

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Université Ferhat Abbas Sétif 1
Faculté des Sciences de la
Nature et de la Vie



جامعة فرحات عباس - سطيف 1
كلية علوم الطبيعة و الحياة

N°...../SA/SNV/2024

DEPARTEMENT DES SCIENCES AGRONOMIQUES

Thèse

Présentée par :

Salah BELGHEMMAZ

Pour l'obtention du diplôme de

Doctorat en Sciences

Filière : Sciences Agronomiques

Spécialité: **Science du Sol**

Caractérisation, Typologie et Monitoring des Sols de la région des Ziban- Biskra

Soutenue le : 02-07-2025

Devant le Jury

Président :	Pr MEBARKIA Amor	UFA Ferhat Abbas Sétif 1
Encadreur :	Pr FENNI Mohamed	Univ. Ferhat Abbas Sétif 1
Examineur :	Pr BENSLAMA Mohamed	Univ. Badji Mokhtar Annaba
Examineur :	Dr HADJ MILOUD Samir	Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie, El Harrach, Alger
Examineur :	Dr CHERFOUH Rabie	Univ. Mouloud Maameri Tizi Ouzou
Examineur :	Dr AISSAOUI Mohamed-Ridha	Univ. Ferhat Abbas Sétif
Invitée	Dr. Afrasinei Mihaela Gabriela	Univ. Dublin, Irlande

Laboratoire de valorisation des ressources biologiques naturelles

Année universitaire 2023-2024

ملخص

في إطار هذه الأطروحة، تم تناول توصيف التربة، مراقبتها، وتصنيفها في منطقة الزيبان (بسكرة) من منظور يسمح بمقارنة التشخيص الذي أجري في عام 1991 حول حالة التربة في منطقة الزاب الغربي (ZO) (عين بن نوي، الحاجب وأوماش) مع نتائج مختلفة تم معالجتها في عامي 2016 و 2021 في النظم الزراعية البيئية (AES) بالواحات. استندت منهجية الدراسة إلى البحث الميداني (الوصف التفصيلي للتضاريس في مواقع الدراسة وأخذ عينات التربة والمياه) والعمل المختبري (الفحوصات الفيزيائية والكيميائية). تم استخدام تقنية الاستشعار عن بعد لاستكمال النهج التقليدي في جانب المراقبة. النظم الزراعية البيئية المدروسة هي بيئات هشة وديناميكية وتواجه قيوداً مثل المناخ الجاف والمتبخر، الملوحة، قلة المادة العضوية في التربة، التعرية الريحية، إلخ، بالإضافة إلى أنها تستغل بكثافة في زراعة النخيل والخضروات. تم تحديث تصنيف التربة لثمانى وحدات تصنيفية (UTS) لعام 1991 وفقاً لنظام التصنيف (WRB (2015 و ST (2014) تم العثور على أنواع مختلفة من Gypsisols و Solonchaks التي تنتمي إلى Salids و Gypsids وفقاً لنظام ST؛ وتعد تراكم الجبس والملوحة من الجوانب الرئيسية فيها. أظهرت دراسات أجريت على حالة تدهور التربة في منطقة طولقة في عام 2016 أن التملح الثانوي والخصوبة الهيدرومورفية يشكلان مشكلات قد تتفاقم بسبب ضعف أو انعدام الصرف. في واحة برج بن عزوز (BBA)، طولقة، بلغ مستوى ملوحة منطقة تراكم المياه التي تكونت هناك 67 ds.m^{-1} ، أي أعلى بسبع مرات من مستوى ملوحة المصرف. أكدت التحليلات الإحصائية (اختبار (HSD 0.05, Tukey) الفروق بين الواحات من حيث إدارة مياه الصرف. تمت دراسة ديناميكية النظم الزراعية البيئية وسيورتها بعد 30 عاماً من خلال 10 مقاطع موزعة على سلسلتين طوبوغرافيتين. أظهرت النتائج تفاقماً للتملح الثانوي في المناطق المنخفضة (البيدونات 2، 4 و 5). تراوحت نسبة الجبس بين 4 في (P9) و 87% في (P7)؛ وتكررت القشرة والتصلب الجبسي. تمت ملاحظة تجمع المياه في واحة برج بن عزوز (BBA) طولقة، وكذلك ترسبات الرياح المترسبة في السفوح الجنوبية لجبل بوغزال. تتسم التربة بكونها قلوية مع مستوى معتدل تقريباً من كربونات الكالسيوم. يكون الطابع الكيميائي لمحلل التربة إما عالي الكلوريد الكالسي أو عالي الكبريتات الكالسي. أظهرت دراسة تغير مؤشر الغطاء النباتي التي قدمتها صور الأقمار الصناعية لاندسات 5 ولاندسات 8، ديناميكية ملحوظة للنظم الزراعية البيئية؛ حيث عكس تغير المؤشر تطوراً ملحوظاً في إشغال الأرض وتغيير استخدامها في هذه المنطقة. زادت المساحات المزروعة في الحاجب، شرق مليلي، شمال طولقة وجنوب لشانة. أما في أوماش، جنوب طولقة ومليلي، فقد ظهرت تراجعاً في الغطاء النباتي ويرجع ذلك إلى تقادم وتدهور غابات النخيل بسبب التملح. أظهرت تصنيف التربة للزاب الغربي في عام 2021 وفقاً لنظام (WRB (2015 و ST (2014) تنوعاً في التربة داخل مجموعتين أساسيتين من أنواع التربة المرجعية (RSGs) (Solonchaks و Gypsisols)؛ لم تكن (Pedodiversity) واسعة في ST. وقد أبرزت المقارنة بين النظامين التصنيفيين تكاملهما بالنسبة لتربة منطقة الزيبان (بسكرة)؛ حيث يبدو أن WRB أكثر مرونة ويقدم معلومات وافية حول مختلف الجوانب البيدوجينية التي تتطور في نفس الوقت في البيدون. وأخيراً، أظهرت مقارنة الوحدات التصنيفية للتربة لعام 1991 مع نظيراتها لعام 2021 تأثير الاستغلال المفرط على تغيير خصائص التربة؛ إذ أفضى ذلك إلى ظهور نوعين جديدين من التربة (الفينو فورم التربة) P11-91: الذي كان (Hypersalic) Calcic Gypsic Solonchaks أصبح (Hypersalic) Gypsic Solonchaks (P5-21)، و P8-91 الذي كان (Hypergypsic) Petrocalcic Gypsisols تأثر بالملوحة وأصبح (Hypergypsic) Haplic Gypsisols (P7-21). (Episalic, Yermic) ديناميكية النظم الزراعية البيئية الواحية في الزيبان متأثرة بالاستغلال الجائر؛ مما يجعل استدامتها قضية هامة للمزارعين وصناع القرار. تتطلب مراقبتها التقييم الدوري للملوحة والديناميكية الريحية؛ وتحسين نهج المراقبة الحالي عبر التحليل الجيوإحصائي وسلاسل زمنية لمنع تدهور هذه النظم الزراعية البيئية وتأثيراتها البيئية، الاقتصادية والاجتماعية. فيما يتعلق بالإدارة، تعتبر الممارسات الزراعية البيئية (المحاصيل المتداخلة، تقليل المدخلات، الإدارة الملائمة لمياه الري والصرف، تغطية التربة، حماية الواحات من التعرية الريحية، تقليل المسافة بين النخيل، إلخ) من الممارسات المستحسن اتباعها.

الكلمات المفتاحية: التربة، التوصيف، التصنيف، المراقبة، الواحات، النظم الإيكولوجية الزراعية، الزيبان

Résumé

Dans le cadre de cette thèse, la caractérisation des sols, le monitoring et la typologie des sols de la région des Ziban (Biskra), ont été abordés sous un angle de vue qui permettra de comparer le diagnostic de 1991, sur l'état des sols du Zab occidental (ZO) de cette région (Ain Ben Noui, El Hadjeb et Oumache), avec les résultats de différents volets qui y ont été traités en 2016 puis en 2021 sur les agroécosystèmes (AES) des oasis. L'approche d'étude a été basée sur l'investigation de terrain (description détaillée des de la physiographie des sites d'étude et l'échantillonnage du sol et de l'eau) et de laboratoire (caractérisation physico-chimique). La technique de télédétection a été utilisée pour compléter l'approche conventionnelle dans le volet du monitoring. Les AES étudiés sont des milieux fragiles, dynamiques, et composées de contraintes (climat sec et évaporant, salinité, pauvreté des sols en MO, érosion éolienne, etc.) en plus qu'ils sont très convoités pour la culture de palmier dattier et le maraichage.

La typologie des sols de 8 unités typologiques de sols (UTS) de 1991 a été actualisée selon WRB (2015) et ST (2014). Divers types de Gypsisols et de Solonchaks ont été découverts ; l'accumulation de gypse et la salinité y sont les aspects majeurs. Leur état de dégradation étudié à Tolga, en 2016 a révélé que la salinisation secondaire et l'hydromorphie (La salinité du lac, au sud de Tolga, a été de 67 dS.m^{-1} est 7 fois plus élevée que celle du drain), sont des problèmes qui peuvent s'exacerber à cause du drainage défectueux ou inexistant. Dans l'oasis de Bordj Ben Azouz (BBA), Tolga, la salinité du lac qui s'y formé, a été de 67 dS.m^{-1} est 7 fois plus élevée que celle du drain. L'analyse statistique (test de Tuckey, HSD 0.05) a confirmé la différence entre les oasis de par la gestion de l'eau de drainage. La dynamique des AES et leur fonctionnement après 30 ans, a été étudiée à travers 10 profils répartis sur 2 toposéquences. Elle a montré une exacerbation de la salinisation secondaire dans les zones de dépression (pédons 2, 4 et 5). Le taux de gypse est variable (4 – 87% dans P7) ; la croûte et l'encroûtement gypseux sont fréquents. L'accumulation de l'eau a été ponctuellement observée dans l'oasis de Bordj Ben Azouz (BBA), Tolga et les dépôts éoliens localisés dans le piémont sud du Mont de Boughezal. Le pH des sols est alcalin et le taux de CaCO_3 est presque modéré. Le faciès chimique de la solution du sol est soit hyper-chloruré calcique ou hyper-sulfaté calcique.

L'analyse du changement de l'indice de végétation fourni par les images satellitaires Landsat 5 et Landsat 8, a montré une dynamique importante des AES ; le changement de l'indice de végétation a traduit l'évolution remarquable de l'occupation du sol et le changement d'usage dans cette région. Il y a eu augmentation des espaces cultivés à El Hadjeb, à l'est de M'lili, au nord Tolga et au sud de Lichana. La régression du couvert végétal a été apparente à Oumache, sud de Tolga et M'lili et serait due au vieillissement et au dépérissement des palmeraies à cause de la salinisation. La typologie des sols du ZO obtenue en 2021 selon la WRB (2015) ST (2014) a donné lieu à une diversité de sols au sein des deux principaux RSGs (Solonchaks et Gypsisols) ; la pédodiversité n'est pas large dans la ST. La comparaison entre les deux systèmes de classification a mis au point leur complémentarité pour le cas des sols des Ziban (Biskra) ; la WRB paraît plus flexible et renseigne assez suffisamment sur les divers aspects pédogénétiques se développant simultanément dans un pédon. Enfin, la comparaison des UTS de 1991 avec celles de 2021, a mis en évidence l'impact de l'anthropisation sur le changement des propriétés des sols ; cela s'est traduit par l'apparition de 2 nouveaux types de sols (Soil phenofoms) : P11-91 qui était Calcic Gypsic Solonchaks (Hypersalic) devenu Gypsic Solonchaks (Hypersalic) (P5-21) ; et P8-91 qui était un Calcic/Petrocalcic Gypsisols (Hypergypsic) a été influencé par la salinité et est devenu Haplic Gypsisols (Hypergypsic, Episalic, Yermic) (P7-21).

La dynamique des AES oasiens des Ziban est amplifiée par l'anthropisation; leur viabilité est un enjeu important pour les agriculteurs et les décideurs. Leur surveillance nécessite l'évaluation périodique de la salinisation et de la dynamique éolienne ; l'amélioration de l'approche de monitoring actuelle avec une analyse géostatistique et des séries temporelles et ce, pour éviter la dégradation de ces AES et ses répercussions sur les plans environnemental, économique et sociétal. S'agissant de la gestion, les pratiques agroécologiques (cultures sous-étages, réduction des intrants, gestion des eaux d'irrigation et de drainage, couverture du sol, protection des oasis contre l'érosion éolienne, réduction de la distance entre les palmiers, etc.), sont des pratiques à recommander.

Mots clés : Sols, Caractérisation, Typologie, Monitoring, Oasis, Agroécosystèmes, Ziban

Abstract

In this thesis, the soil characterization, monitoring, and typology of the Ziban region (Biskra) were approached in a way that allows a comparison between the 1991 diagnostic of the soil status in the Western Zab (OZ) of this region (Ain Ben Noui, El Hadjeb, and Oumache) with results obtained in 2016 and 2021 on the agroecosystems (AES) of the oases. The study approach was based on field investigation (detailed description of site physiography and sampling of soil and water) and laboratory work (physicochemical characterization). Remote sensing techniques were used to complement the conventional approach in the monitoring aspect. The AES under study are fragile, dynamic environments with various constraints (dry and evaporative climate, salinity, poor soil organic matter, wind erosion, etc.) and are highly valued for date palm cultivation and vegetable farming.

The soil typology of eight soil typological units (UTS) from 1991 was updated according to WRB (2015) and ST (2014). Various types of Gypsisols and Solonchaks were identified, corresponding to the Gypsisols and Salids suborders in the ST system; gypsum accumulation and salinity are the main features. Their state of degradation, studied in Tolga in 2016, revealed that secondary salinization and waterlogging are issues that could worsen due to defective or absent drainage systems. In the oasis of Bordj Ben Azouz (BBA), Tolga, the salinity of a forming lake was 67 dS.m⁻¹, seven times higher than that of the drainage water. Statistical analysis (Tukey's HSD test, 0.05) confirmed differences between the oases in drainage water management.

