28,88	50,51	42,8	4,45	Silty Clay
C21	7,53	78,33	32,7	12,03	1,9	13,44	54,15	40,9	2,6	Silty Clay
C22	7,82	71,25	33,54	10,26	0,0	8,39	55,3	40,55	2,8	Silty Clay
C31	7,83	112,3	19,79	56,01	2,4	9,19	48,5	43,55	5,4	Silty Clay
C32	7,97	69,03	25	21,4	2,4	6,8	48,19	42,8	6,56	Silty Clay
C33	7,66	56,55	33,96	24,35	1,9	18,52	55,8	43,7	4,5	Clay
C34	7,7	62,84	60,41	17,49	1,8	5,23	61,5	29,8	7,4	Clay
C41	7,66	66,32	26,87	42,66	15,6	3,85	48,5	45,2	3,75	Silty Clay
C42	7,7	46,38	40,83	10,04	2,2	15,47	49,5	43,65	4,13	Silty Clay
C43	7,66	49,45	26,45	40,89	1,8	2,46	55,15	41,63	2,45	Silty Clay
C51	8,15	68,82	20,62	23,1	7,1	7,41	20,5	70,9	9,7	Silt Loam
C52	8,09	45,18	26,25	22,29	1,0	15,63	48,7	44,8	3,41	Silty Clay
C53	7,79	42,61	36,25	15,5	1,5	5,51	49,3	44,6	4,27	Silty Clay
C54	7,83	26,47	41,87	19,78	1,3	4,59	60,51	26,14	10,23	Clay
C61	8,28	11	24,37	9,08	5,5	1,27	16,5	61,06	21,7	Silt Loam
C62	8,01	35,93	30,62	41,33	1,8	8,91	53,5	42,8	2,28	Silty Clay
C63	7,91	32,62	27,08	10,92	1,6	12,33	48,3	48,06	2,99	Silty Clay
C71	8,45	7,57	21,45	4,21	4,5	8,08	22,5	70,2	3,75	Silt Loam
C72	7,98	32,34	35,41	16,68	1,6	12,29	47,5	45,8	4	Silty Clay
C73	7,83	35,54	31,04	11	1,3	5,52	56,5	42,28	2,45	Silty Clay
C81	8,32	9,45	24,58	15,2	7,1	12,79	22,5	69,5	5,4	Silt Loam
C82	8,05	34,38	31,45	25,83	2,1	11,83	54,2	42,9	3,39	Silty Clay
C83	7,84	30,39	23,54	17,12	11,4	21,06	55,6	39,2	3,2	Silty Clay

Annexe VI. Résultats du bilan ionique « Sebkhiet El Hamiet »

Echantillon	Cl ⁻ (méq/l)	SO ₄ ²⁻ (méq/l)	HCO ₃ ⁻ (méq/l)	Na ⁺ (méq/l)	Ca ⁺⁺ (méq/l)	Mg ⁺⁺ (méq/l)	K ⁺ (méq/l)
H111	29	94,6	3,8	122	8,22	8,18	0,55
H112	30	172,2	4,3	166	45,01	12,2	2,15
H113	82	243,6	4,4	223	68,44	18,32	3,48
H101	62	106,2	3,9	160	7,96	24,81	0,89
H102	164	223,6	3,8	256	98,61	36,04	3,48
H103	176	273,6	4,2	265	112,7	39,76	2,16
H91	29	123,6	4,4	180	15,76	14,72	0,96
H92	162	241,8	4	350	93,92	42,24	5,64
H93	173	251	4,2	336	104,49	48,28	6,48
H81	226	130,6	4,5	360	14,02	19,44	0,68
H82	272	114,4	3,5	260	120,63	57,5	0,19
H61	52	116,2	4,2	188	13,66	13,52	0,56
H62	698	157,6	3,7	406	263,36	139,06	23,18
H63	716	142,8	3,1	285	332,45	144,42	25,45
H51	1850	169,4	3,5	1444	294,16	156,66	19,83
H52	2080	250	3,4	1540	409,65	228,34	15,83
H53	1045	180	3,2	630	302,48	186,88	28,91
H54	938	411,4	3,5	760	361,93	185,4	15,64
H41	1162	182,4	3,7	925	324,93	179,96	16,94
H42	1400	207,4	3,6	850	404,23	239,56	31,84
H43	1198	212,6	3,6	638	459,98	220,94	0,64
H31	836	169,4	3,7	564	232,03	121,16	2,91
H32	1182	359,6	3,5	1098	224	106,8	5,67
H33	1400	172,2	3,4	903	357,21	193,08	12,94
H21	1522	68	3,5	819	402,87	264,52	31,58
H22	1762	227,2	3,6	1298	380,7	228,4	10,28
H23	1292	140,6	3,6	814	379,98	162,7	9,74
H11	74	162,8	4,1	235	16,48	20,82	0,97
H12	1576	194,2	3,3	1068	372,45	170,42	15,48

Annexe VII. Résultats du bilan ionique « Chott El Frain »

Echantillon	Cl ⁻ (méq/l)	SO ₄ ⁻ (méq/l)	HCO ₃ ⁻ (méq/l)	Na ⁺ (méq/l)	Ca ⁺⁺ (méq/l)	Mg ⁺⁺ (méq/l)	K ⁺ (méq/l)
F11	617	205,9	3,8	287,65	320,45	191,68	15,93
F12	777	192,4	4,2	431,35	381	200,6	12,83
F13	369	123	4,1	245,06	201,55	85,88	7,46
F14	1048	256	3,8	639,09	359,77	286,76	16,74
F21	554	184,7	3,8	434,28	334,25	179,68	9,85
F22	801	200,6	3,4	484,72	381,99	206,54	29,73
F23	856	218,9	3,2	477,28	406,59	201,38	12,33
F24	861	220,5	3,7	619,35	375,86	245,94	24,02
F31	954	251,6	3,8	574,36	452,16	248,16	18,11
F32	1296	258,6	3,5	803,45	400,97	317,38	29,77
F33	1062	247,5	4,1	806,95	432,48	270	30
F34	655	218,6	3,9	299,54	328,46	177,36	19,77
F41	490	163,4	3,5	256,13	345,55	136,74	18,37
F42	216	108,64	3,2	152,47	121,36	78,92	3,88
F43	112	117,83	3,5	68,45	109,83	50,66	2,19
F44	202	108,69	3,8	112,49	129,67	64	10,33
F51	24	7,98	3,7	42,02	23,48	9,98	0,56
F52	190	92,74	3,9	169,18	115,48	41,5	5,22
F53	108	68,95	3,9	63,78	75,46	37,26	5,86
F61	14	5,38	3,9	75,47	19,74	9,42	0,02
F62	150	104,38	4	128,29	114,13	54,34	10,22
F63	116	67,58	3,8	62,31	114,28	41,86	2,59
F71	21	18,45	3,8	79,48	15,75	10,16	0,78
F72	205	93,24	2	157,37	115,85	60,88	3,56
F73	135	106,16	4,5	108,78	128,19	50,5	2,45
F81	40	8,45	4,3	68,44	12,68	10,08	0,46
F82	161	90,75	3,2	149,25	85,74	55	2,58
F83	65	14,91	3,9	42,65	29,74	19,98	1,25