The dynamics and functioning of AES after 30 years were studied through 10 profiles distributed across two toposequences, revealing an exacerbation of secondary salinization in depression zones (pedons 2, 4, and 5). Gypsum content varied (4–87% in P7); gypsum crusts and encrustation were common. Water accumulation was occasionally observed in the Bordj Ben Azouz oasis, Tolga, along with aeolian deposits in the southern foothills of Boughezal Mountain. Soil pH was alkaline, and CaCO₃ levels were generally moderate. The chemical facies of the soil solution was either hyperchloride-calcium or hyper-sulfate-calcium. Analysis of vegetation index changes using Landsat 5 and Landsat 8 satellite images showed significant AES dynamics; changes in vegetation index reflected a notable evolution in land occupation and usage changes in the region. Cultivated areas expanded in El Hadjeb, east of M'lili, north Tolga, and south Lichana, while vegetation cover regressed in Oumache, south Tolga, and M'lili, likely due to palm grove aging and decline caused by salinization.

The ZO soil typology obtained in 2021, according to WRB (2015) ST (2014), revealed diversity within the two main Reference Soil Groups (Solonchaks and Gypsisols); pedodiversity is limited within ST. The comparison between the two classification systems highlighted their complementarity for Ziban (Biskra) soils; WRB appears more flexible and provides sufficient information on the various pedogenetic aspects developing simultaneously within a pedon. Finally, comparing the 1991 UTS with those from 2021 highlighted the impact of anthropogenic activity on soil property changes, resulting in the emergence of two new soil types (soil phenoforms): P11-91, which was Calcic Gypsic Solonchaks (Hypersalic), became Gypsic Solonchaks (Hypersalic) (P5-21), and P8-91, originally a Petrocalcic Gypsisols (Hypergypsic), was influenced by salinity and evolved into Haplic Gypsisols (Hypergypsic, Episalic, Yermic) (P7-21). Anthropogenic activities intensify the dynamic of the Ziban oases AES; their viability is a significant concern for farmers and policymakers. Monitoring requires periodic evaluation of salinization and aeolian dynamics, with improvements to the current monitoring approach using geostatistical analysis and time series to prevent AES degradation and its environmental, economic, and societal impacts. Regarding management, agroecological practices (understory crops, reduced inputs, proper irrigation and drainage management, soil cover, oasis protection against wind erosion, reducing the spacing between palm trees, etc.) should be prioritized.

Keywords : Soil, Characterization, Typology, Monitoring, Oasis, Agroecosystems, Ziban

AVANT-PROPOS

Le développement de la société humaine a été très rapide, en particulier, depuis le dix-huitième siècle. Cette accélération a eu, en parallèle, un impact sur l'environnement du fait de activités humaines telles que le développement de l'industrie et de l'agriculture, l'utilisation des combustibles fossiles, le déboisement, l'urbanisation et tant d'autres autres utilisations du sol.

Ces dernières années, la question du changement climatique et les problèmes de dégradation des sols sont de plus en plus évoqués. L'activité humaine est devenue la principale force de changement sur terre et la cause du dérèglement planétaire inédit. L'empreinte de la puissance de l'homme sur la terre a été mise en avant par le naturaliste, mathématicien et philosophe Buffon en 1778.

Bien que la compréhension de l'environnement et son fonctionnement soit significativement améliorée, on a encore du mal à prévoir avec un degré acceptable de certitude ce que adviendrait de notre environnement dans les prochaines décennies. Les défis sont donc inquiétants notamment vis-à-des menaces qui pèsent actuellement sur les sols.

La seule réponse à ce défi est de déployer des efforts pour la compréhension du processus d'évolution de cet écosystème afin d'anticiper sur les risques de son dysfonctionnement ou de dégradation irréversible. Cette tâche est encore plus délicate pour les écosystèmes des oasis du contexte aride. Ceux-là sont dynamiques et très fragiles et leur anthropisation pose un sérieux problème dans la région des Ziban (Biskra), notamment à partir des années 1990 ; cette région dont l'écosystème constitue un archétype où l'exploitation des ressources des aquifères et des sols ne cesse encore de croître.

Ma contribution, dans cette thèse, vise à apporter des connaissances importantes sur les caractéristiques des sols de ces agroécosystèmes, à combler des lacunes concernant leur diversité typologique et, également, à faire le point sur leur état de dégradation après 30 ans d'anthropisation. Le monitoring des dynamiques des agroécosystèmes des oasis a fait appel à une détermination suffisante des propriétés et des principaux processus d'évolution de ces sols. L'intégration de l'approche de télédétection dans le suivi des changements d'usage des sols, aura permis d'établir un diagnostic assez précis sur l'état de la ressource pédologique de la partie occidentale des Ziban.

Remerciements

La réalisation d'une thèse est certes une expérience qui est scientifiquement enrichissante, mais, elle est aussi une grande exploration humaine et un parcours complexe. Ce parcours est semé de beaucoup d'écueils et a connu des moments de procrastination injustifiés ! Et fort heureusement, dans cette aventure, j'ai rencontré des personnes aimables qui, sur les plans professionnel et personnel, m'ont énormément aidé ; j'ai apprécié leur sens de partage et les valeurs humaines auxquelles elles croient. Je reconnais que ce succès n'a pas résulté uniquement du travail acharné, mais aussi du soutien de ces gens.

Parmi ces personnes, il y a le Pr. Fenni Mohamed, de l'université Ferhat Abbas Sétif-1, qui est mon directeur de thèse. Je lui rends hommage parce que c'est de lui que j'ai reçu le premier soutien. En homme de science et pédagogue qu'il est, il n'a pas manqué, durant toutes ces années, de me prodiguer ces conseils et de m'inciter à aller jusqu'au bout de cette mission. Je le remercie pour sa patience et même pour sa passion de voir le travail évoluer. Sincèrement, c'est un privilège pour moi de l'avoir comme directeur de thèse. Je suis aussi très reconnaissant au Pr. Bouharati Saddek, de l'université Ferhat Abbas Sétif-1, de m'avoir apporté son soutien et d'avoir précieusement contribué, en 2018, à ce travail.

Je tiens aussi à présenter mes vifs remerciements au Pr. Mebarkia Amar de l'université Sétif-1, de l'intérêt qu'il a voulu porter à mon travail et en me faisant l'honneur d'avoir accepté de présider le jury de ma soutenance. Les experts qui font partie de ce jury, sont infiniment remerciés d'avoir donné leur aval pour évaluer le travail de cette thèse et ce, malgré leurs obligations. Je remercie le Pr. Benslama Mohamed, de l'université Badji Mokhtar, Annaba, d'avoir accepté de juger ce travail. Je remercie également Messieurs Hadj Miloud Samir, Maître de conférences A, à l'ENSA El Harrach (Alger), Cherfouh Rabia Maître de conférences A, à l'université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou, ainsi qu'à M. Aissaoui Mohamed Ridha, Maître de conférences A, à l'université Ferhat Abbas Sétif 1, d'avoir pris sur leur temps pour lire, examiner et juger ce modeste travail. Je réitère mes remerciements au président de jury ainsi qu'à tous les experts de leur disponibilité pour apporter un regard extérieur, critique et constructif à cette thèse.

Je tiens à adresser mes sincères remerciements à tous mes collègues, dont je citerai Louadj Y., Djellal F., Annani F., Amor, sans oublier de saluer très particulièrement M. Soualili N.E. Ces personnes m'ont réellement aidé et motivé pour terminer cette thèse. Le temps que j'ai partagé avec eux est mémorable. Je remercie vivement Degui Nouara, du département d'agronomie de Blida, d'avoir effectué les analyses du sol et de toutes les formes d'aide qu'elle m'a prêtées.

Mes remerciements et respects s'adressent aussi à Gabriela M. Afrasinei, PhD de l'université de Dublin (Irlande) d'avoir collaboré d'une manière constante durant les différentes étapes de ce travail. Je remercie Dr Chrystian Chomontowski, de l'université de Warsw (Pologne), de sa contribution dans la publication des résultats de cette thèse. M. Hafidhi Med, représentant de l'entreprise Doudah spécialisée dans la vente des produits phytosanitaires, est vivement

remercié de m'avoir accompagné dans mes prospections de terrain au niveau des palmeraies des Zab oriental et occidental.

Je ne saurai, à cette occasion, oublier d'honorer les mémoires des Pr. Bensaid Rabah et Dogar A. M, je leurs rends hommage, à titre posthume, de m'avoir appris les bases de la pédologie.

Je suis éminemment sensible au sacrifice de ma famille. Je dis merci beaucoup à mon épouse et à ma fille Noudjoud, ainsi qu'à mes parents, mes frères et sœurs et à toutes mes nièces et neveux, pour leur soutien indéfectible et leurs encouragements !

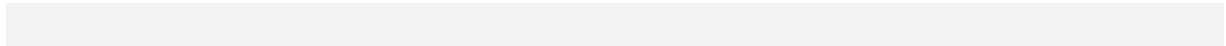
Je demande, enfin, à toutes les personnes qui, de diverses manières, m'ont apporté leur aide pour l'élaboration de cette thèse et qui ne sont pas cités, nommément ici, de m'excuser. Je les remercie du fond du cœur.

Salah Belghemmaz

Liste des figures

Figure 1 : Répartition des précipitations dans la région de Biskra.....	30
Figure 2: variation interannuelle des précipitations dans la région de Biskra entre 2000 et 2018. Source: Boudibi (2021).	31
Figure 3: Diagramme ombrothermique de la région de Biskra; période 2000-2018; source: Boudibi (2021).....	34
Figure 4 : Localisation de la région d'étude (Les Ziban, Biskra).....	36
Figure 5: Distribution spatiale et positions des profils d'échantillonnage de sols des années 1991(en vert) et 2021 (en rouge) dans le Zab occidental des Ziban (Biskra)	42
Figure 6 : Abondance relative des types de sols dans les Ziban (1991) selon la classification FAO-UNESCO (1974).....	62
Figure 7 : abondance relative des types de sols dans les Ziban (1991) selon la classification FAO-UNESCO (1988).....	63
Figure 8 : Abondance relative des types de sols dans les Ziban (1991) selon la classification USDA (1975)	64
Figure 9 : Abondance relative des types de sols dans les Ziban (1991) selon la classification WRB (2015).....	66
Figure 10 : Abondance relative des types de sols dans les Ziban (1991) selon la classification USDA (2014)	68
Figure 11: Diagramme de Piper du faciès chimique des solutions salines du sol dans le Zab occidental de la région des Ziban.	79
Figure 12 : Estimation de l'indice de végétation dans le Zab occidental (Ziban) en 1991. Image Landsat 5 (1991).....	89
Figure 13 : Estimation de l'indice de végétation dans le Zab occidental (Ziban) en 2021. Image Landsat 8 (2021).....	90
Figure 14 : Estimation du changement de l'indice de végétation dans le Zab occidental (Ziban) entre 1991 et 2021. Image Landsat 8 (2021).....	91
Figure 15 : Localisation géographique des profils d'échantillonnage dans les trois oasis. Composite fausses couleurs 752 de la scène Landsat 8 du 19 avril 2016.	94
Figure 16: Classification par arbre de décision de l'image Landsat du 19 avril 2016 (Biskra)	95
Figure 17: Typologie des sols selon IUSS Working Group WRB (2015) dans le Zab occidental des Ziban (Biskra).....	105
Figure 18 : distribution relative des sols du Zab occidental dans la région des Ziban selon la classification WRB (2015).	108

Figure 19: Typologie des sols selon la Soil Taxonomy (2014) dans le Zab occidental des Ziban (Biskra).....	111
---	-----



Liste des tableaux

Tableau 1 : classification des climats des régions arides	9
Tableau 2 : Variabilité des précipitations dans deux localités algériennes (Verheyen, 2009) 10	10
Tableau 3 : Surfaces occupées par divers types de terres arides dans le monde.....	12
Tableau 4 : Longueurs et débits des principaux Oueds	25
Tableau 5 : Unités géologiques et hydrogéologiques dans la région de Biskra.....	27
Tableau 6 : Précipitations moyennes Mensuelles en mm, (Station Biskra).....	31
Tableau 7 : Répartition saisonnière des précipitations à Biskra ; source Rechachi (2017)	32
Tableau 8 : Températures et précipitations moyennes mensuelles de la région de Biskra (période 1967-2012) ; source : Rechachi (2017).....	33
Tableau 9 : Les différents types de climats selon en fonction de l'indice de De Martonne ...	34
Tableau 10 : Positionnement des profils de sols et caractéristiques des sites oasiens (Juin 1991).....	39
Tableau 11 : Positionnement des profils de sols et caractéristiques des sites oasiens.....	41
Tableau 12 : Caractéristiques physiographiques de l'UCS 1	51
Tableau 13 : Résultats analytiques du profil n°1	52
Tableau 14 : Résultats analytiques du profil n°8	53
Tableau 15 : Caractéristiques physiographiques des UCS représentatives.....	54
Tableau 16 : Résultats analytiques du profil n°3	55
Tableau 17 : Résultats analytiques du profil n°5	56
Tableau 18 : Résultats analytiques du profil n°10	57
Tableau 19 : Caractéristiques physiographiques des UCS représentatives.....	58
Tableau 20 : Résultats analytiques du profil n°4 (UTS 4 ; 6 ; 11).....	58
Tableau 21 : Résultats analytiques du profil n°6	59
Tableau 22 : Résultats analytiques du profil n°11	60
Tableau 23 : Correspondances des types de sols selon la FAO-UNESCO (1974 et 1988) dans la WRB (2015) dans la région de Ain Ben Noui et ses environs	67
Tableau 24 : Comparaison de la typologie de sols dans les versions de 1975 et de 2014 de la Soil Taxonomy de l'USDA.....	69
Tableau 25 : Résultats de la caractérisation physico-chimique des sols dans le Zab occidental, region des Ziban	72
Tableau 26 : Normes d'interprétation de la salinité du sol pour un extrait dilué 1:5 (Durand, 1983)	73

Tableau 27 : Interpretation of the saturated paste soluble salts test (Dahnke and Whitney, 1988).....	73
Tableau 28: Les pédons contenant un matériau gypseux riche en limon sableux fin	82
Tableau 29 : Principaux aspects physiographiques et pédologiques des 3 oasis	94
Tableau 30 : Caractérisation chimique des sols et des eaux	96
Tableau 31 : Comparaison du pH et de la CE du sol dans les 3 oasis	97
Tableau 32 : Résultats de la comparaison entre les échantillons d'eau en fonction de leurs origines	98
Tableau 33 : Typologie des sols des Ziban selon la WRB (2015)	102
Tableau 34 : Synthèse des caractéristiques morphologiques et diagnostics des épipédons de surface et des horizons de subsurface dans le Zab occidental de la région des Ziban (Biskra).	114
Tableau 35 : Résultats des valeurs de la $CE_{1:5}$ après transformation en CE_{ps}	122
Tableau 36 : Typologie des sols des Ziban selon la WRB (2015) après transformation des valeurs de la $CE_{(1:5)}$ en $CE_{(ps)}$	124

Liste des photos

Photo 1 : Lac d'accumulation des eaux d'irrigation et de drainage dans à proximité des palmeraies de Bordj Ben Azouz (Tolga).....	75
Photo 2 : Aspect blanchâtre du sol traduisant une accumulation excessive de sels (salant blanc). Site de Bordj Ben Azouz (Tolga).....	76
Photo 3 : Oasis située au nord de Benthious (P6) ; le taux de gypse est élevé (47-56%), mais, la palmeraie est très bien portante.	778
Photo 4 : palmeraie dégradée et laissée à l'abandon à cause du manque d'eau (Sud de Tolga)	84
Photo 5 : (a) une partie du lit de Oued Djedi (tronçon sillonnant les oasis de Lioua) ; (b) coupe d'une berge de l'oued illustrant un matériau de sol enrichi par les colluvions de l'Oued Djedi	85
Photo 6 : Profil de sol constitué d'une accumulation de gypse et de calcaire sous forme de croûte ; site de Lioua	85
Photo 7: 7(a) et 7(b): brise-vent construit à base de matériau inerte (branches mortes de palmiers); dans (b), le talus de soutènement érigé à partir sable dunaire pour renforcer la fixation de la barrière inerte (site de Lioua).	87
Photo 8: (a) voile de sable couvrant une partie du piedmont du Mont de Boughezal; 8(b) sols formés sur des dépôts éoliens (Site Ain Ben Noui: P10).	88
Photo 9 : Système oasien composé de culture sous-étages ; site de Lioua.....	92
Photo 10 : Bon fonctionnement du drain (oasis 2). Il n'y a pas de risque de dégradation des palmeraies.....	100
Photo 11: Fossés de drainage infestés par la végétation (oasis 3). Elle montre le problème de l'engorgement dû à un drainage insuffisant ou défectueux. Ici, la salinité est excessive et l'alcalinité est élevée.....	101
Photo 12 : Profil 4 (site M'lili 2) ne présentant aucune croûte de gypse et /ou calcaire	103
Photo 13 : Profil 7 montrant un encroûtement gypseux (sud de Tolga).....	106
Photo 14 : Profil 5 hypersalé (Oumache)	117
Photo 15: (a) Profil 3 du site M'lili 1 (nappe à 8 10 m de profondeur) ; (b) : Profil avec croûte en « Deb Deb » (accumulation gypso-calcaire)	1199

Sommaire

Introduction et problématique	1
Chapitre I : Aperçu sur la biogéographie, climat et sols des régions arides et semi-arides	
1. Biogéographie et climat des régions arides et semi-arides.....	8
1.1 Concept des régions arides et semi-arides	8
1.2 Biogéographie et climat.....	8
1.3 Caractéristiques du climat des régions arides et semi-arides	9
1.3.1 Allure des précipitations dans les régions arides et semi-arides	9
1.3.2 Les vents : mode d'action et effets.....	11
2. Différents types de terres arides et impact de la sécheresse sur leur mise en valeur.	12
3. Caractéristiques et types de sols des zones semi-arides et arides.....	14
3.1. Les principaux types de sols des régions arides et semi-arides	14
3.2. Facteurs du milieu et processus de formation des sols.....	15
3.2.1. Sols évoluant sous une aridité extrême : les déserts.....	16
3.2.2. Sols se situant dans des zones à climat moins hostile	16
3.3. Sols des régions arides d'Algérie	17
4. Monitoring du changement du sol vs Concepts de Soil Genoforms & Soil Phenofoms.....	19
5. Perspectives de l'agriculture dans les régions arides.....	20
Chapitre 2 : Caractéristiques biophysiques de la région des Ziban	
1. Géographie et historique des Ziban	22
1.1. Les Ziban : porte du Sahara	22
1.2. Aspect oasien de la ville de Biskra.....	22
1.3. Limites administratives.....	23
2. Configuration du milieu naturel et découpage des Ziban.....	23
3. Caractéristiques agraires des Ziban : Potentialités et contraintes du milieu.....	24
3.1. Terres potentiellement cultivables et autres atouts.....	24
3.2. Potentialités hydriques.....	25
3.2.1. Les eaux de surface	25
3.2.2. Les eaux souterraines	26
3.3. Les contraintes.....	28
4. Géomorphologie	29

5.	Aspects généraux du climat des Ziban	29
5.1.	Étude du climat de la région des Ziban	30
5.1.1.	Evolution des précipitations	30
5.1.2.	Variations mensuelles et saisonnières des précipitations	31
5.1.3.	Variation des températures	32
5.1.4.	Evapotranspiration	33
5.2.	Le régime climatique	33
5.2.1.	Diagramme pluviothermique de Gaussen et Bagnouls	33
5.2.2.	Estimation de l'indice d'aridité (Ia) de De Martonne 1923	34
6.	Conclusion	35

Partie II : Méthodologie de travail

Chapitre 1 : Matériel et méthodes

1.	Description de la méthodologie de travail	36
1.1.	Contexte de la zone d'étude	36
1.2.	Définition de l'étendue géographique de l'étude et aspects développés dans la thèse..	37
2.	Aperçus méthodologiques succincts.....	38
2.1.	Objectif de l'étude antérieure (1991) et modalités de sa mise en œuvre.....	38
2.1.1.	Objectif des études postérieures à 1991 et contextes de mise en œuvre	40
2.1.1.1.	Méthode d'étude de la dynamique des agroécosystèmes oasiens.....	40
2.1.1.2.	Systèmes de classification internationaux des sols	44
2.1.1.3.	Monitoring des changements au niveau des sols	45
2.1.1.4.	Télédétection.....	45
2.1.1.5.	Evaluation de l'état de dégradation des agroécosystèmes oasiens	46

Partie III : Résultats et discussion

Chapitre 1 : Etat global des sols de la région de Ain Ben Noui et ses environs en 1991

1.	Contexte du travail et importance des résultats	48
2.	Regard critique sur les caractéristiques morpho- analytiques des sols et choix des unités représentatives.....	49
3.	Proposition de modalité de présentation des unités représentatives de sols.....	50
3.1.	Les Gypsisols.....	50

3.2.	Les Solnochaks	50
4.	Caractéristiques des UTS représentatives et séquence des horizons	51
4.1.	Caractéristiques des UTS des Gypsisols	51
4.1.1.	Calcic Gypsisols (Hypergypsic).....	51
4.1.2.	Haplic Gypsisols (Hypergypsic)	54
4.2.	Les Solonchaks	57
5.	Principaux types de sols dans le Zab occidental, Ziban (Biskra)	61
5.1.	Typologie de sols obtenue selon la classification FAO-UNESCO	62
5.2.	Typologie des sols obtenue selon le système de classification de l'USDA (1975)...	63
5.3.	Comparaison de la typologie des sols dans les systèmes de la ST (1975) et FAO (1974) et (1988).....	64
5.4.	Classification actualisée des sols du Zab occidental	65
5.4.1.	Classification selon la WRB (2015).....	65
5.4.2.	Classification selon la Soil Taxonomy de l'USDA (2014).....	68
6.	Conclusion.....	69

Chapitre 2 : Dynamique des agroécosystèmes : incidences pédologique et agro-environnementale de 30 ans de mise en culture

1.	Caractérisation physico-chimique des sols.....	71
1.1.	Caractérisation des sols des agroécosystèmes oasiens des Ziban, monitoring et typologie des sols.....	71
1.1.1.	Caractérisation physico-chimique des sols	71
1.1.1.1.	Réaction des sols (pH).....	71
1.1.1.2.	Salinité du sol mesurée sur un extrait dilué 1 :5.....	71
1.1.1.3.	CaCO ₃	77
1.1.1.4.	Gypse	77
1.1.2.	Faciès chimique des solutions du sol	79
1.1.3.	Texture du sol et matière organique	80
6.1.	Signification de la texture du sol dans un matériau pédologique gypseux.....	81
2.	Fonctionnement des agroécosystèmes oasiens vs contraintes environnementales....	82
2.1.	Contraintes pédologiques	82

Chapitre 3 : Utilisation de la télédétection et de l'approche conventionnelle pour l'évaluation de la dégradation des sols dans les agroécosystèmes oasiens des Ziban (Tolga)

1.	Introduction et problématique des agroécosystèmes oasiens de Tolga	92
2.	Etat du problème et risque de son développement	92
3.	Approches d'évaluation de l'état de dégradation des oasis	93
3.1.	Caractéristiques des sites oasiens étudiés	94
3.2.	DT Classifier.....	95
3.3.	Caractérisation chimique du sol et de l'eau	96
3.3.1.	Comparaison des caractéristiques du sol des trois oasis	96
3.3.2.	Comparaison de l'alcalinité et de la salinité des eaux	97
3.3.3.	Evaluation de l'état de dégradation dans les trois oasis.....	98
4.	Conclusion.....	101

Chapitre 4 : Typologie des sols dans les agroécosystèmes des Ziban

1.	Classification des sols selon WRB-IUSS (2015)	102
1.1.	RSG des Solonchaks.....	103
1.2.	RSG des Gypsisols	105
2.	Classification des sols selon la Soil Taxonomy de l'USDA (2014)	109
2.1.	Les Aridisols.....	110
2.2.	Les Entisols.....	112
3.	Caractéristiques morphologiques et diagnostics des sols du Zab occidental de la région des Ziban selon la WRB (2015) et la Soil Taxonomy de l'USDA (2014)	113
4.	Comparaison de la typologie des sols dans la Soil Taxonomy (2014) et WRB (2015)	115
4.1.	Classification des sols à accumulations salines	116
4.2.	Classification des sols gypseux	118
5.	Expression universelle de la salinité des sols : intérêt de l'approche de conversion et ses limites	120
5.1.	Salinité du sol obtenue par transformation de la $CE_{1:5}$ en CE_{ps}	121
5.2.	Conséquences de la conversion de la $CE_{1:5}$ vers une $CE_{(ps)}$ sur la typologie des sols	123
5.2.1.	Pédons avec changement substantiel, c.-à-d., avec changement de RSG	123

5.2.2.	Pédons sans modification de RSG et avec ou sans changement de qualificatifs	125
6.	Hypothèses sur les processus pédogénétiques des sols de la région d'étude	125
6.1.	Cas des sols riches en gypse	126
6.2.	Cas des sols salés renfermant le calcaire et le gypse	127
7.	Essai d'application des concepts de "Soil genoforms" et Soil phenoforms"	128
	Conclusion générale	131
	Références bibliographiques	
	Annexes	

Acronymes utilisés dans le manuscrit de la thèse

DSA : Direction des Services Agricoles

EMG : Environment Management Group

FAO : Food and Agriculture Organization

ITDAS : Institut Technologique de Développement de l'Agriculture Saharienne

ITPS : Intergovernmental Technical Panel on Soils

IUSS : International Union of Soil Science

RPF : Référentiel Pédologique Français

RSG : Reference Soil Group

SSS : Soil Survey Staff

UN : United Nations

UNESCO : Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture

USDA : United States Department of Agriculture

WRB : World Reference Base

Activités et travaux réalisés dans le cadre de cette thèse

- ❖ Participation à une conférence internationale et présentation d'une première communication orale à l'**EMCEI 2017 (Tunisie)** ; **deux chapitres e-book parus en (2018)** ont été publiés par Springer :

Chapitre 1 : Belghemmaz, S., Fenni, M., Afrasinei, G.M., Louadj, Y., Degui, N. (2018). Assessment of Land Degradation Related to Groundwater Irrigation of Oasis Environments: (Case Study: The Zibans, Biskra, Algeria). In: Kallel, A., Ksibi, M., Ben Dhia, H., Khélifi, N. (eds) Recent Advances in Environmental Science from the Euro-Mediterranean and Surrounding Regions. EMCEI 2017. Advances in Science, Technology & Innovation. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-70548-4_378

Chapitre 2 : Soualili, N.E., Afrasinei, G., Louadj, Y., Degui, N., Belghemmaz, S. (2018). Exploitation of the Main Aquifer Units in the Biskra Region: Analysis of the Current Situation and Prospects for Rationalization of Their Use in Agriculture. In: Kallel, A., Ksibi, M., Ben Dhia, H., Khélifi, N. (eds) Recent Advances in Environmental Science from the Euro-Mediterranean and Surrounding Regions. EMCEI 2017. Advances in Science, Technology & Innovation. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-70548-4_193

- ❖ En 2021, 2^{ème} communication orale présentée à distance à la conférence organisée par **AIT Series d'Italie (trends in earth observation 2nd Volume)** ; cette présentation a été assortie de la publication du résumé étendu dans les proceedings de la conférence qui sont en cours d'indexation dans Scopus:

Belghemmaz, S., Fenni, M., Afrasinei, G. M., & Louadj, Y. (2021). Soil And Water Salinization of an Oasis Ecosystem in the Ziban region (Tolga), Algeria. *Trends in Earth Observation*, 2, 45-50.

- ❖ 3^{ème} communication orale présentée à l'**EMCEI, 2022 (Tunisie)** suivie de la publication d'un chapitre (2024) dans **Recent Advances in Environmental Science From the Euro-Mediterranean and Surrounding Regions (4th Ed)**, édité par Springer.