Annexe VIII. Résultats du bilan ionique « Sebkhet Bazer »

Echantillon	Cl ⁻ (méq/l)	SO ₄ ⁻ (méq/l)	HCO ₃ ⁻ (méq/l)	Na ⁺ (méq/l)	Ca ⁺⁺ (méq/l)	Mg ⁺⁺ (méq/l)	K ⁺ (méq/l)
B11	322	147,6	2,2	219,62	184,16	107,9	6,59
B12	330	130,26	3,5	198,24	248,62	99,66	4,56
B21	1090	243,4	2,5	723,57	362,37	276,02	10,54
B22	359	93,43	3,4	182,67	227,45	93,84	5,28
B31	7	5	4,5	53,85	7,56	3,02	0,023
B32	198	89,5	3,6	147,64	129,84	41,06	2,64
B33	180	72,43	3,4	113,26	112,28	54,78	4,27
B41	6	2,76	2,6	63,77	5,84	2,12	0,25
B42	10	8,04	3,9	46,22	6,64	8,13	0,98
B51	6	4,29	3,7	62,26	7,15	3,23	0,15
B52	32	12,16	4	25,85	12,49	23,09	2,11
B53	52	36,38	3,5	45,26	42,95	21,76	1,93
B54	44	27,89	3,8	63,22	32,51	16,28	1,21
B55	49	37,15	3,8	41,82	39,38	20,2	1,53
B61	5	5,89	3,8	52,37	13,54	1,94	0,23
B62	47	28,76	3,8	68,93	22,59	21,2	3,17
B71	4	1,75	3,6	48,85	8,62	1,3	0,31
B72	20	13,13	3,2	17,92	17,86	6,98	0,58
B73	32	14,38	3,6	16,52	28,54	10,28	0,68
B74	15	10	3,8	29,82	11,59	10,63	0,74
B81	4	3,28	3,4	54,56	12,8	1,32	0,12
B82	3	1,65	3,4	15,33	3,59	1,18	0,1
B83	8	2,2	3,8	15,61	3,02	2,05	0,8
B84	15	10,62	3,8	28,63	11,58	8,99	0,5

Annexe IX. Résultats du bilan ionique « Chott El Beida »

Echantillon	Cl ⁻ (méq/l)	SO ₄ ⁻ (méq/l)	HCO ₃ ⁻ (méq/l)	Na ⁺ (méq/l)	Ca ⁺⁺ (méq/l)	Mg ⁺⁺ (méq/l)	K ⁺ (méq/l)
C11	1126	222	3,5	812,34	353,88	281,8	15,34
C12	1146	225,5	3,1	752,19	380,33	284,8	17
C21	565	188,5	3,6	338,73	260,11	156,66	9,48
C22	539	153,1	3,9	345,19	228,58	142,5	8,37
C31	854	218	3,9	553,74	353,74	224,6	25,11
C32	505	168,5	3,2	329,73	221,45	158,06	9,84
C33	417	125,7	3,5	163,48	246,85	123,1	8,33
C34	438	172,8	2,9	200,44	302,47	125,68	15,44
C41	469	156,3	3,4	300,02	301,58	132,64	11,02
C42	250	123,21	3,6	208,67	126,58	92,76	4,85
C43	380	100	2	211,77	185,09	98,9	6,19
C51	504	168,3	4,1	302,66	245,53	137,64	15,11
C52	249	124,41	3,8	199,46	164,71	90,36	5,78
C53	233	119,61	3,8	128	184,13	65,22	6,48
C54	151	104,41	2,9	208,89	56,23	32,94	2,46
C61	25	59,94	4,5	88,5	30,5	22	1,98
C62	251	92,41	4,2	105,82	159,19	71,86	6,44
C63	209	102,41	3,8	103,52	135,88	65,24	4,76
C71	29	23,3	4,8	59,44	13,59	15,14	0,48
C72	208	104,72	3,6	156,99	111,77	64,68	2,91
C73	202	143,65	3,2	121,68	164,11	71,08	9,84
C81	61	11,03	4,4	74,34	30,48	18,9	0,98
C82	202	124,16	4,2	166,44	145,01	68,76	5,01
C83	206	85,85	4	100,2	132,79	75,78	4,26

Annexe X Cosinus carrés des variables « Sebkhet El Hamiet »

Variables	F1	F2	F3	F4
CE	0.8742	0.0808	0.0005	0.0007
pH	0.7301	0.0002	0.0146	0.0075
Cl	0.9137	0.0061	0.0042	0.0175
SO₄	0.0573	0.1458	0.0387	0.3734
HCO₃	0.7065	0.0019	0.0380	0.0075
Na	0.7608	0.0102	0.0216	0.0270
Ca	0.8939	0.0642	0.0003	0.0209
Mg	0.9010	0.0517	0.0022	0.0000
K	0.5542	0.0017	0.2107	0.0014
CaCO₃	0.2361	0.2368	0.0664	0.0349
Gypse	0.1608	0.3873	0.0422	0.0907
MO	0.0207	0.3693	0.0867	0.0143
EG	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Argile	0.0057	0.1748	0.7630	0.0266
Limon	0.0104	0.5475	0.3162	0.0140
Sable	0.0340	0.2222	0.3228	0.0016
Profondeur	0.0031	0.0161	0.0664	0.7673

Annexe XI Corrélation entre variables et facteurs « Sebkhet El Hamiet »

Variables	F1	F2	F3	F4
CE	0.9350	0.2843	-0.0228	0.0269
pH	-0.8545	-0.0154	-0.1210	-0.0868
Cl	0.9559	0.0779	-0.0647	-0.1323
SO₄	0.2393	-0.3818	-0.1968	0.6110
HCO₃	-0.8405	-0.0437	-0.1949	-0.0866
Na	0.8722	-0.1011	-0.1471	-0.1643
Ca	0.9455	0.2533	-0.0179	0.1444
Mg	0.9492	0.2273	0.0468	-0.0042
K	0.7444	0.0416	0.4590	-0.0374
CaCO₃	-0.4859	0.4866	0.2576	0.1869
Gypse	0.4010	-0.6224	-0.2053	-0.3012
MO	-0.1438	0.6077	0.2944	-0.1196
EG	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Argile	-0.0757	-0.4180	0.8735	0.1630
Limon	-0.1017	0.7399	-0.5623	-0.1181
Sable	0.1844	-0.4714	-0.5681	-0.0401
Profondeur	0.0556	0.1268	-0.2576	0.8760

Annexe XII Contribution des variables « Sebkhet El Hamiet »