Chapitre 3 : Belghemmaz, S., Fenni, M., Louadj, Y., Gabriela, A.M., Degui, N., Soualili, N.E. (2024). Soil Monitoring and Pedological Typology of Oasis Agroecosystems in the Ziban Region (Algeria). In: Ksibi, M., et al. Recent Advances in Environmental Science from the Euro-Mediterranean and Surrounding Regions (4th Edition). EMCEI 2022. Advances in Science, Technology & Innovation. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-51904-8_144

- ❖ Un article de recherche a été publié en 2024, dans '**Journal of Water and Land Development**' (2024, No. 61 (IV-IV) : 213-226, avec la contribution d'un co-auteur de l'université de Warsaw (Pologne) ; ce travail a porté sur la caractérisation des sols des agroécosystèmes oasiens, la typologie des sols et leur monitoring.

Belghemmaz S., Fenni M., Chomontowski Chrystian, Louadj Y., Gabriela, A.M., Degui, N. 2024a. Typology characterisation and monitoring of arid soils in an agroecosystem environment: Case of Ziban oasis, Algeria. *Journal of Water and Land Development*. 2024, No. 61 (IV–VI): 213–226. DOI: 10.24425/jwld.2024.150275

Introduction et problématique

Les terres agricoles occupent 36,5 % des terres émergées de la planète. Cette vaste zone, autrefois considérée uniquement pour la production alimentaire, est aujourd'hui considérée comme de plus en plus importante pour la fourniture de biens et services environnementaux locaux et mondiaux. La qualité et le volume de ces services dépendent non seulement de la superficie des terres occupées, mais aussi des stratégies et des pratiques de gestion des terres utilisées pour la production (Rita et Deepti, 2018).

Les sols fournissent une série de services écosystémiques fondamentaux pour le bien-être humain et la vie sur terre, tels que la nourriture et l'eau propre, et la régulation du climat (FAO et ITPS 2015). La croissance démographique, combinée à l'évolution des modes de consommation et des régimes alimentaires, exerce une pression croissante sur les ressources en sol. Selon la FAO et l'ITPS (2015), cette situation conduit à la nécessité de produire plus de nourriture sur des unités de terre plus petites et de le faire en utilisant moins d'eau.

En plus qu'elle est essentielle pour la production de la nourriture, la ressource en sols est aussi vitale pour les communautés végétales et a un impact important sur la biodiversité (biote du sol). En dépit de cette importance, les sols ont, généralement, été ignorés dans la conception des interactions entre les éléments géomorphologiques et écologiques du paysage. La diversité des sols et des formes de relief a des impacts quantitatifs et qualitatifs évidents sur les paysages (Ibáñez et al., 1995) dans (Toomanian, 2013). Par exemple, les sols et les reliefs déterminent les schémas de drainage et le stockage de l'eau, qui, à leur tour, affectent la structure des communautés végétales dans une zone donnée (Parsons, 2000) in Toomanian (2013).

Dans de nombreuses zones arides ou semi-arides, la durabilité de l'agriculture irriguée est menacée par une combinaison de facteurs, notamment une eau d'irrigation de mauvaise qualité, un drainage insuffisant ou inexistant, des nappes phréatiques salines peu profondes et la salinisation des sols et des eaux souterraines. Ces contraintes entravent le bon fonctionnement hydrosalin et fragilisent l'équilibre du système oasien (Marlet et al. 2010). Dans certaines régions, la salinisation des sols peut réduire la productivité agricole jusqu'à 97 %, entraînant une perte annuelle pour l'agriculture comprise entre 12,7 et 27,3 milliards de dollars (Butcher et al, 2016) in (Ding et al., 2020). Globalement, la salinisation des sols a réduit la production agricole de 50 % jusqu'à présent au XXI^e siècle (Ding et al., 2020) ; elle

menace, également, la capacité de nos sols à produire de la nourriture et nuit à plusieurs écosystèmes dans le monde, en particulier dans les régions arides et semi-arides. C'est donc un des problèmes mondiaux les plus urgents pour la sécurité alimentaire et la durabilité (Mohamed et al., 2019 ; FAO et l'IUSS, 2022).

A l'échelle africaine, les sols sont menacés car 40 % d'entre eux sont dégradés, principalement en raison de l'érosion, de l'épuisement des nutriments, de la diminution de la matière organique et de la perte de biodiversité. Le coût économique de cette dégradation peut augmenter à mesure que les menaces sur les sols persistent encore.

Plusieurs pays des zones arides et semi-arides de l'Afrique subsaharienne font, aujourd'hui, face à la dégradation des sols, à une faible productivité de l'eau et à une forte variabilité des précipitations, qui sont souvent liées au changement climatique (Karanja et al., 2016 ; Woldearegay et al., 2019).

Au cours des dix dernières années, la déclaration d'Abuja n'a guère progressé. Afin d'accélérer la croissance agricole de l'Afrique, un changement de paradigme dans la gestion des sols est nécessaire. Pour ce faire, les experts de la FAO ont estimé que le champ d'application de la Déclaration d'Abuja doit être élargi afin de représenter plus précisément le lien entre les agroécosystèmes et les sols, les aspirations et les conditions socio-économiques des agriculteurs africains, et les Objectifs de Développement Durable (ODD) (FAO, 2016).

Les territoires des zones arides en Algérie, représentent plus de 85 % de la superficie du pays. Plus de 20 % des sols irrigués sont touchés par la salinité (Hartani et al., 2009). Ajoutons à cela une qualité des eaux d'irrigation le plus souvent minéralisée (3-7 g/l de résidu sec) selon Djennane (1990), ce qui peut irrévocablement accroître le risque de propagation de la salinisation des sols dans ces régions.

La salinisation est un processus pédogénétique fréquent dans les sols d'Algérie (Daoud, 1993 ; Halitim, 1988) ; elle concerne environ un million d'ha de sols (Chaabene et Benreda, 1997). En Algérie, la combinaison entre un passé géologique favorable au stockage des sels, l'aridité du climat, l'hydrographie, l'hydrogéologie et l'irrigation mal contrôlée, font de la salinisation des sols une menace permanente (Aubert, 1976 et 1983).

L'agriculture dans ces régions doit sa réussite à l'utilisation des eaux souterraines (Snoussi et Halitim, 1998). La forte mobilisation des eaux profondes pour l'irrigation agricole est due à

l'augmentation de la surface irriguée. Ce qui fait de l'agriculture une activité consommatrice d'eau (75%) (Cheverry et Robert, 1998).

Un certain nombre de travaux ont été déjà réalisés dans le Sahara algérien y compris les Ziban. Parmi ces travaux, on cite seulement ceux ayant mis l'accent sur l'aspect pédologique tels que (Durand, 1958; Boyadgiev, 1975 ; Pouget, 1976 et 1980; Bertrand et *al*, 1975 et Dubost, 1986). D'autres travaux, relativement récents et intéressants, tels que ceux de Boumaraf (2013) ; Idder et al. (2014); Gabriela (2016 et 2017), ont porté sur les milieux oasiens et leur gestion hydro-agricole. En revanche, la classification des sols de ces régions arides reste insuffisante et la typologie des sols n'est que vague.

L'importance de la classification des sols est donc primordiale et elle découle de la nécessité d'identifier la diversité typologique des sols et expliquer les lois de leur distribution dans un paysage. Hartemink (2015) rapporte que selon Hallberg (1984), sans classification, la connaissance des sols ne serait qu'un chaos factuel difficile à retenir et impossible à comprendre.

L'historique des articles indexés dans Scopus, qui ont été publiés sur les différents types de sols et qui utilisent la classification des sols, pour la période 1975-2014 (A.E. Hartemink 2015), montre que les aridisols sont beaucoup moins étudiés. En effet, durant ces 40 années, l'intérêt pour les Aridisols a certes augmenté, mais il reste insuffisant et ne représente que 0,64% (117/18265) durant cette même période.

La taxonomie des sols a évolué de manière significative, en particulier au sein de l'ordre des Aridisols, depuis sa publication initiale en 1975 (Yaalon, 1995) dans Finstad et al. (2014). Le diagnostic sur les sols dans ces régions jusqu'alors peu étudiées, permet de découvrir des caractéristiques pédologiques insuffisamment décrites dans la taxonomie des sols existante (Soil Survey Staff, 1999).

De nombreux scientifiques (écologues et pédologues) s'appuient sur la nomenclature taxonomique des sols pour extraire des informations importantes sur leur origine et leur utilité (Schimel et Chadwick, 2013) in Finstad et al. (2014).

Sachant que globalement, le système WRB est le plus souvent utilisé dans "European Journal of Soil Science" et "Soil Use and Management" (Hatermink 2015), on a choisi la version de

cette classification universelle qui est publiée en 2015 pour l'élaboration de la typologie des de la ressource en sol de la région d'étude.

Or, la connaissance de la diversité typologique (pédodiversité), en plus qu'elle peut être, selon Mikhailova et al. (2021), le reflet ou la résultante de l'influence des facteurs intrinsèques (dans la pédodiversité elle-même) et extrinsèques (facteurs environnementaux de l'atmosphère, de la biosphère, de la lithosphère, de l'hydrosphère, de l'écosphère et de l'anthroposphère), il n'empêche qu'elle soit, également, un indicateur fiable pour expliquer un bon nombre de changements qui affectent les sols.

Cornu et al. (2020) ont pris ces changements sous l'appellation de changements globaux ; ceux-là se résument, notamment, en le changement climatique, les modifications de l'occupation des sols dues à l'augmentation constante de la pression anthropique sur les terres ou les changements dans les pratiques de gestion agricole. D'après Guo et Gifford (2002) ; Cornu et al. (2012) et Boizard et al. (2013) cités par Cornu et al. (2020), ces facteurs agissent de manière soit synergique soit antagoniste ; ils conduisent à des changements dans toutes les caractéristiques des sols, y compris leurs propriétés dites "intrinsèques", sur des échelles de temps allant de la décennie au siècle.

Depuis les années 2000, l'Algérie a mis en place une politique visant à améliorer la sécurité alimentaire, en optant notamment au développement des filières agricoles stratégiques pour le pays telles que les céréales, les fourrages et la production de dattes. Le suivi de l'irrigation et l'itinéraire technique des cultures ont été des actions clés qui ont été ciblées par les directives de cette politique. C'est ainsi que l'investissement agricole a démarré à un rythme rapide. Selon Bessaoud et al. (2019), cette politique a été conçue pour s'adapter aux fluctuations des revenus pétroliers. Plusieurs programmes ont été développés depuis, notamment le Programme national de développement agricole (PNDA 2000-2010), la Politique de renouveau agricole et rural (PRAR 2010-2014). Enfin, le Plan dit "FELAHA" est entré en vigueur en 2014 et s'est poursuivi jusqu'en 2020.

La région des Ziban a été une destination très convoitée par les investisseurs, notamment, de par les ressources dont elle dispose pour développer la culture du palmier dattier et promouvoir la production des cultures maraichères.

Aux termes de cette mise en culture "effrénée", particulièrement, à partir des années 1990, les sols de la région des Ziban sont potentiellement exposés à divers enjeux, qui pourraient réduire la production agricole et menacer la survie de l'écosystème.

La région des Ziban a fait l'objet de nombreux travaux sur les sols. La recherche sur la taxonomie et la cartographie des sols est limitée, en particulier au cours des 30 dernières années. La région des Ziban en Algérie a déjà fait l'objet d'études pédologiques à différentes échelles, allant du 1:500 000 à des échelles détaillées (Ramdane, 2001). Les résultats de ces investigations n'ont pas permis de concilier la vision des scientifiques et celle des agriculteurs sur l'utilité des analyses de sol, notamment pour déterminer les différents types de sol, leurs contraintes naturelles et leurs potentialités. Malheureusement, ces données ne permettent pas de réconcilier les visions de ces deux acteurs et de changer leurs perceptions respectives. De même, les résultats sur la caractérisation des sols, sont souvent obtenus dans le cadre de travaux portant sur des aspects strictement agronomiques ; de telles données sont insuffisantes pour décrire les propriétés des sols et prendre connaissance des processus de leur évolution, et connaître leur typologie.

De ce fait, les informations pédologiques actuellement disponibles sont incomplètes et limitées dans l'espace ; ce qui peut limiter leur utilisation, notamment pour réaliser un diagnostic précis des pédons et pour classer les sols des Ziban selon les critères préconisés par les systèmes internationaux de classification des sols.

La gestion durable de l'agriculture saharienne et la survie des écosystèmes oasiens dépendront plus que jamais d'une connaissance précise de la diversité spatiale des sols.

Le travail de cette thèse a été proposé pour apporter une contribution pour la connaissance des sols selon trois points de vues : i) la caractérisation et fonctionnement, ii) monitoring, iii) et enfin la typologie selon les systèmes de classification WRB (2015) et Soil Taxonomy de l'USDA (2014).

La mise en exécution des travaux relatifs à ces trois points a suivi le cheminement et la chronologie suivants :

- ❖ Le diagnostic qui a été établi en 1991 par Abdesselam (1991) et Belghemmaz (1991) sur les propriétés physico-chimiques ainsi que sur les processus de formation et la typologie des sols à accumulations gypso-calcaires dans la région de Ain Ben Noui et ses environs, a été repris en vue de le comparer avec celui qui a été réalisé après 30 de mise en exploitation, c'est-à-dire en 2021.

- ❖ Cette étude aborde également le problème de salinisation des sols des agroécosystèmes oasiens de Tolga situés dans la partie occidentale des Ziban (Zab occidental). Cette partie des

Ziban a été choisie parce qu'elle contient la majorité des meilleures oasis de tous les Ziban et se caractérise par le développement de l'agriculture oasienne ; cette activité est centrée sur la culture du palmier dattier et la production du maraichage. L'étude s'est donc focalisée sur l'état de dégradation de l'écosystème oasien de la région de Tolga et ses environs par la salinisation secondaire et le problème d'accumulation des eaux de drainage. Le travail sur cet aspect a été accompli selon deux approches : étude classique (prospection de terrain, observations, descriptions et analyses de laboratoire) qui est complétée et validée par le traitement des images satellitaires. Ce volet de travail a été réalisé en étroite collaboration avec l'université de Gagliari.

❖ En 2021, les sols de dix sites situés dans le Zab occidental, en l'occurrence les oasis situées entre Ain Ben Noui, El Hadjeb et Tolga d'une part, et d'autre part, les oasis qui font partie du bassin versant de l'oued Djedi et qui sont comprises entre Oumache, M'lili et Ourlal, ont été décrits, in situ, puis caractérisés de points de vues physico-chimique et morphologique. Leurs classifications ont été obtenues selon les systèmes déjà énoncés. La comparaison entre les deux approches de classification des sols, en vue d'essayer de rendre compte de leur compatibilité aux sols de la région d'étude, a été également abordée. Le fonctionnement des sols des agroécosystèmes oasiens a été également entrepris.

❖ La dynamique des agroécosystèmes due, notamment, à leur utilisation durant les 30 dernières années, et les implications des changements qui auraient impacté les propriétés et processus des sols, voire leur typologie, ont été étudiés en combinant les résultats issus sur les mesures des paramètres du sol, la description des principaux aspects qui caractérisent l'état de surface des sols, avec les résultats de la technique de télédétection qui ont été obtenus grâce à la collaboration avec une co-auteure de l'université de Dublin (Irlande).

❖ Le monitoring de ces changements sert également pour expliquer les changements d'usage et les changements d'occupation du sol. Les concepts de 'Soil genoforms et Soil phenoforms' ont été introduits pour tenter d'expliquer les changements qui auraient affecté la typologie des sols.

Les résultats de cette recherche ont été structurés en fonction de leur nature et présentés dans le manuscrit de cette thèse dont le plan est articulé comme suit :

i) **Partie I** qui contient deux chapitres : Chapitre 1 : Aperçu sur la biogéographie, climat et sols des régions arides et semi-arides ; Chapitre 2 : Caractéristiques biophysiques de la région des Ziban.

ii) **Partie II** : avec un seul chapitre qui décrit en détail la méthodologie de travail.

iii) **Partie III** : Résultats et discussion qui est scindée en quatre chapitres :

Chapitre 1 : Etat global des sols de la région de Ain Ben Noui et ses environs en 1991 ;

Chapitre 2 : Dynamique des agroécosystèmes : incidences pédologique et agro-environnementale de 30 ans de mise en culture ;

Chapitre 3 : Utilisation de la télédétection et de l'approche conventionnelle pour l'évaluation de la dégradation des sols dans les agroécosystèmes oasiens des Ziban (Tolga)

Chapitre 4 : Typologie des sols dans les agroécosystèmes des Ziban

Enfin, toutes les conclusions qui ont pu être tirées au terme de l'élaboration de cette thèse et les perspectives de ce travail, ont été présentées dans la **conclusion générale**.

Chapitre I : Aperçu sur la biogéographie, climat et sols des régions arides et semi-arides

1. Biogéographie et climat des régions arides et semi-arides

1.1 Concept des régions arides et semi-arides

Les zones arides sont généralement définies comme des régions où le taux d'évaporation est supérieur aux précipitations. Elles se caractérisent également par un manque d'eau généralement persistant, des sécheresses récurrentes, une grande variabilité climatique et une vitesse élevée des vents et diverses formes de dégradation des sols, notamment la désertification (Cherlet et al., 2018) et la perte de biodiversité (Gaur et Squires, 2018). Cependant, pour Nyuma et Chur (2022), les terres arides et semi-arides se définissent comme étant des régions dont le rapport entre les précipitations annuelles moyennes (r) et l'évaporation potentielle annuelle moyenne (E_o), c'est-à-dire r/E_o , est $<40\%$.

Par ailleurs, le terme "aride" implique une sécheresse prolongée ; il s'applique aussi bien au climat lui-même que pour caractériser les terres qui en sont affectées. Dans ces régions la capacité à produire des cultures agricoles est limitée. En général, sur les terres arides, l'évaporation potentielle (ETP) de l'eau du sol dépasse les précipitations. Selon leur degré d'aridité, les terres peuvent être qualifiées de forêts sèches, de maquis de buissons ou broussailles, prairie ou savane, ou désert. Le terme "aride" ne caractérise pas valablement les sols, car ils peuvent varier de nombreuses façons (Creswell et Martin, 1998).

1.2 Biogéographie et climat

Le climat dans les régions ne permet pas la production de cultures sans l'irrigation. Dans les régions froides, les précipitations annuelles sont généralement inférieures à 250 mm. Elles peuvent atteindre 500 mm dans les régions tropicales. La végétation naturelle est composée d'arbustes du désert (Brady, 1984).

En utilisant le rapport entre les précipitations annuelles moyennes et l'ETP annuelle moyenne, le globe terrestre est divisé en six zones d'aridité (tableau 1). Les zones sèches comprennent les régions arides, semi-arides et subhumides sèches (autres que les régions polaires et subpolaires) dans lesquelles ce rapport est compris entre 0,05 et 0,65. Les zones où ce rapport est inférieur à 0,05 sont des zones hyperarides. Les zones où ce rapport est supérieur à 0,65, sont des zones humides.

Les zones arides couvrent près de 54 millions de km^2 du globe. Les zones semi-arides sont les plus étendues, suivies des zones arides et des terres subhumides sèches. Ces zones d'aridité

s'étendent sur tous les continents, mais c'est en Asie et en Afrique qu'on les trouve le plus souvent (White et Nackoney, 2003).

Tableau 1 : classification des climats des régions arides

Classes d'aridité	P/ETP
Zone hyperaride	<0,03
Zone aride	0,03- 0,20
Zone semi-aride	0,20-0,50

D'après UNESCO (1979) in Dregne (1983)

Selon Blaire (2017), l'indice d'aridité qui caractérise les régions arides est compris entre 0,03 et 0,20 ; la végétation se compose d'espaces clairsemés de graminées annuelles ou vivaces, d'arbustes, de cactus ou de petits arbres répartis de manière inégale. Les précipitations maximales varient de 100 à 300 mm par an.

1.3 Caractéristiques du climat des régions arides et semi-arides

Les régions arides et semi-arides sont caractérisées par des conditions environnementales hostiles qui comprennent des précipitations faibles et irrégulières, une vitesse de vent élevée, un rayonnement solaire intense et une ETP élevée pendant la majeure partie de l'année (Modares et da Silva, 2007) cités par Golla (2021) et Rathore et al. (2019).

Les précipitations annuelles dans les régions arides varient entre 0- 300 mm avec une variabilité interannuelle de 50 à 100 % ; tandis que dans les régions semi-arides, les précipitations se situent entre 300- 600 mm avec une variabilité interannuelle de 25 à 50 % (Barakat, 2000 ; Gaur et Squires, 2018).

1.3.1 Allure des précipitations dans les régions arides et semi-arides

Dans les régions arides et semi-arides, les valeurs moyennes des précipitations ont très peu de signification en raison de la distribution irrégulière des précipitations ; lorsqu'elles le sont, l'étendue de la variation est également indiquée. Cette variabilité est à la fois temporelle et spatiale (Verheye, 2009).

Pour mettre l'accent sur l'allure des précipitations dans ces territoires, notamment en termes de la temporalité de leurs variations et aussi leurs fluctuation d'un espace à un autre même au sein d'un même territoire, Verheye (2009) analysé, très brièvement, ces variabilités à travers un exemple concret et édifiant et ce, en se référant aux données (tableau 2) des précipitations

moyennes de deux stations situées en Algérie : la station de Beni Abbès et Tabelbala qui sont situées sur la même latitude et distantes l'une de l'autre d'environ 130 km.

a) La variabilité temporelle : elle affecte non seulement le début et la durée des pluies au cours de l'année, mais joue également un rôle dans les différences d'une année à l'autre. La variabilité est la plus forte dans la zone hyperaride, où la valeur moyenne des précipitations est composée d'à peine 2 ou 3 événements de pluie survenant sous forme de tempêtes importantes sur plusieurs années.

b) La variabilité spatiale : qui est encore plus étonnante, car dans les zones arides, la plupart des précipitations se produisent sous forme d'averses isolées sur des distances relativement courtes. Le tableau 2 montre que si les précipitations sont relativement égales pour certaines années, comme par exemple, pour 1932, 1945, 1946 et 1947 ; mais, il n'en est pas de même pour la plupart du reste des années où la variation est $>100\%$ entre les deux endroits pour les années 1936, 1938 et 1939.

Tableau 2 : Variabilité des précipitations dans deux localités algériennes (Verheye, 2009)

Année	Moyenne annuelle des précipitations (mm)	
	Beni Abbès	Tabelbala
1934	33.9	35.0
1935	17.2	20.0
1936	42.9	8.0
1937	27.2	12.0
1938	52.8	12.0
1939	29.5	8.5
1940	5.3	22.7
1941	33.5	19.0
1942	40.0	30.0
1943	58.5	40.0
1944	5.8	27.0
1945	15.8	13.3
1946	20.9	20.0
1947	7.0	<1

c) Tempêtes de pluie brèves et intenses : il s'agit d'une troisième caractéristique des précipitations dans les déserts ; ces précipitations se produisent sous la forme de tempêtes de pluie brèves et intenses. Arrivant sur une surface sèche et chauffée, comme c'est souvent le cas dans les régions arides, une partie de l'eau de pluie s'évapore immédiatement et ne participe pas aux processus de formation du sol. L'intensité élevée des précipitations entraîne, en revanche, une saturation rapide du sol au niveau des couches superficielles et crée un ruissellement latéral et le processus d'érosion s'enclenche, notamment sur les terrains en pente.

1.3.2 Les vents : mode d'action et effets

Dans les territoires arides et semi-arides, les vents sont, en général, très forts, en particulier durant la journée. Certains de ces vents se produisent à des périodes plus ou moins fixes de l'année et portent des noms particuliers tels que l'harmattan (au sud du Sahara), le sirocco (Afrique du Nord et Méditerranée occidentale), chamsin ou khamasin (Moyen-Orient), etc.

Dans les zones semi-arides, la déflation est relativement moins importante, à l'exception dans les endroits où la couverture végétale est clairsemée, détruite par l'homme ou ayant subi l'impact du surpâturage (Verheyne, 2009).

L'action des vents peut avoir un impact abrasif sur les matériaux du sol ; le vent chargé de poussière contribue à la désintégration physique des surfaces des roches et du sol.

Les effets des vents sont souvent associés à la chaleur. Selon Blanco Canqui et Lal (2009), les effets de ces deux facteurs du climat sont d'augmenter l'ETP et les conséquences de l'aridité. La température élevée de l'air assèche le sol rapidement et accroît le potentiel d'érosion éolienne. Par contre, lorsque le sol est humide, le transport éolien ne peut pas se produire parce que les particules du sol sont mieux liées par les forces de cohésion.

Le processus de transport éolien des particules sur des distances plus ou moins grandes se fait en fonction de la vitesse du vent et de la taille des éléments emportés. Le dépôt des éléments grossiers et fins donne naissance à diverses formes d'accumulations éoliennes dont les formations dunaires qui sont fréquentes dans les régions arides et semi-arides.

L'érosion éolienne est un problème majeur de dégradation des terres dans les régions arides et semi-arides où les précipitations irrégulières et insuffisantes, les vitesses de vent élevées, la topographie de surface lisse, la texture du sol légère, une mauvaise agrégation et une faible couverture végétale sont des aspects fréquents (Feng et Sharratt, 2005 ; Youssef et al., 2010 ; Başaran et al., 2017).

L'érosion éolienne et les émissions de poussières qui en résultent ont des implications graves sur la dégradation des terres et la santé des écosystèmes dans les régions arides et semi-arides (Verheye, 2009 ; Başaran et al., 2017). Le travail minimum du sol et la rotation des cultures ont des impacts significatifs sur la protection de la surface du sol contre l'érosion éolienne (Başaran et al., 2017). C'est ainsi qu'une conservation appropriée des sols de ces écosystèmes est nécessaire ; selon Mohamed et al. (2009) cités par Golla (2021), cette conservation est possible moyennant l'intégration des facteurs biophysiques et les paramètres socio-économiques de ces régions.

2. Différents types de terres arides et impact de la sécheresse sur leur mise en valeur

Selon l'indice d'aridité, il existe quatre catégories de terres arides (tableau 3) : i) les régions hyperarides, ii) arides, iii) semi-arides et iv) subhumides sèches. Ainsi, la principale distinction pourrait être faite entre les déserts (hyperarides et arides) et les semi-déserts (semi-arides).

Tableau 3 : Surfaces occupées par divers types de terres arides dans le monde

Régions	Hyperarides	Arides	Semi-arides	Sub-humides sèches
Surface (%)	6,6	10,6	15,2	8,7
Surface totale(%)	41,1			

Source : (M.K. Gaur and V.R. Squires, 2018) ; tableau adapté et modifié

Les zones semi-arides se trouvent pratiquement dans les différentes régions du monde. En tant que telles, les terres arides occupent 41 % de la surface terrestre et abritent plus d'un tiers de la population mondiale (Mortimore et al., 2009 ; Gaur et Squires, 2018 ; Qader et al., 2021). Tandis que Prăvălie (2016) et Koutroulis (2019) font état de 46% comme étant le taux le plus récent de l'étendue que couvrent ces terres.

Ces régions recèlent un potentiel important, particulièrement dans le domaine de l'agriculture. D'après UN EMG (2011) cité par Gaur et Squire (2018) et Qader et al. (2021), il y a environ 2,5 milliards de personnes qui vivent dans ces territoires ; les moyens de subsistance de cette population dépendent étroitement des services écosystémiques des terres arides. Ces régions comptent 50 % du bétail mondial et son agriculture produit 44 % de la nourriture mondiale ; elles abritent plus de 1/3 de la population humaine mondiale (Gaur et Squires, 2018). Cependant, ces régions se caractérisent encore par la précarité ; selon la FAO (2019), la majorité des pauvres y vivent et leur productivité de base provient de l'agriculture et de l'élevage et à petite et grande échelles.