Variables	F1	F2	F3	F4
CE	12.7394	3.4881	0.0261	0.0515
pH	10.6394	0.0103	0.7336	0.5363
Cl	13.3141	0.2619	0.2096	1.2449
SO₄	0.8345	6.2927	1.9420	26.5691
HCO₃	10.2947	0.0825	1.9038	0.5338
Na	11.0863	0.4412	1.0843	1.9204
Ca	13.0265	2.7707	0.0162	1.4845
Mg	13.1299	2.2309	0.1099	0.0012
K	8.0755	0.0746	10.5635	0.0996
CaCO₃	3.4398	10.2221	3.3279	2.4855
Gypse	2.3437	16.7198	2.1135	6.4554
MO	0.3013	15.9401	4.3453	1.0178
EG	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Argile	0.0835	7.5440	38.2576	1.8905
Limon	0.1508	23.6345	15.8558	0.9928
Sable	0.4954	9.5931	16.1842	0.1146
Profondeur	0.0451	0.6935	3.3268	54.6019

Annexe XIII Cosinus carrés des observations « Sebket El Hamiet »

Observation	F1	F2	F3	F4
H11	0.4693	0.0179	0.0203	0.1318
H12	0.8389	0.0079	0.0175	0.0309
H13	0.6288	0.0198	0.0014	0.2544
H21	0.6285	0.0202	0.1584	0.0460
H22	0.6181	0.0054	0.0271	0.1215
H23	0.4699	0.0426	0.0000	0.3612
H31	0.8271	0.0019	0.0165	0.0395
H32	0.3635	0.3574	0.0000	0.0119
H33	0.3560	0.1559	0.0506	0.1295
H41	0.3879	0.1369	0.2755	0.1344
H42	0.2015	0.0080	0.0179	0.0257
H61	0.6238	0.0371	0.1342	0.0404
H62	0.0888	0.1970	0.3617	0.0019
H63	0.0732	0.0979	0.3328	0.1271
H71	0.5461	0.0407	0.0111	0.1019
H72	0.7450	0.0002	0.0037	0.0399
H73	0.5162	0.0426	0.0398	0.0012
H74	0.1151	0.0733	0.0585	0.3808
H81	0.6046	0.0573	0.0043	0.1068
H82	0.6532	0.0021	0.1118	0.0168
H83	0.1128	0.3168	0.4770	0.0488
H91	0.0125	0.1039	0.1846	0.2048
H92	0.1287	0.5974	0.1054	0.0000
H93	0.5181	0.0005	0.1030	0.0488
H101	0.3780	0.2060	0.1640	0.1451
H102	0.7533	0.0365	0.0178	0.0079
H103	0.1095	0.6516	0.0901	0.0000
H111	0.2772	0.2471	0.1782	0.1178
H112	0.5954	0.0465	0.0620	0.0046

Annexe XIV Coordonnées des observations « Sebket El Hamiet »

Observation	F1	F2	F3	F4
H11	-2.7167	-0.5308	0.5654	-1.4396
H12	-3.0841	0.2988	-0.4459	0.5922
H13	-2.9699	-0.5268	0.1389	1.8891
H21	-3.2031	0.5740	1.6082	-0.8663
H22	-2.5226	0.2355	0.5287	1.1183
H23	-2.2195	-0.6682	-0.0070	1.9459
H31	-3.7847	-0.1835	0.5344	-0.8273
H32	-1.6312	-1.6176	0.0099	0.2947
H33	-1.9680	-1.3021	-0.7420	1.1869
H41	-3.4805	2.0678	-2.9331	-2.0485
H42	-1.2234	0.2445	-0.3644	0.4369
H61	-3.6206	0.8824	1.6796	-0.9218
H62	0.8081	-1.2033	1.6308	0.1196
H63	1.1783	1.3630	2.5130	1.5529
H71	2.7436	-0.7493	0.3915	-1.1849
H72	4.1193	-0.0734	0.2895	-0.9532
H73	2.7142	-0.7799	0.7535	-0.1303
H74	1.4340	1.1442	1.0220	2.6077
H81	1.7666	-0.5438	-0.1497	-0.7424
H82	3.2500	0.1824	1.3444	-0.5210
H83	1.7646	2.9569	-3.6279	1.1601
H91	-0.2283	0.6570	0.8758	-0.9223
H92	1.9429	-4.1867	-1.7583	-0.0049
H93	2.5838	-0.0832	-1.1523	0.7928
H101	2.7211	2.0087	1.7921	-1.6856
H102	3.1462	-0.6922	-0.4842	-0.3230
H103	1.4049	3.4278	-1.2749	-0.0211
H111	-2.1264	-2.0079	-1.7053	-1.3866
H112	3.2016	-0.8944	-1.0327	0.2816

Annexe XV Cosinus carrés des variables « Chott El Frain »

Variables	F1	F2	F3	F4
CE	0.9804	0.0014	0.0024	0.0005
pH	0.1831	0.0195	0.5598	0.0033
Cl	0.9664	0.0022	0.0045	0.0015
SO₄	0.9377	0.0020	0.0010	0.0131
HCO₃	0.0061	0.0100	0.6685	0.1198
Na	0.9063	0.0056	0.0076	0.0042
Ca	0.9475	0.0010	0.0030	0.0001
Mg	0.9701	0.0016	0.0026	0.0002
K	0.8225	0.0002	0.0089	0.0037
CaCO₃	0.0382	0.8708	0.0060	0.0035
Gypse	0.0110	0.4880	0.0090	0.1197
MO	0.2178	0.3451	0.0412	0.1386
EG	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Argile	0.0168	0.6336	0.0148	0.2391
Limon	0.1797	0.5189	0.0003	0.1023
Sable	0.2489	0.1454	0.0777	0.2027
Profondeur	0.0251	0.5702	0.0751	0.1642

Annexe XVI Corrélation entre variables et facteurs «Chott El Frain»

Variables	F1	F2	F3	F4
CE	0.9539	-0.2669	0.0696	0.0807
pH	-0.7677	-0.4224	0.0126	0.1224
Cl	0.9403	-0.2902	0.0763	0.0603
SO₄	0.9378	-0.0781	-0.0679	0.1593
HCO₃	-0.5343	-0.5977	0.3228	0.0138
Na	0.8765	-0.3423	0.1041	0.1431
Ca	0.9449	-0.1449	-0.1151	-0.0397
Mg	0.9467	-0.2861	0.0841	0.0478
K	0.8410	-0.2866	-0.2549	0.0581
CaCO₃	0.1395	0.7154	-0.0253	0.4357
Gypse	0.4701	-0.1521	-0.5483	-0.4791
MO	-0.2081	-0.3886	-0.3352	-0.4825
EG	0.4182	-0.1297	0.7639	-0.2191
Argile	0.6074	0.7195	0.0760	-0.1496
Limon	-0.6011	-0.6806	0.0315	-0.0706
Sable	-0.2611	-0.3156	-0.3824	0.6684
Profondeur	-0.0895	0.8667	-0.0540	-0.1674

Annexe XVII Contribution des variables «Chott El Frain»

Variables	F1	F2	F3	F4
CE	13.1459	0.0389	0.1636	0.0480
pH	2.4547	0.5406	37.7638	0.2961
Cl	12.9591	0.0620	0.3022	0.1386
SO₄	12.5743	0.0546	0.0668	1.1709
HCO₃	0.0815	0.2773	45.0962	10.7281
Na	12.1528	0.1554	0.5098	0.3772
Ca	12.7058	0.0263	0.2027	0.0074
Mg	13.0079	0.0446	0.1731	0.0155
K	11.0296	0.0049	0.6009	0.3350
CaCO₃	0.5120	24.0839	0.4056	0.3105
Gypse	0.1472	13.4981	0.6092	10.7203
MO	2.9208	9.5454	2.7762	12.4129
EG	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Argile	0.2253	17.5246	1.0007	21.4137
Limon	2.4101	14.3525	0.0190	9.1613
Sable	3.3371	4.0217	5.2431	18.1564
Profondeur	0.3359	15.7692	5.0671	14.7084