Les écosystèmes des zones arides, bien qu'ils fournissent un large éventail de biens et de services, ne sont pas toujours reconnus à leur juste valeur comme le sont les autres écosystèmes terrestres de la planète. Les zones arides soutiennent la flore, la faune et l'homme de manière importante et souvent unique (White et Nackoney, 2003). En outre, dans les sols arides, les communautés des sols sont généralement composées d'un nombre limité de niveaux trophiques, et ces niveaux deviennent souvent plus simples au fur et à mesure que l'environnement devient extrême (Cary et al., 2010) cités par Blaire (2017). Ainsi, les écosystèmes arides présentent, en général, une activité biologique limitée et un taux de carbone organique faible. Ce faible taux de carbone organique est un facteur important dans la structure et le fonctionnement des sols arides (Blaire, 2017).

Sur le plan de la mise en valeur des terres arides, d'après Creswell et Martin (1998), selon la manière par laquelle la sécheresse peut affecter l'agriculture, plusieurs degrés de sécheresse ont été définis : **i)** le premier est celui où le climat sec est modifié par des pluies saisonnières. Dans une telle région, il est possible de produire une large gamme de cultures annuelles pendant la courte saison des pluies, pour subvenir aux besoins humains et nourrir les animaux. Mais, peu d'arbres fruitiers peuvent croître sans aucune restriction dans de telles conditions climatiques. **ii)** La deuxième situation est une aridité qui dure toute l'année, parfois interrompue par des pluies légères ou irrégulières ; la production des cultures devient presque impossible. **iii)** La troisième situation est celle où l'eau provenant des puits ou des forages est utilisée via des canalisations ou d'autres moyens afin de permettre une agriculture normale.

L'agriculture dans ces régions est très dépendante de l'eau ; dès lors que les précipitations sont limitées et leur répartition est irrégulière, cela peut souvent se traduire par de faibles rendements et parfois par une perte totale des récoltes (Li et al., 2000).

En outre, ces régions peuvent parfois présenter des conditions d'environnement quasiment hostiles à toute activité humaine. C'est pourquoi, Gaur et Squires (2018), ont précisé que le manque d'eau, les denrées alimentaires limitées ainsi que les phénomènes climatiques extrêmes ont, généralement, fait de ces zones des endroits extrêmement difficiles pour tout type d'habitation. Cette situation préoccupante devrait encore s'aggraver en raison du changement climatique et de la modification des régimes météorologiques dus aux activités anthropiques (Gaur et Squires, 2017).

Les régions arides et semi-arides renferment une grande variété de sols que l'on peut également rencontrer dans des environnements plus humides (par exemple, les Leptosols, les Regosols, les Arenosols et les Fluvisols). La formation des sols typiques des zones sèches est

conditionnée par l'aridité ; l'accumulation et/ou la redistribution des composés inorganiques (sels) est l'aspect fondamental qui marque ces sols (FAO, 2001).

3. Caractéristiques et types de sols des zones semi-arides et arides

Les sols des régions arides reflètent l'environnement actuel dans lequel ils se trouvent et les climats auxquels ils ont été exposés, sur une période qui s'étend parfois sur un million d'années ou plus. Les climats préhistoriques ont certainement connu des périodes humides et sèches qui ont, sans aucun doute, influencé les sols actuels (Dregne, 1983). De plus, ils se distinguent par leur régime hydrique sec (Foth, 1990) dit aussi aridic (Curtis Monger, 2006). Bien que la plupart des auteurs soient d'accord sur le fait que l'aridité signifie le déficit hydrique ; cependant, la définition technique du concept est variable. Cependant, pour Creswell et Martin (1998), le terme "aride" ne caractérise pas valablement les sols, car ils peuvent varier de nombreuses façons.

La plupart des sols ayant un régime hydrique aridic voire torric, se trouvent dans les régions arides ou désertiques où la végétation naturelle spécifique est essentiellement composée d'arbustes et des cactus. Les cultures ne peuvent pas croître dans ces environnements sans irrigation.

Le concept des propriétés 'Aridic' d'un sol, se réfère au matériau de sol ayant un faible contenu en M.O, manifestant une activité éolienne visible, présentant une couleur généralement claire et qui est 'virtuellement' saturé en bases échangeables (FAO, 2001). En outre, les sols qui se développent dans les régions arides sont souvent alcalins ou salés (Creswell et Martin, 1998). Cette alcalinité est attribuée à l'absence d'un lessivage important dans les sols de ces régions (Brady et Weil, 2014).

3.1. Les principaux types de sols des régions arides et semi-arides

La variabilité du matériau originel, la physiographie, l'histoire de l'évolution du paysage et le climat se sont combinés pour donner une diversité de sols dans les zones arides. Comme le nom de l'ordre l'indique, les Aridisols de la Soil Taxonomy sont associés aux climats arides, mais tous les sols des régions arides ne doivent pas être considérés comme Aridisols. En fait, les Aridisols occupent moins de la moitié des terres arides (Curtis Monger et al., 2012).

Les sables éoliens sont importants en raison de leur prééminence physique et de la large gamme de formes de terrain distinctes (en particulier les types de dunes) qu'ils produisent. Les sables éoliens très fins et fins se présentent généralement sous forme de dunes (Bagnold, 1941) in Soil Survey Manual (2017), et les sables moyens ont tendance à former des nappes

de sable. Les sables éoliens sont fréquents dans les régions chaudes et sèches, mais pas seulement. Ils se composent généralement de sables à forte teneur en quartz et à faible teneur en matériaux argileux. Les dunes de sable peuvent contenir de grandes quantités de carbonate de calcium ou de gypse, en particulier dans les déserts et les semi-déserts (Soil Survey Manual, 2017).

Outre, les Aridisols, d'autres types de sols des climats arides sont les Entisols, les Vertisols, les Oxisols et les Andisols.

a) Les Entisols : l'argument pour avoir des Entisols dans les climats arides était de préserver le concept azonal, qui identifiait les sols dépourvus d'horizons pédogénétiques indépendamment de la zone bioclimatique dans laquelle ils se trouvent (Smith, 1986) cité par Curtis Monger et al. (2012). Les Entisols peuvent aussi être rencontrés, généralement, dans les parties des régions arides où l'on observe une forte activité éolienne ou fluviale. L'horizon de surface est riche en sable par rapport aux horizons de subsurface. La texture du sol est sableuse avec une teneur moyenne en sable de 89% (Praveen-Kumar, 2009).

b) Les Oxisols : la raison qui fait que ce type de sols peut apparaître sous les climats arides était que les propriétés oxiques, même si elles étaient irriguées, resteraient limitantes et que les difficultés de gestion seraient similaires à celles des autres Oxisols ; ainsi, ils devraient être regroupés avec les autres Oxisols malgré leur présence dans les climats arides (Smith, 1986). Ils représentent 7,5% des sols du monde (Buol et Eswaran (1999).

c) Les Vertisols : ceux rencontrés sous climat aride présentent des caractéristiques de gonflement et de retrait similaires à celles des Vertisols rencontrés ailleurs. Ces sols sont soit argileux collant et de couleur foncée, soit des Vertisols des basaltes, calcaires et schistes (Soil Survey Manual, 2017).

d) Les Andisols : ce type de sols peut aussi se former en conditions arides.

e) Les Mollisols : ils sont très limités et ne se trouvent qu'en zones situées dans le régime d'humidité aridic et qui manifestent un épipédon mollic. De tels sols sont regroupés avec les Mollisols plutôt qu'avec les Aridisols (Smith, 1986 ; Ahrens et Eswaran, 2000) cités par Curgis Monger (2012).

3.2. Facteurs du milieu et processus de formation des sols

Les processus qui seront présentés sont ceux qui sont largement répandus dans les régions où règne l'aridité climatique. Cette aridité climatique peut être soit, extrêmement rude telle que dans les environnements hyperarides ($P/ETP = 0,03$) qui ne reçoivent que très peu de quantités de pluie. Dans ces conditions, les précipitations n'auront pratiquement que très peu

d'influence sur la formation et l'évolution des sols. Soit, cette aridité est comprise entre 0,03-0,20 ou entre 0,20-0,50, c'est-à-dire, elle caractérise respectivement les milieux arides et semi-arides où le couvert végétal et les précipitations, même s'ils sont encore réduits, surtout en régions arides, pourraient, un tant soit peu, impacter certains processus comme la dissolution et précipitation des sels, la migration des argiles et de la MO, etc.

Les processus de pédogénèse affectant les sols, seront présentés en fonction des degrés d'aridité du climat.

3.2.1. Sols évoluant sous une aridité extrême : les déserts

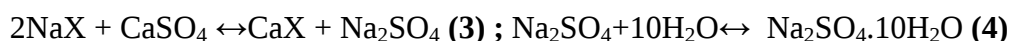
Pendant les périodes de sécheresse et dans les déserts, les mouvements locaux du vent peuvent mélanger et associer des matériaux de sol de différentes tailles, y compris des matériaux à forte teneur en argile. Les agrégats d'argile de la taille d'un sable (par exemple, le parna) ; ces dépôts éoliens sont similaires au lœss, ils peuvent même former des dunes de parna. Dans les zones où le sable et les matériaux éoliens plus fins sont intimement mêlés, les matériaux éoliens peuvent être identifiés de manière générique comme des dépôts éoliens plutôt que comme des lœss ou des sables éoliens distincts (Soil Survey Manual, 2017).

Malgré les analogies dans la genèse des sols, les différences de climat, de géologie et de végétation des terres arides créent des caractéristiques de sol uniques, de sorte que la morphologie et les propriétés du sol varient d'une zone aride à l'autre (Bronick et Lal, 2005).

En raison des faibles précipitations dans les sols désertiques, les minéraux issus de la décomposition des roches ne sont pas lessivés du sol. Dans certains cas, lorsque le sol est périodiquement inondé ou irrigué, il peut également être salin. Ces sols supportent peu de cultures (Creswell et Martin, 1998).

3.2.2. Sols se situant dans des zones à climat moins hostile

L'effet des précipitations sur les processus d'altération des roches dans les régions arides et semi-arides sont limités. Toutefois, d'après Verheye (2009), aussi faibles qu'elles soient, les quantités de pluie pénètrent dans le sol sur une petite profondeur, cette dernière étant déterminée par la quantité de pluie et par la perméabilité du sol, elle-même affectée par la texture et l'apparition d'une imperméabilisation de surface. Cette humidité inhibe très faiblement l'altération chimique et la dissolution du CaCO_3 selon les équations (1) et (2) ou des sels selon les équations (3) et (4) :



Etant limité à la partie supérieure du sol, le front d'humectation est limité à la partie supérieure du sol, la différenciation des horizons est limitée aux couches superficielles et les sols prennent la forme d'un profil A-C-R ou A-R, parfois A-Cca-R, peu profond.

Mais, dans le cas des sols qui se situent sous des climats semi-arides avec une pluviométrie relativement élevée, l'eau parvient à s'infiltrer dans le sol et atteint une profondeur assez grande ; le profil prend une forme A-(B)-Ca ou A-R. A-(B)-Ca ou A-Bca-C.

En raison de l'irrégularité spatiale des pluies et de l'apparition d'un ruissellement latéral concentrant l'eau supplémentaire dans des dépressions ou de micro-dépressions, le développement du profil du sol peut varier d'un endroit à l'autre dans les zones arides. Ce phénomène pourrait, en quelque sorte, expliquer l'apparition de profils A-Bt-C traduisant l'illuviation d'argile dans quelques endroits isolés des déserts.

Les périodes prolongées de déficit hydrique ralentissent également l'élimination ou le lessivage des sels solubles, qui s'accumulent encore davantage en raison de l'ETP qui atteint des pics élevés (Ewing et al., 2006). Ainsi, les sols arides ont tendance à accumuler du CaCO_3 , du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, ou de la silice (Skujins, 1991).

La topographie, ainsi que la couverture végétale elle-même, déterminent les relations entre le ruissellement et l'infiltration, influençant ainsi les conditions d'humidité du sol (Grunwald, 2006). Le sol, le climat et la végétation sont considérés comme un système couplé : le climat affecte les sols et la végétation de manière indépendante, tandis que les sols et la végétation interagissent les uns avec les autres. Cependant, certains facteurs peuvent, dans des conditions données, exercer une influence particulièrement forte sur la pédogenèse (Fitzpatrick, 1983). La végétation est considérée par Funning D.S. et Faunning M.C.B. (1989) in Rodríguez-Rastrero et al. (2023), comme un "facteur actif de formation", une variable capable d'exercer certains effets indépendants du climat in (Rodríguez-Rastrero et al., 2023), de sorte que différents types de couverture végétale peuvent déterminer différents aspects du sol compte tenu de l'homogénéité des autres facteurs.

3.3. Sols des régions arides d'Algérie

En Algérie, les sols arides représentent près de 95 % de la surface du pays dont territoire national, dont 80 % se trouvent dans le domaine hyperaride. La formation et l'évolution des sols sont essentiellement conditionnées par le climat et la salinité. A cause de l'insuffisance d'humidité, les processus fondamentaux d'altération des roches mères comme l'hydrolyse, la dissolution, l'hydratation ou même l'oxydation sont réduits à leur plus simple expression

(Halitim, 1988). Le processus de pédogénèse le plus actif dans ces régions est celui dû à l'érosion éolienne (Benchetrit, 1956).

Tout comme la plupart des sols arides du monde, les sols arides d'Algérie évoluent également sous l'influence des conditions environnementales sévères ; ils développent des caractéristiques plus ou moins constantes telles que : la profondeur est souvent réduite, évolution lente, MO peu abondante et fortement minéralisée, minéraux peu altérés ; et en plus, ils sont affectés par la salinité (Dellal et Halitim, 1992). Aubert (1962) a ajouté à ces sols, d'autres caractéristiques distinctives comme : état structural faiblement développé ; éléments solubles accumulés en surface ou partiellement lessivés et s'accumulent à différents niveaux du profil jusqu'à donner naissance à des nodules ou à des croûtes calcaires ; gypseuses ou salées ; fréquence, au moins dans les sols des zones semi-arides, des phénomènes d'hydromorphie. En général, les colloïdes argileux y sont stables. Ces sols (arides) sont très souvent calcaires et salés.

L'absence de végétation ou sa rareté font également que ces sols sont très faiblement pourvus en matière organique et en humus. Ce sont les raisons pour lesquelles ils sont sensibles à la dégradation, et plus particulièrement sujets, à l'érosion éolienne. Il est aussi important de préciser que des paléosols s'y étaient formés à des époques antérieures (Dutil, 1971 ; Dubost, 2002).