Annexe XVIII Cosinus carrés des observations «Chott El Frain»

Observation	F1	F2	F3	F4
F11	0.2969	0.4070	0.0093	0.0063
F12	0.4187	0.1491	0.1588	0.0271
F13	0.0093	0.0065	0.2539	0.0172
F14	0.5925	0.0566	0.0025	0.0508
F21	0.3120	0.3620	0.0389	0.1390
F22	0.5863	0.1065	0.1434	0.0309
F23	0.6819	0.0289	0.0434	0.0209
F24	0.5964	0.0315	0.0601	0.2279
F31	0.6903	0.1934	0.0145	0.0000
F32	0.8271	0.0256	0.0247	0.0790
F33	0.6134	0.1336	0.0788	0.0672
F34	0.2217	0.0614	0.3070	0.3065
F41	0.1769	0.0311	0.2729	0.0942
F42	0.0850	0.0887	0.6073	0.0005
F43	0.2461	0.5412	0.1299	0.0079
F44	0.1120	0.6810	0.0433	0.0002
F51	0.6578	0.1464	0.0033	0.0604
F52	0.5625	0.0017	0.0001	0.0274
F53	0.2839	0.6262	0.0074	0.0198
F61	0.5249	0.3514	0.0001	0.0551
F62	0.2885	0.1836	0.1618	0.1671
F63	0.2426	0.7262	0.0141	0.0011
F71	0.6474	0.2789	0.0193	0.0157
F72	0.1068	0.1611	0.2843	0.2284
F73	0.3990	0.0680	0.1591	0.0018
F81	0.5020	0.3204	0.1326	0.0001
F82	0.1740	0.0498	0.2416	0.3168
F83	0.3699	0.4521	0.0011	0.0615

Annexe XIX Coordonnées des observations «Chott El Frain»

Observation	F1	F2	F3	F4
F11	1.4926	-1.7477	-0.2639	0.2174
F12	2.2972	-1.3710	1.4148	0.5840
F13	-0.1600	0.1335	0.8367	-0.2175
F14	3.3313	1.0293	0.2143	-0.9753
F21	1.5785	-1.7002	-0.5574	1.0536
F22	3.0986	-1.3208	-1.5323	0.7111
F23	2.9651	0.6105	-0.7482	-0.5190
F24	3.3113	0.7607	1.0515	-2.0469
F31	3.8832	-2.0553	0.5633	-0.0037
F32	5.1740	-0.9095	-0.8933	1.5985
F33	4.2310	1.9742	1.5169	1.3999
F34	1.4777	0.7775	1.7388	-1.7374
F41	1.0212	0.4279	-1.2682	0.7451
F42	-0.9856	1.0066	-2.6339	0.0781
F43	-1.6176	2.3989	-1.1751	0.2897
F44	-1.1572	2.8534	0.7192	0.0446
F51	-3.8556	-1.8192	0.2716	1.1682
F52	-1.9747	0.1101	0.0266	-0.4361
F53	-2.0483	3.0421	0.3313	0.5406
F61	-3.4672	-2.8369	-0.0512	1.1232
F62	-1.7253	-1.3762	1.2920	-1.3130
F63	-2.0422	3.5335	-0.4921	0.1399
F71	-3.5831	-2.3518	0.6182	0.5586
F72	-1.4731	-1.8092	-2.4038	-2.1543
F73	-2.3704	0.9786	1.4969	-0.1592
F81	-3.2925	-2.6306	1.6921	0.0446
F82	-1.3719	-0.7339	-1.6166	-1.8510
F83	-2.7368	3.0255	-0.1485	1.1161

Annexe XX Cosinus carrés des variables « Sebket Bazer »

Variables	F1	F2	F3	F4
CE	0.9599	0.0055	0.0038	0.0000
pH	0.5957	0.0163	0.0785	0.0244
Cl	0.9403	0.0054	0.0006	0.0001
SO₄	0.9647	0.0017	0.0135	0.0000
HCO₃	0.4718	0.0024	0.1382	0.0407
Na	0.9179	0.0010	0.0000	0.0000
Ca	0.8904	0.0128	0.0147	0.0014
Mg	0.9571	0.0065	0.0027	0.0000
K	0.9063	0.0377	0.0160	0.0000
CaCO₃	0.0201	0.0435	0.6927	0.0325
Gypse	0.0448	0.1281	0.1966	0.1801
MO	0.0084	0.0124	0.0497	0.7285
EG	0.3430	0.0065	0.0447	0.2797
Argile	0.0761	0.7458	0.1527	0.0027
Limon	0.0000	0.6518	0.0030	0.0161
Sable	0.1155	0.2775	0.3746	0.0007
Profondeur	0.0001	0.2339	0.2779	0.1872

Annexe XXI Corrélation entre variables et facteurs « Sebket Bazer »

Variables	F1	F2	F3	F4
CE	0.9797	0.0741	-0.0614	0.0030
pH	-0.7718	-0.1277	-0.2802	0.1562
Cl	0.9697	0.0735	-0.0250	-0.0079
SO₄	0.9822	0.0416	-0.1161	-0.0061
HCO₃	-0.6868	0.0486	-0.3718	0.2018
Na	0.9581	-0.0323	0.0066	-0.0009
Ca	0.9436	0.1133	-0.1211	-0.0376
Mg	0.9783	0.0806	-0.0515	0.0038
K	0.9520	0.1942	-0.1266	0.0052
CaCO₃	0.1420	-0.2086	0.8323	-0.1803
gypse	-0.2117	0.3579	-0.4434	-0.4244
MO	-0.0915	0.1115	0.2230	0.8535
EG	0.5857	-0.0808	0.2114	0.5289
Argile	-0.2759	0.8636	0.3908	-0.0521
Limon	0.0051	-0.8073	0.0548	0.1267
Sable	0.3399	-0.5268	-0.6120	-0.0257
Profondeur	-0.0109	0.4836	-0.5272	0.4326

Annexe XXII Contribution des variables «Sebkhet Bazer»

Variables	F1	F2	F3	F4
CE	11.6886	0.2512	0.1832	0.0006
pH	7.2536	0.7450	3.8126	1.6337
Cl	11.4506	0.2470	0.0303	0.0041
SO₄	11.7473	0.0790	0.6540	0.0025
HCO₃	5.7446	0.1081	6.7112	2.7266
Na	11.1777	0.0477	0.0021	0.0001
Ca	10.8425	0.5868	0.7118	0.0945
Mg	11.6543	0.2971	0.1288	0.0010
K	11.0358	1.7223	0.7784	0.0018
CaCO₃	0.2454	1.9880	33.6271	2.1765
Gypse	0.5456	5.8514	9.5425	12.0533
MO	0.1019	0.5682	2.4138	48.7573
EG	4.1766	0.2984	2.1692	18.7201
Argile	0.9272	34.0705	7.4151	0.1817
limon	0.0003	29.7755	0.1460	1.0749
Sable	1.4066	12.6787	18.1825	0.0442
Profondeur	0.0014	10.6852	13.4913	12.5272

Annexe XXIII Cosinus carrés des observations « Sebkhet Bazer»

Observation	F1	F2	F3	F4
B11	0.7148	0.0328	0.0698	0.0018
B12	0.4987	0.0880	0.1704	0.0011
B21	0.9722	0.0005	0.0026	0.0001
B22	0.2898	0.5521	0.0040	0.0017
B31	0.2780	0.2002	0.0709	0.0350
B32	0.3616	0.0814	0.0911	0.0300
B33	0.0615	0.7232	0.0878	0.0214
B41	0.0611	0.2417	0.0305	0.0297
B42	0.1588	0.0025	0.1396	0.1544
B51	0.3321	0.0340	0.0995	0.1508
B52	0.3035	0.1050	0.1068	0.0848
B53	0.0664	0.1332	0.5505	0.0133
B54	0.0836	0.0581	0.6760	0.0024
B55	0.1059	0.0564	0.6876	0.0143
B61	0.1888	0.5833	0.0091	0.0001
B62	0.0632	0.2059	0.1222	0.1392
B71	0.4230	0.0651	0.1999	0.1851
B72	0.0964	0.0222	0.1740	0.2738
B73	0.1235	0.5560	0.1275	0.0178
B74	0.3236	0.0318	0.4289	0.0094
B81	0.2329	0.1012	0.5796	0.0151
B82	0.3096	0.0269	0.4960	0.0514
B83	0.3663	0.0165	0.1563	0.0426
B84	0.0622	0.0216	0.0256	0.8093

Annexe XXIV Coordonnées des observations «Sebkhet Bazer»

Observation	F1	F2	F3	F4
B11	5.0397	-1.0803	1.5743	0.2523
B12	3.0213	-1.2690	-1.7664	-0.1405
B21	10.6251	-0.2471	0.5546	0.1181
B22	2.2099	3.0502	-0.2604	-0.1696
B31	-2.0377	-1.7293	-1.0290	0.7233
B32	1.4557	-0.6907	-0.7309	-0.4191
B33	0.9625	3.3015	-1.1505	-0.5674
B41	-0.7430	-1.4776	0.5252	-0.5182
B42	-1.1435	-0.1444	1.0721	1.1274
B51	-1.5623	-0.4999	0.8552	-1.0527
B52	-1.8273	1.0746	-1.0841	-0.9658
B53	-0.5454	-0.7724	-1.5702	-0.2442
B54	-0.9176	-0.7649	-2.6100	-0.1540
B55	-0.8620	-0.6293	-2.1967	0.3172
B61	-1.0882	-1.9126	0.2386	-0.0224
B62	-0.6481	1.1700	-0.9014	0.9621
B71	-1.6904	-0.6633	1.1621	-1.1181
B72	-0.9789	0.4695	1.3154	-1.6498
B73	-1.5540	3.2976	1.5792	-0.5901
B74	-1.6059	0.5031	-1.8489	-0.2737
B81	-1.3967	-0.9204	2.2031	-0.3556
B82	-1.6414	-0.4839	2.0776	-0.6689
B83	-1.7364	-0.3688	1.1343	0.5922
B84	-1.3351	0.7873	0.8568	4.8176

Annexe XXV Cosinus carrés des variables « Chott El Beida »

Variables	F1	F2	F3	F4
CE	0.9100	0.0712	0.0049	0.0065
pH	0.5894	0.1784	0.0002	0.0150
Cl	0.8842	0.0842	0.0058	0.0036
SO ₄	0.8795	0.0061	0.0046	0.0254
HCO ₃	0.2855	0.3572	0.1042	0.0002
Na	0.7683	0.1172	0.0108	0.0205
Ca	0.8928	0.0210	0.0132	0.0016
Mg	0.8962	0.0818	0.0071	0.0023
K	0.7072	0.0822	0.0650	0.0034
CaCO ₃	0.0194	0.5117	0.0006	0.1899
Gypse	0.2210	0.0231	0.3006	0.2295
MO	0.0433	0.1510	0.1124	0.2328
EG	0.1749	0.0168	0.5836	0.0480
Argile	0.3689	0.5177	0.0058	0.0224
Limon	0.3614	0.4633	0.0010	0.0050
Sable	0.0682	0.0996	0.1462	0.4467
Profondeur	0.0080	0.7511	0.0029	0.0280

Annexe XXVI Corrélation entre variables et facteurs «Chott El Beida»

Variables	F1	F2	F3	F4
CE	0.9539	-0.2669	0.0696	0.0807
pH	-0.7677	-0.4224	0.0126	0.1224
Cl	0.9403	-0.2902	0.0763	0.0603
SO ₄	0.9378	-0.0781	-0.0679	0.1593
HCO ₃	-0.5343	-0.5977	0.3228	0.0138
Na	0.8765	-0.3423	0.1041	0.1431
Ca	0.9449	-0.1449	-0.1151	-0.0397
Mg	0.9467	-0.2861	0.0841	0.0478
K	0.8410	-0.2866	-0.2549	0.0581
CaCO ₃	0.1395	0.7154	-0.0253	0.4357
Gypse	0.4701	-0.1521	-0.5483	-0.4791
MO	-0.2081	-0.3886	-0.3352	-0.4825
EG	0.4182	-0.1297	0.7639	-0.2191
Argile	0.6074	0.7195	0.0760	-0.1496
Limon	-0.6011	-0.6806	0.0315	-0.0706
Sable	-0.2611	-0.3156	-0.3824	0.6684
Profondeur	-0.0895	0.8667	-0.0540	-0.1674

Annexe XXVII Contribution des variables «Chott El Beida»

Variables	F1	F2	F3	F4
CE	11.2642	2.0155	0.3543	0.5080
pH	7.2958	5.0496	0.0116	1.1699
Cl	10.9459	2.3835	0.4252	0.2837
SO₄	10.8869	0.1726	0.3369	1.9811
HCO₃	3.5345	10.1090	7.6137	0.0148
Na	9.5108	3.3161	0.7917	1.5982
Ca	11.0519	0.5940	0.9679	0.1234
Mg	11.0942	2.3159	0.5172	0.1783
K	8.7546	2.3248	4.7454	0.2634
CaCO₃	0.2407	14.4812	0.0469	14.8247
Gypse	2.7355	0.6550	21.9620	17.9226
MO	0.5361	4.2738	8.2101	18.1804
EG	2.1653	0.4760	42.6285	3.7476
Argile	4.5670	14.6495	0.4222	1.7484
Limon	4.4734	13.1102	0.0724	0.3895
Sable	0.8439	2.8184	10.6813	34.8775
Profondeur	0.0992	21.2549	0.2126	2.1885

Annexe XXVIII Cosinus carrés des observations «Chott El Beida»