Les sols des régions arides d'Algérie se situent tous au niveau du Sahara. D'après Khadraoui (2010), la plus grande majorité de cet immense territoire est occupé par de vastes étendus de regs, ergs et chotts dont les terres ne sont pas cultivables. En effet, Toutain (1977) a tenté de classer grossièrement ces sols en 3 grands types : **i)** les sols détritiques (regs, sols sablonneux et graveleux, dunes, ergs) ; **ii)** les sols limono-argileux (terrasses des vallées, zones d'épandage des crues Maadar...) ; **iii)** et les sols salés (nappes phréatiques salées, sebkha, chott). Parmi les principaux traits caractéristiques de ces sols, Halitim (1988) et Dellal et Halitim (1992), évoquent l'omniprésence de sels dans les phases liquide (sels solubles et ions de complexe d'échange) et solide (calcite et gypse).

Par ailleurs, la cartographie des sols arides de l'Algérie ne couvre pratiquement que très peu de surface ($1/20^{\text{ème}}$) au $1/100.000$ (Halitim, 1988) ; de ce fait, leur diversité typologique n'est pas encore précisément élaborée. Mais, en général, les sols qui ont été distingués, en fonction du niveau de salinité, sont : **i)** Les sols sans accumulation de sels ; **ii)** Les sols calcaires ; **iii)** Les sols gypseux ; **iv)** Les sols cumulant dans leurs profils à la fois du calcaire et du gypse en

quantités relativement abondantes et v) Les sols salés dits Solonchaks dans la nomenclature des différentes versions de la WRB.

4. Monitoring du changement du sol vs Concepts de Soil Genoforms & Soil Phenoforms

En plus de la classification traditionnelle basée sur la pédogénèse (par exemple, la taxonomie), plusieurs approches ont été proposées pour réunir la classification des sols basée sur les trajectoires de la genèse et les résultats basés sur les propriétés fonctionnelles des sols. Il s'agit notamment de la classification des couches superficielles des sols de la FAO (Broll et al., 2006), des variétés de sols dans le cadre de la classification génétique des sols de la Chine (Shi et al., 2010) et du concept génoforme - phénoforme (Droogers & Bouma, 1997 ; Rossiter et Bouma, 2018). Dans le cadre de ce concept, les classifications des sols sont considérées comme des génoformes, qui ne varient pas dans le temps à des échelles de temps humaines (par exemple, le climat, les organismes à long terme, ou l'occupation des sols, le relief et le matériau parental agissant dans le temps). Les sols qui sont suffisamment différents au sein d'une génoforme, qui affectent de manière substantielle la fonction du sol et qui sont persistants dans le temps, sont classés comme phénoformes (par exemple, les propriétés gérées connues pour être importantes dans la fonction du sol, telles que le pH et le carbone organique). Les génoformes agissent comme des contrôles fondamentaux sur les phénoformes du sol et leur fonction. Cela permet d'exprimer clairement les liens entre les cartes pédologiques et les fonctions.

En 2018, Rossiter et Bouma (2018) ont revisité le concept de génoforme et de phénoforme du sol proposé, à l'origine, 20 ans auparavant par Bouma et Droogers (1999). Ils ont défini les génoformes du sol comme des " classes de sol telles qu'identifiées par le système de classification des sols utilisé comme base pour la cartographie détaillée des sols dans une région donnée ". Ce concept est surtout applicable au niveau le plus bas d'un système de classification hiérarchique, c'est-à-dire celui qui est utilisé pour produire des cartes (semi) détaillées. Aux États-Unis, il s'agit de la série des sols, appliquée à une échelle de 1:12 000 à 1:24 000. Pour les cartes utilisant la WRB comme légende, ces sols sont nommés avec un groupe de sol de référence et trois qualificatifs principaux pour les cartes à une échelle de conception de 1:250 000, et avec tous les qualificatifs applicables pour les cartes plus détaillées (IUSS Working Group WRB, 2015). En Allemagne, il s'agit de sous-types de sol (Bodensubtypen) en combinaison avec le type de substrat, pour la cartographie très détaillée

des variétés de sol (*Bodenvarietaten* ") (Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden, 2005), et de la même manière dans d'autres programmes nationaux de cartographie. En effet, le concept de phénoforme du sol vise à révéler les effets de la gestion, qui se situe à ce niveau de détail.

“Soil genoform” n'est pas nécessairement le sol naturel ou le sol le moins interventionniste de l'unité cartographique. C'est plutôt le plus commun, le concept central de l'unité cartographique, utilisé pour décrire le profil typique du sol et ses propriétés. Il faut quand-même noter le lien étroit entre la géographie des sols et la cartographie : bien que les individus du sol ("pédons") soient les objets du système de classification, l'utilisateur de la carte se réfère aux noms donnés aux unités cartographiques, qui sont basées sur la classification.

Dans les classifications modernes, les classes de sol sont censées être naturelles (Cline, 1949) cité par Rossiter (2021), ce qui signifie que les groupes doivent être aussi homogènes que possible en ce qui concerne leurs propriétés et, par extension, leurs fonctions. En raison de la corrélation spatiale des facteurs de formation des sols, ces classes sont également censées former des zones plus ou moins homogènes et géographiquement compactes, comme l'exprime le concept de polypédon (Haase, 1968) in Rossiter (2021) ou les "unités initiales du manteau pédologique" de Fridland (1974).

En outre, les propriétés utilisées pour distinguer les classes sont choisies de manière à être stables à moyen et long terme, c'est-à-dire pendant la période au cours de laquelle elles sont destinées à être utilisées. Elles sont généralement considérées comme le résultat de leur pédogenèse différentielle (Kubiena, 1958) cité par Baize (2021). Cependant, étant donné que la pédogenèse sur de longues échelles de temps ne peut être observée mais seulement déduite, les systèmes de classification modernes établissent des seuils censés représenter des différences importantes dans la fonction du sol (résultant vraisemblablement d'une pédogenèse différentielle) et des arbres de répartition dichotomique basés sur ces seuils. Grâce aux efforts de Smith et de ses collègues, et aux révisions apportées au fil des années sur la base d'observations approfondies des propriétés et des fonctions des sols sur le terrain, la taxonomie des sols s'est avérée fournir une stratification utile de la couverture pédologique à ses six niveaux hiérarchiques de plus en plus détaillés.

5. Perspectives de l'agriculture dans les régions arides

L'agriculture de ces régions est confrontée à des défis multiples et complexes liés au déclin affectant les facteurs de productivité et à la dégradation des ressources naturelles (Rathore et

al., 2019). En raison de divers facteurs naturels et anthropiques affectant la production agricole, de nombreuses régions arides et semi-arides sont confrontées à l'insécurité alimentaire (Qader et al., 2018). Dans ces régions, la production d'approvisionnements adéquats et renouvelables de nourriture, de fourrage et de bois de chauffage est gravement limitée par la rareté de l'eau (Lövenstein et al., 1991). Des précipitations limitées et irrégulières entraînent souvent de faibles rendements agricoles et parfois une mauvaise récolte totale (Li et al., 2000).

Le problème de la dégradation des sols est l'un des facteurs les plus importants qui menacent la production agricole, ce qui se répercute sur la sécurité alimentaire, en particulier dans les régions arides et semi-arides (Mohammed et al., 2019) in Golla (2021). De nombreux pays des terres arides et semi-arides d'Afrique subsaharienne sont confrontés à la dégradation des terres, à une faible productivité de l'eau et à une forte variabilité des précipitations qui sont souvent associées au changement climatique (KaranjaNg'ang'a et al., 2018 ; Woldearegay et al., 2018). La dégradation des terres est une cause majeure de la pauvreté dans les zones rurales des régions arides des régions des pays en développement (Mesfin et al., 2018).

La dégradation des terres qui se produit dans les zones arides peut être définie comme une désertification ; elle peut avoir des effets préjudiciables sur la productivité et la biodiversité des écosystèmes (Tang et al., 2018 ; Li et al., 2021). Ces zones arides qui sont habitées par environ 3 milliards de personnes, jouent un rôle essentiel dans la dynamique mondiale du carbone (Lian et al., 2021) et contiennent une partie de la biodiversité la plus rare au monde (van der Esch et al., 2017). À l'échelle mondiale, les écosystèmes de ces régions sont également très fragiles et sensibles aux changements écologiques liés au changement climatique. A partir des années 1970, l'étendue de la désertification a été estimée entre 4 et 70 % de la superficie des zones arides du monde (Sivakumar et Ndiang'ui, 2007) cités par Huang et Zhai (2023), ce qui accroît les défis en matière d'approvisionnement en eau et de sécurité alimentaire. Ces dernières années, la dégradation des sols dans les écosystèmes des zones arides a été de plus en plus mise en avant (Huang et Zhai, 2023).

Les changements spectaculaires dans les zones arides sont provoqués par la conversion de ces zones à l'agriculture. Les espèces végétales endémiques sont remplacées par des espèces cultivées ; le sol est généralement peu couvert par la végétation et parfois nu et devient vulnérable à l'érosion éolienne et hydrique ; des engrais et des pesticides sont ajoutés, ce qui modifie la composition du sol ; et la capacité de rétention d'eau est altérée, ce qui engendre un changement du régime d'humidité pour les plantes et les animaux.

Chapitre 2 : Caractéristiques biophysiques de la région des Ziban

1. Géographie et historique des Ziban

Les toponymes Zab et Ziban ont été examinés par Meouak (2017) en émettant l'hypothèse que Zab pourrait être considéré comme un mot équivalent à wāḥ et désignerait une oasis, voire un pôle de peuplement spécifique à la région de Biskra. La région des Ziban se situe au sud du massif de l'Aurès, dans le Bas-Sahara algérien, « blottie entre montagne et désert ».

De point de vue géographique, la région des Ziban est adossée au flanc sud du Massif des Aurès en incarnant le début de la transition naturelle du piémont de l'Atlas saharien et le Sahara (ASGA, 2015) cité par Degui (2024).

1.1. Les Ziban : porte du Sahara

Toute la richesse en dattes que recèle la capitale des Ziban, ne suffit pas à justifier la taille de la ville. En cela Côte (1991) considère qu'à l'échelle du territoire national, Biskra est une des portes du Sahara algérien : celle du Sahara oriental, comme Laghouat l'est pour la partie centrale et Bechar pour l'ouest. Elle avait, incontestablement, « vocation » à ce rôle, car sa position de carrefour est inscrite de manière vive dans le soubassement du pays.

Biskra garde la porte sud de l'Aurès, comme Batna la porte nord. Cette position géographique fait des Ziban une région qui commande toute la partie orientale du Sahara algérien. D'après Côte (1991), l'avantage de Biskra par rapport à Laghouat ou Béchar est que cette région est, de loin, la plus riche du Grand Sud : la cuvette du Bas Sahara renferme à la fois les ressources en eau et en hydrocarbures les plus importantes du Sud. Cette situation a fait de Biskra une plaque tournante : grande place commerciale, centre de collecte des dattes, point de redistribution des marchandises pour le Sud, porte du tourisme saharien.

1.2. Aspect oasien de la ville de Biskra

Le site comme l'origine de la ville se confondent avec ceux de sa palmeraie. Ce site est classique au Sahara. L'oued Biskra, drainant une partie de la retombée sud de l'Aurès, il franchit la ride topographique en gorge, et construit au débouché un cône de déjection. La section aval de cet oued est formée de deux éléments importants de ce paysage qui sont valorisés à merveille : la gorge, qui concentre toutes les eaux d'écoulement, et permet de les saisir par des canaux de dérivation ; le cône, dont la pente douce favorise l'irrigation gravitaire, et dont la nature des sols est propice aux cultures irriguées. Ces éléments ont permis l'existence d'une palmeraie ancienne et importante à Feliache avec 100 000 palmiers. Actuellement, les dérivations à partir de l'oued sont substituées par des puits et forages

(Meouak, 2017). Malgré les empiétements du béton sur la palmeraie, celle-ci conserve un rôle notable : dans la population occupée, les actifs agricoles représentent encore 12% aujourd'hui.

1.3. Limites administratives

Biskra se situe au nord-est du Sahara septentrional entre les latitudes 34° 39' et 35° 24'N et les longitudes 4° 99' et 6° 79'E (ANAT, 2003) et à près de 420 km au sud-est d'Alger. Sa superficie de 21 509 km² représente environ 1 % de celle de l'Algérie. La wilaya de Biskra partage des frontières administratives avec Batna au nord, Khenchela à l'est, M'sila et Djelfa à l'ouest et par El oued et Ouargla au sud. Dans le cadre du découpage administratif de 2023, la limite sud de la wilaya de Biskra est représentée les wilayas déléguées de Touggourt, El M'gheir au sud et Ouled Djellal au sud-ouest.

2. Configuration du milieu naturel et découpage des Ziban

La région des Ziban est découpée par l'oued Biskra en 2 grandes parties : le Zab occidental dit "Gharbi" et le Zab oriental dit "Chergui" (Gabriela et al., 2018). Malgré la monotonie du paysage du Sahara, ces deux entités semblent présenter des caractéristiques physiographiques différentes. La forme du relief, la nature des sols, les systèmes oasiens et même la végétation naturelle, sont des aspects discernables.

Selon Côte (1991), le piémont du Ziban est divisé en deux compartiments de part et d'autre de la ville de Biskra : **i)** le compartiment de l'ouest (Zab occidental) qui inclut la région de Tolga, il est moins vaste que celui de l'est (70 x 25 km) ; il dispose de ressources en eaux abondantes, de nombreuses palmeraies et une population importante. **ii)** le compartiment de l'est qui englobe les oasis de Sidi Okba (Zab oriental) et tout le piémont dont le prolongement arrive jusqu'à la frontière tunisienne ; les palmeraies dans cette partie des Ziban sont moins importantes en comparaison avec celles de la partie ouest et ce malgré que ce territoire est vaste et dominé par les montagnes.