Observation	F1	F2	F3	F4
C11	0.7800	0.0715	0.0412	0.0329
C12	0.8350	0.0446	0.0508	0.0000
C21	0.5540	0.0006	0.1173	0.0182
C22	0.2531	0.0234	0.1667	0.1421
C31	0.5703	0.2257	0.0774	0.0085
C32	0.3113	0.0537	0.1058	0.0705
C33	0.1977	0.2335	0.1256	0.0420
C34	0.1762	0.3884	0.0722	0.1696
C41	0.0880	0.0790	0.3376	0.2457
C42	0.0420	0.3852	0.2666	0.0442
C43	0.0212	0.3148	0.2223	0.1109
C51	0.0064	0.8024	0.0629	0.0118
C52	0.1473	0.0092	0.2856	0.0311
C53	0.2189	0.4156	0.0034	0.0454
C54	0.0757	0.6406	0.0617	0.0794
C61	0.5699	0.1490	0.0499	0.1629
C62	0.1356	0.0112	0.0137	0.1711
C63	0.3590	0.2282	0.1249	0.0352
C71	0.7768	0.1434	0.0402	0.0007
C72	0.5307	0.2095	0.1127	0.0058
C73	0.0287	0.5991	0.0057	0.0010
C81	0.7758	0.1449	0.0170	0.0171
C82	0.3106	0.0957	0.0589	0.0536
C83	0.1141	0.0469	0.0545	0.3652

Annexe XXIX Coordonnées des observations «Chott El Beida»

Observation	F1	F2	F3	F4
C11	5.4685	-1.6558	1.2572	1.1236
C12	6.2522	-1.4449	1.5423	-0.0189
C21	2.0553	0.0703	0.9459	0.3728
C22	1.0552	0.3209	0.8565	0.7907
C31	4.3784	-2.7546	-1.6130	-0.5335
C32	1.0163	-0.4219	-0.5926	0.4836
C33	0.8631	0.9380	0.6881	-0.3977
C34	2.0008	2.9706	-1.2807	1.9630
C41	1.2966	-1.2283	-2.5396	-2.1666
C42	-0.4398	1.3322	1.1084	0.4511
C43	0.5914	2.2789	-1.9152	-1.3526
C51	-0.3422	-3.8373	-1.0748	0.4656
C52	-0.6610	-0.1654	0.9205	-0.3037
C53	-0.8439	1.1627	-0.1058	0.3844
C54	-1.1449	3.3301	-1.0337	1.1723
C61	-4.9267	-2.5194	-1.4579	2.6344
C62	-0.9431	0.2710	-0.3002	-1.0594
C63	-1.5190	1.2110	0.8959	-0.4760
C71	-5.2207	-2.2431	1.1878	-0.1515
C72	-1.4338	0.9009	0.6608	0.1504
C73	-0.4559	2.0820	-0.2039	-0.0831
C81	-4.6802	-2.0227	0.6937	-0.6956
C82	-1.0779	0.5982	0.4692	-0.4476
C83	-1.2885	0.8265	0.8910	-2.3058

Annexe XXX. Facteurs de concentration et indices de saturation « Sebket El Hamiet »

Echantillon	FC	log (FC)	IS	IS	IS	IS	IS	IS
			Calcite	Aragonite	Dolomite	Gypse	Anhydrite	Halite
H11	2,55	0,41	0,54	0,39	1,27	-0,12	-0,42	-3,66
H12	54,35	1,74	1,03	0,89	1,93	0,8	0,54	-1,68
H21	52,49	1,72	1,03	0,89	1,93	0,8	0,54	-1,68
H22	60,77	1,78	1,44	1,29	2,87	0,83	0,58	-1,53
H23	44,56	1,65	1,51	1,36	2,85	0,7	1,36	-1,9
H31	28,83	1,46	1,44	1,3	2,76	0,67	0,39	-2,26
H32	40,77	1,61	1,28	1,14	2,41	0,87	0,6	-1,82
H33	48,28	1,68	1,2	1,06	2,34	0,74	0,48	-1,81
H41	40,08	1,60	1,5	1,35	2,93	0,73	0,47	-1,89
H42	48,28	1,68	1,3	1,15	2,57	0,85	0,58	-1,84
H43	41,31	1,62	1,48	1,34	2,83	0,93	0,66	-2,04
H51	63,81	1,80	1,31	1,16	2,57	0,62	0,37	-1,47
H52	71,73	1,86	1,23	1,08	2,43	0,88	0,63	-1,37
H53	36,04	1,56	1,17	1,03	2,31	0,74	0,46	-2,11
H54	32,34	1,51	1,43	1,28	2,72	1,11	0,84	-2,09
H61	1,79	0,25	0,81	0,66	1,7	-0,24	-0,54	-3,88
H62	24,08	1,38	1,44	1,3	2,77	0,7	0,42	-2,48
H63	24,69	1,39	0,93	0,78	1,66	0,75	0,47	-2,62
H81	7,79	0,89	1	0,86	2,27	-0,33	-0,62	-3
H82	9,38	0,97	1,23	1,09	2,28	0,46	0,16	-3,06
H91	1,00	0,00	1,08	0,93	2,21	-0,15	-0,46	-4,16
H92	5,59	0,75	1,38	1,24	2,52	0,61	0,32	-3,18
H93	5,97	0,78	1,62	1,48	3,01	0,66	0,37	-3,17
H101	2,14	0,33	0,45	0,31	1,49	-0,49	-0,79	-3,87
H102	5,66	0,75	1,5	1,35	2,66	0,64	0,35	-3,3
H103	6,07	0,78	1,44	1,3	2,52	0,74	0,44	-3,27
H111	1,00	0,00	1,44	1,3	2,52	0,74	0,44	-3,27
H112	1,04	0,01	1,16	1,02	0,35	1,84	0,05	-4,2
H113	2,83	0,45	1,34	1,19	2,18	0,56	0,26	-3,66

Annexe XXXI. Facteurs de concentration et indices de saturation « Chott El Frain »

Echantillon	FC	log (FC)	IS	IS	IS	IS	IS	IS
			Calcite	Aragonite	Dolomite	Gypse	Anhydrite	Halite
F11	44,07	1,64	1,58	1,44	3,1	0,87	0,58	-2,69
F12	55,51	1,74	1,82	1,68	3,54	0,87	0,58	-2,41
F13	26,35	1,42	1,59	1,45	2,96	0,61	0,32	-2,97
F14	74,86	1,87	1,41	1,26	2,9	0,9	0,63	-2,1
F21	39,57	1,60	1,48	1,34	2,86	0,82	0,54	-2,55
F22	57,22	1,76	1,28	1,14	2,48	0,87	0,59	-2,34
F23	61,15	1,79	1,55	1,41	2,98	0,93	0,65	-2,32
F24	61,51	1,79	1,56	1,42	3,13	0,87	0,6	-2,2
F31	68,14	1,83	1,67	1,53	3,27	0,99	0,72	-2,19
F32	92,59	1,97	1,36	1,22	2,82	0,91	0,65	-1,9
F33	75,86	1,88	1,83	1,69	3,65	0,94	0,67	-1,99
F34	46,79	1,67	1,81	1,66	3,5	0,9	0,62	-2,64
F41	35,00	1,54	1,49	1,34	2,73	0,84	0,55	-2,83
F42	15,43	1,19	0,92	0,78	1,79	0,46	0,16	-3,38
F43	8,00	0,90	1,25	1,1	2,26	0,55	0,25	-3,99
F44	14,43	1,16	1,58	1,43	2,97	0,51	0,22	-3,54
F51	1,71	0,23	1,3	1,16	2,36	-0,74	-1,05	-4,76
F52	13,57	1,13	1,35	1,21	2,39	0,43	0,13	-3,39
F53	7,71	0,89	1,4	1,26	2,61	0,27	-0,03	-4,02
F61	1,00	0,00	1,04	0,89	1,89	-1	-1,3	-4,75
F62	10,72	1,03	1,62	1,47	3,03	0,48	0,18	-3,61
F63	8,29	0,92	1,35	1,21	2,39	0,38	0,08	-4,01
F71	1,50	0,18	1,35	1,21	2,39	0,38	0,08	-4,01
F72	14,64	1,17	1,17	1,03	2,2	0,41	0,12	-3,39
F73	9,64	0,98	1,17	1,03	2,2	0,41	0,12	-3,39
F81	2,86	0,46	1,17	1,03	2,2	0,41	0,12	-3,39
F82	11,50	1,06	1,07	0,93	2,07	0,33	0,03	-3,51
F83	4,64	0,67	1,17	1,02	2,29	-0,51	-0,81	-4,36

Annexe XXXII. Facteurs de concentration et indices de saturation « Sebket Bazer »

Echantillon	FC	log FC	IS	IS	IS	IS	IS	IS
			Calcite	Aragonite	Dolomite	Gypse	Anhydrite	Halite
B11	107,33	2,03	0,43	0,28	0,76	0,65	0,36	-3,07
B12	109,96	2,04	1,28	1,14	2,31	0,7	0,41	-3,11
B21	363,15	2,56	0,53	0,38	1,13	0,88	0,61	-2,03
B22	119,64	2,08	1,22	1,07	2,21	0,55	0,25	-3,1
B31	2,33	0,37	1,11	0,97	1,95	-1,26	-1,56	-5,16
B32	65,98	1,82	0,99	0,85	1,62	0,46	0,16	-3,43
B33	59,98	1,78	0,94	0,8	1,71	0,34	0,04	-3,58
B41	2,00	0,30	0,25	0,11	0,19	-1,6	-1,91	-5,16
B42	3,33	0,52	0,38	0,24	0,97	-1,15	-1,46	-5,08
B51	2,00	0,30	0,31	0,16	0,39	-1,36	-1,66	-5,17
B52	10,66	1,03	0,89	0,75	2,17	-0,86	-1,16	-4,85
B53	17,33	1,24	0,95	0,81	1,72	-0,05	-0,35	-4,44
B54	14,66	1,17	0,96	0,81	1,73	-0,23	-0,53	-4,36
B55	16,32	1,21	1,14	0,99	2,09	-0,06	-0,36	-4,5
B61	1,67	0,22	0,68	0,53	0,63	-0,97	-1,27	-5,33
B62	15,66	1,19	0,76	0,62	1,62	-0,38	-0,68	-4,3
B71	1,33	0,12	0,68	0,54	0,67	-1,6	-1,9	-5,44
B72	6,66	0,82	0,28	0,14	0,27	-0,56	-0,86	-5,19
B73	10,66	1,03	0,89	0,74	1,45	-0,42	-0,72	-5,05
B74	5,00	0,70	0,67	0,53	1,43	-0,85	-1,16	-5,1
B81	1,33	0,12	0,7	0,56	0,55	-1,22	-1,52	-5,4
B82	1,00	0,00	0,38	0,23	0,39	-1,79	-2,1	-6,02
B83	2,67	0,43	0,26	0,12	0,48	-1,79	-2,09	-5,6
B84	5,00	0,70	0,69	0,55	1,39	-0,82	-1,12	-5,11

Annexe XXXIII. Facteurs de concentration et indices de saturation « Chott El Beida »

Echantillon	FC	log FC	IS Calcite	IS Aragonite	IS Dolomite	IS Gypse	IS Anhydrite	IS Halite
C11	45,04	1,65	1,61	1,47	3,33	0,87	0,6	-1,88
C12	45,84	1,66	1,04	0,9	2,15	0,86	0,59	-1,99
C21	22,60	1,35	1,23	1,09	2,4	0,78	0,49	-2,65
C22	21,56	1,33	1,5	1,36	2,95	0,66	0,38	-2,66
C31	34,16	1,53	1,6	1,46	3,18	0,86	0,59	-2,26
C32	20,20	1,31	1,52	1,38	3,05	0,69	0,4	-2,71
C33	16,68	1,22	1,37	1,23	2,59	0,67	0,37	-3,09
C34	17,52	1,24	1,37	1,23	2,51	0,84	0,55	-2,99
C41	18,76	1,27	1,4	1,25	2,6	0,78	0,49	-2,78
C42	10,00	1,00	1,21	1,06	2,41	0,48	0,19	-3,19
C43	15,20	1,18	1,05	0,91	1,98	0,5	0,21	-3,01
C51	20,16	1,30	1,82	1,67	3,53	0,74	0,45	-2,75
C52	9,96	1,00	1,66	1,52	3,2	0,58	0,28	-3,22
C53	9,32	0,97	1,47	1,32	2,62	0,64	0,35	-3,43
C54	6,04	0,78	0,97	0,82	1,82	0,23	-0,07	-3,39
C61	1,00	0,00	1,45	1,3	2,85	-0,03	-0,33	-4,48
C62	10,04	1,00	1,67	1,52	3,12	0,5	0,2	-3,48
C63	8,36	0,92	1,49	1,34	2,78	0,51	0,21	-3,56
C71	1,16	0,06	1,42	1,28	3	-0,59	-0,89	-4,55
C72	8,32	0,92	1,45	1,3	2,78	0,44	0,14	-3,38
C73	8,08	0,91	1,38	1,23	2,51	0,68	0,38	-3,52
C81	2,44	0,39	1,58	1,43	3,08	-0,66	-0,96	-4,15
C82	8,08	0,91	1,65	1,5	3,1	0,58	0,28	-3,38
C83	8,24	0,92	1,45	1,3	2,78	0,42	0,12	-3,58

Annexe XXXIV. Calcul des alcalinités résiduelles « Sebkhet El Hamiet »

Echantillon	ARc	ARc+a	ARc+a+d	ARc+a+d+g	ARc+a+d+g+a
H11	-28,86	-61,82	-136,42		
H12	-741,6	-1486,5	-2572,24	-2183,84	-1795,44
H21	-802,24	-1607,98	-2942,76	-2806,76	-2670,76
H22	-757,8	-1519,2	-2737,4	-2283	-1828,6
H23	-756,36	-1516,32	-2601,68	-2320,48	-2039,28
H31	-460,36	-924,42	-1630,8	-1292	-953,2
H32	-444,5	-892,5	-1554,1	-834,9	-115,7
H33	-711,02	-1425,44	-2526,02	-2181,62	-1837,22
H41	-646,16	-1296,02	-2305,8	-1941	-1576,2
H42	-804,86	-1613,32	-2900,9	-2486,1	-2071,3
H43	-916,36	-1836,32	-3198,16	-2772,96	-2347,76
H51	-584,82	-1173,14	-2074,78	-1735,98	-1397,18
H52	-815,9	-1635,2	-2911,18	-2411,18	-1911,18
H53	-601,76	-1206,72	-2185,44	-1825,44	-1465,44
H54	-720,36	-1444,22	-2538,88	-1716,08	-893,28
H61	-23,12	-50,44	-104,8	-	-
H62	-523,02	-1049,74	-1854,58	-1539,38	-1224,18
H63	-661,8	-1326,7	-2280,44	-1994,84	-1709,24
H81	-23,54	-51,58	-118,5	-	-
H82	-237,76	-479,02	-835,28	-606,48	-377,68
H91	-27,12	-58,64	-119,6	-	-
H92	-183,84	-371,68	-644	-160,4	323,2
H93	-204,78	-413,76	-719,3	-217,3	284,7
H101	-12,02	-27,94	-93,48	-	-
H102	-193,42	-390,64	-659,94	-212,74	234,46
H103	-221,2	-446,6	-751,52	-204,32	342,88
H111	-12,64	-29,08	-61,88	127,32	316,52
H112	-85,72	-175,74	-290,16	54,24	398,64
H113	-132,48	-269,36	-442,88	44,32	531,52

Annexe XXXV. Calcul des alcalinités résiduelles « Chott El Frain »

Echantillon	ARc	ARc+a	ARc+a+d	ARc+a+d+g	ARc+a+d+g+a
F11	-637,1	-1278	-2302,26	-1890,46	-1478,66
F12	-757,8	-1519,8	-2683	-2298,2	-1913,4
F13	-399	-802,1	-1376,96	-1130,96	-884,96
F14	-715,74	-1435,28	-2728,34	-2216,34	-1704,34
F21	-664,7	-1333,2	-2361,06	-1991,66	-1622,26
F22	-760,58	-1524,56	-2701,62	-2300,42	-1899,22
F23	-809,98	-1623,16	-2839,1	-2401,3	-1963,5
F24	-748,02	-1499,74	-2743,34	-2302,34	-1861,34
F31	-900,52	-1804,84	-3205,48	-2702,28	-2199,08
F32	-798,44	-1600,38	-3037,08	-2519,88	-2002,68
F33	-860,86	-1725,82	-3130,78	-2635,78	-2140,78
F34	-653,02	-1309,94	-2321,58	-1884,38	-1447,18
F41	-687,6	-1378,7	-2343,28	-2016,48	-1689,68
F42	-239,52	-482,24	-882,8	-665,52	-448,24
F43	-216,16	-435,82	-756,8	-521,14	-285,48
F44	-255,54	-514,88	-902,22	-684,84	-467,46
F51	-43,26	-90,22	-157,14		
F52	-227,06	-458,02	-771,98	-586,5	-401,02
F53	-147,02	-297,94	-523,38	-385,48	-247,58
F61	-35,58	-75,06	-133,38		
F62	-224,26	-452,52	-789,46	-580,7	-371,94
F63	-224,76	-453,32	-765,6	-630,44	-495,28
F71	-27,7	-59,2	-111,02	-74,12	-37,22
F72	-229,7	-461,4	-814,86	-628,38	-441,9
F73	-251,88	-508,26	-865,64	-653,32	-441
F81	-21,06	-46,42	-91,94	-75,04	-58,14
F82	-168,28	-339,76	-621,24	-439,74	-258,24
F83	-55,58	-115,06	-214,5		

Annexe XXXVI. Calcul des alcalinités résiduelles « Sebkhet Bazer »

Echantillon	ARc	ARc+a	ARc+a+d	ARc+a+d+g	ARc+a+d+g+a
B11	-366,12	-734,44	-1318,56	-1023,36	-728,16
B12	-493,74	-990,98	-1687,54	-1427,02	-1166,5
B21	-722,24	-1446,98	-2723,76	-2236,96	-1750,16
B22	-451,5	-906,4	-1548,98	-1362,12	-1175,26
B31	-10,62	-25,74	-46,9	-	-
B32	-256,08	-515,76	-857,56	-678,56	-499,56
B33	-221,16	-445,72	-779,84	-634,98	-490,12
B41	-9,08	-20,76	-36,68	-	-
B42	-9,38	-22,66	-52,2	-	-
B51	-10,6	-24,9	-45,66	-	-
B52	-20,98	-45,96	-117,12	-	-
B53	-82,4	-168,3	-297,72	-	-
B54	-61,22	-126,24	-223,82	-	-
B55	-74,96	-153,72	-272,88	-	-
B61	-23,28	-50,36	-81,32	-	-
B62	-41,38	-86,56	-174,14	-	-
B71	-13,64	-30,88	-50,72	--	-
B72	-32,52	-68,24	-117,92	-	-
B73	-53,48	-110,56	-188,2	-	-
B74	-19,38	-42,56	-87	-	-
B81	-22,2	-47,8	-76,04	-	-
B82	-3,78	-10,96	-20,5	-	-
B83	-2,24	-8,28	-18,42	-	-
B84	-19,36	-42,52	-83,66	-	-

Annexe XXXVII. Calcul des alcalinités résiduelles « Chott El Beida »

Echantillon	ARc	ARc+a	ARc+a+d	ARc+a+d+g	ARc+a+d+g+a
C11	-704,26	-1412,02	-1556,18	-1112,18	-668,18
C12	-757,56	-1518,22	-1709,28	-1258,28	-807,28
C21	-516,62	-1036,84	-1243,74	-866,74	-489,74
C22	-453,26	-910,42	-1082,58	-776,38	-470,18
C31	-703,58	-1411,06	-1669,34	-1233,34	-797,34
C32	-439,7	-882,6	-1009,38	-672,38	-335,38
C33	-490,2	-983,9	-1231,4	-980	-728,6
C34	-602,04	-1206,98	-1560,56	-1214,96	-869,36
C41	-599,76	-1202,92	-1540,8	-1228,2	-915,6
C42	-249,56	-502,72	-570,36	-323,94	-77,52
C43	-368,18	-738,36	-910,74	-710,74	-510,74
C51	-486,96	-978,02	-1193,8	-857,2	-520,6
C52	-325,62	-655,04	-803,74	-554,92	-306,1
C53	-364,46	-732,72	-970,54	-731,32	-492,1
C54	-109,56	-222,02	-268,6	-59,78	
C61	-56,5	-117,5	-134,5		
C62	-314,18	-632,56	-807,22	-622,4	-437,58
C63	-267,96	-539,72	-681	-476,18	-271,36
C71	-22,38	-49,56	-46,46		
C72	-219,94	-443,48	-537,66	-328,22	-118,78
C73	-325,02	-653,24	-839,3	-552	-264,7
C81	-56,56	-117,52	-140,68		
C82	-285,82	-575,84	-728,34	-480,02	-231,7
C83	-261,58	-527,16	-641,18	-469,48	-297,78