Au sein de ce découpage, d'autres subdivisions ont été distinguées dans ces deux grandes parties des Ziban, ces subdivisions se présentent comme suit :

2.1. Le Zab Gharbi est divisé en deux parties : le *Zab Dhahraoui* et le *Zab Guebli* ; le Zab Dhahraoui est composé d'un ensemble de sites oasiens relevant de deux grands secteurs :

- i)** le secteur d'El Hadjeb qui contient les localités de Ain Ben Noui, Bordj Nos et Ain Kerma ;
- ii)** le secteur qui regroupe les oasis de Tolga, Foughala, Bordj Ben Azouz, Bouchagroune, Lichana, Bouchagroune, Mlili, El-Ghrous, Doucen ; selon Largeau (1881), ce Zab englobe

également les oasis de Besbas, Ouled Djellal, El Chaiba, et Sidi Khaled. Quant au *Zab Guebli*, il est constitué des palmeraies d'Oumache, Lioua, Mekhadma (Benthious), Ourlal, et M'lili.

2.2. Tandis que dans *le Zab Chergui*, se concentrent les principales oasis telles que Sidi Okba (Thouda, Seriana, Garta), Ain Naga, El Haouche, Chetma (Droh, Sidi Khilil), El Feydh, Khenguet Sidi Nadji, Zeribet El Oued, M'ziraa (Sidi Masmoudi, Tajmout, Lebghila, Zamoura, El Moncef, Loulache, Jmina, Rommane), M'chouneche (Baniane, Dissa, Lehbali).

D'autres espaces oasiens dont l'importance n'est pas des moindres pour la région des Ziban ont été rapportés par Masmoudi (2013). Ces oasis sont celles qui se développent à El Outaya, Branis, Djemourah (Guedila, Beni Souik, etc.), El Kantara et Ain Zaatout.

3. Caractéristiques agraires des Ziban : Potentialités et contraintes du milieu

Il s'agit d'évoquer les opportunités de développement de l'agriculture dans la région des Ziban en mettant en avant les ressources en sol et en eau qui sont actuellement mobilisées ou celles qui sont susceptibles d'être mise en œuvre pour développer davantage ce secteur.

En dépit de l'adversité des conditions du milieu, les Ziban, à l'est comme à l'ouest, disposent encore d'atouts considérables à valoriser de façon judicieuse. Ces atouts englobent, d'un côté les terres cultivables et les ressources en eau, et de l'autre côté, le patrimoine phœnicicole composé de l'actuel système oasien et des vieux jardins de palmeraie qui sont en phase de mutation ou en voie de déperissement.

3.1. Terres potentiellement cultivables et autres atouts

La wilaya de Biskra se distingue par l'immensité de son territoire. Cet atout place la région des Ziban en tête des régions à haut potentiel agricole. Selon les statistiques de la Direction des services agricoles de cette wilaya (DSA), la surface agricole totale (SAT) est estimée à 1 652 751 ha, ce qui représente environ 77 %. La surface agricole utile (SAU) est de l'ordre de 185473 ha, ce qui équivaut 11 % de la SAT. Selon la DSA (2018), la surface des terres irriguées par les eaux souterraines est de l'ordre de 109500 ha ; elle représente plus de la moitié de la SAU. Il y a environ 9908 points d'eau (forage, puits et sources) ainsi que deux barrages qui sont inventoriés dans la région des Ziban ; l'eau provenant de ces ouvrages sert principalement pour l'irrigation (DSA, 2018).

Dans le domaine agricole, la région se caractérise par la prédominance de la culture du palmier dattier et la plasticulture qui a été introduite dans les années 1990 (Khadraoui, 2010). La phœniciculture est, donc, une culture stratégique dans les régions sahariennes. Elle

présente une source de revenus pour les oasiens, fixe la population locale et adoucie le microclimat des zones périphériques aux palmeraies (Côte, 2002).

Le potentiel agricole des Ziban repose essentiellement sur l'activité phoénicicole avec près de 5 millions de palmiers dattiers. Cette région fait partie du territoire du sud-est algérien qui, selon (Bougoudoura et al., 2015 ; Tamra, 2001) in Faci et al. (2020) englobe plus des $\frac{3}{4}$ du terroir phoénicicole national constitué de 952 cultivars.

La production agricole représente 7 % de la valeur de la production nationale. Les principales productions sont les dattes et le maraîchage avec respectivement 4 et 7,6 millions de quintaux produits annuellement (DSA, 2015).

3.2. Potentialités hydriques

De par sa situation géographique, entre le Tell et le Sahara, la région des Ziban présente un avantage sur le plan hydrique qui consiste en la collecte des eaux superficielles du nord et des eaux souterraines du Sahara septentrional. Concernant les réserves souterraines, elles représentent 96, 62% de tout le potentiel hydrique de la région (sedrati, 2011).

3.2.1. Les eaux de surface

Les eaux de surface sont omniprésentes dans la région de Biskra et sont alimentées essentiellement par les principaux oueds (tableau 4) dont oued Djeddi, oued Biskra, oued El Arab, oued El Abiod (Khadraoui, 2011). Par manque d'infrastructures destinées à la mobilisation de ces ressources (barrages, retenues collinaires, etc.), la majorité de ces oueds se jettent, lors des crues, dans le chott Melghir. Dans certains oueds, des prises d'eau par dérivation et ouvrages traditionnels s'effectuent par les fellahs pendant la fonte des neiges et les crues.

Par ailleurs, deux grands barrages sont édifiés à l'exutoire d'oued El Abiod et oued El Hai, il s'agit du barrage Foug El Gherza et Fontaine des Gazelles. Ces barrages en exploitation sont totalement mobilisés pour l'agriculture.

Tableau 4 : Longueurs et débits des principaux Oueds ; source Benhamida et Fedal (2008)

	Longueur (km)	Apport Interannuel (m³/an)
Oued Djedi	380	32,5
Oued El Arab	22,5	13,21
Oued El Abiod	80	11,2
Oued Biskra	57	6,05

L'oued Biskra est le principal oued cours d'eau de la région des Ziban. Selon Boumessnegh (2007), cet oued est constitué d'un nombre important d'affluents et de sous affluents, qui collectent les eaux de ruissellement provenant du sud-ouest de l'Aurès. L'oued Biskra se situe à la confluence de deux principaux oueds : oued El Hai et oued Djemourah, qui drainent, respectivement, une superficie de 1788 et 906 km².

3.2.2. Les eaux souterraines

La ressource en eau souterraine dans la région est contenue dans les deux grands systèmes aquifères qui sont : le complexe terminal (CT) et le continental intercalaire (CT) tous deux surmontés par la nappe phréatique qui est présenté dans l'ensemble des oasis (Bouziane et Labadi, 2009). Il est important de préciser que 90,34 % du volume d'eau souterraine mobilisé (686,5 Hm³/an) est destiné à l'irrigation.

En matière d'eaux souterraines, la région de Biskra compte quatre principales unités aquifères : **i)** la nappe phréatique du quaternaire, **ii)** la nappe des sables du mio-pliocène, **iii)** la nappe des calcaires de l'éocène inférieur et du sénonien et **iv)** la nappe du continental intercalaire (**tableau**).

i) Nappe phréatique

C'est à partir de cette nappe que la ville de Biskra est approvisionnée en eau potable. Elle est généralement localisée dans les accumulations alluvionnaires et doit son alimentation surtout aux eaux des précipitations, d'infiltration des oueds et aux eaux d'irrigation. Cette nappe est d'une profondeur qui varie entre 20 et 150 m et son débit est compris entre 5 et 20 l/s. Quant à sa qualité, elle est variable selon les endroits ; elle varie de bonne à mauvaise (SDRE, 2010)

ii) Nappe des sables

C'est une unité aquifère qui couvre une grande superficie de la région des Ziban. Elle est formée d'une alternance de niveaux d'argiles, sables, et cailloutis d'âge Mio-pliocène. Sa profondeur varie de 100 m à 300 m, avec un débit moyen de 15 l/s (SDRE, 2010). Son niveau piézométrique a subi un abaissement entre 2000 et 2008 à cause de la forte surexploitation, il est de 48 m à Biskra et de 34 m à El Outaya Sedrati (2011).

Dans la partie est des Ziban, cette nappe se subdivise en deux aquifères séparés par une couche épaisse d'argile et d'argile sableuse ; l'un de ces aquifères est profond et désigné sous le nom du Pontien et l'autre moyennement profond qui est la nappe du Mio-Pliocène, connue

dans cette région. Elle est capturée par de nombreux forages dans les plaines. Son épaisseur reste faible sur les piémonts et augmente au milieu de la plaine (Khadraoui, 2011).

Tableau 5 : Unités géologiques et hydrogéologiques dans la région de Biskra, d'après Sedrati (2011)

Unités stratigraphiques	Lithologie	Unités Hydrogéologiques
Quaternaire	Sables, Argiles	Nappe phréatique
Mio-pliocène	Alternance d'argiles et sables	Nappe des sables Complexe Terminal Semi perméable Nappe des calcaires Imperméable Nappe du turonien
Éocène moyen	Argiles gypseuses	
Éocène inférieur	Calcaires	
Sénonien supérieur Maestrichtien	Calcaires	
Sénonien inférieur	Argiles, gypse, sels	
Turonien	Calcaires dolomitique et dolomie	
Cénomanién	Argiles, marnes, marno-calcaire et gypse	Imperméable
Albien	Calcaire Marne, grès	Nappe du Continental Intercalaire
Aptien	Grès, dolomies	
Barrémien	Grès	

iii) La nappe des calcaires

C'est une nappe qui est essentiellement constituée de calcaire fissuré, d'âge Éocène inférieur et se situe à une profondeur allant de 100 m (Tolga et ses environs immédiats) à 500 m (Lioua et endroits environnants). Son débit est relativement intéressant, il se situe entre 10 et 30 l/s. Il est jaillissant dans les palmeraies d'Ourlal et Lioua (SDRE, 2010).

Dans les parties nord et nord-est des Ziban, cette nappe est représentée par un aquifère très important se situant dans le Maestrichtien et le Campanien à des profondeurs comprises entre 200 et 900 m. L'eau de cet aquifère est de bonne qualité chimique (SDRE, 2010).

iv) *Le Continental Intercalaire*

C'est une unité aquifère qui recèle des réserves considérablement importantes en eau. Elle est principalement constituée de grès et de marnes d'âge Albien et Barrémien. L'exploitation de cette nappe est souvent onéreuse en raison de sa profondeur qui dépasse 2000 m et de la température de l'eau qui peut dépasser les 60 °c. Selon Chabour (2006), dans la région de Biskra, cette nappe est représentée par des sources hydro thermales de Hammam Essalhine et Hammam Sidi El- Hadj, qui se trouvent respectivement dans la ville de Biskra et la localité de d'El Outaya.

3.3. Les contraintes

Les contraintes du milieu biophysique sont constituées de l'ensemble des facteurs dont l'interaction ou l'influence directe peuvent créer des conditions défavorables à la pratique de l'agriculture. En d'autres termes, il y a des facteurs tels que le climat et la disponibilité de l'eau d'irrigation dans certains endroits et le coût élevé de sa mobilisation, qui sont de nature à limiter la production agricole ou à la rendre parfois quasiment impossible.

D'autres facteurs sont liés au système hydropédologique spécifique et complexe des Ziban ; les sols étant fragiles et l'eau utilisée pour l'irrigation est souvent médiocre, imposent aux agriculteurs une utilisation rationnelle et prudente pour éviter la dégradation du milieu pédologique. La position des terrains agricoles, par rapport au paysage environnant, le couvert végétal et la biodiversité existante dans cet écosystème saharien, sont aussi des facteurs qui peuvent influencer l'activité agricole. La plupart de ces éléments sont des facteurs "limitants" ; ils peuvent compromettre à des degrés différents la mise en culture des sols et ainsi freiner la dynamique de développement agricole escomptée.

Le bouleversement des facteurs climatiques a une incidence fâcheuse sur les exploitations agricoles (ressources en eau et cultures pratiquées) de la région de Biskra ; en réponse à ces changements climatiques, les agriculteurs ont su mettre au point des techniques d'adaptation pour maintenir une production suffisante (Boucetta, 2018).

Les changements spectaculaires dans les zones arides sont provoqués par la conversion de ces zones à l'agriculture. Les espèces végétales autochtones sont remplacées par des graines de

cultures ; le sol devient vulnérable à l'érosion éolienne et hydrique ; des engrais et des pesticides sont ajoutés, ce qui modifie la composition du sol ; et la capacité de rétention des sols vis-à-vis de l'eau est altérée, ce qui engendre un changement du régime d'humidité pour les plantes et les animaux (White et Nackoney, 2003).

4. Géomorphologie

La région des Ziban est considérée comme région charnière entre le nord et le sud. D'après Chabbah (2007), elle constitue une zone de transition entre les domaines atlasiques montagneux et plissés qui caractérisent le nord (Algérie méditerranéenne) et les étendues plates et désertiques du Sahara septentrional au Sud (Algérie saharienne). Elle est formée d'un ensemble de bassins et (ou) sous bassins alignés presque parallèlement nord-sud.

Elle est formée par toute une série de glacis d'érosion modelés par le ruissellement et où se localisent des oasis (Chebbah, 2007). La région de Biskra, dans sa majeure partie, est constituée par la grande dépression septentrionale saharienne. Celle-ci est entourée au Nord, Nord-est et au Nord-ouest par les derniers versants de l'Atlas saharien, dont les monts du Zab dominant la région, d'orientation Sud-ouest et Nord-est. La morphologie de cette région est cependant marquée par trois unités morphologiques : la montagne, le piémont et la plaine. (Aidaoui, 1994). Au sud de Biskra, s'étend la plaine saharienne ; celle-ci est considérée comme un piémont sans relief marqué qui relie, par une pente douce, les chaînons atlasiques aux étendues sahariennes proprement dites.

5. Aspects généraux du climat des Ziban

Les limites du Sahara se situent en-deçà des isohyètes 100 à 150 mm de pluies. Dans les régions arides, le rapport entre la pluviométrie annuelle (P) et l'évapotranspiration (ETP) se situe entre 0,05 et 0,20 selon PNUE (1997) in (Rechachi, 2017). Les climats sahariens sont caractérisés notamment par la faiblesse des précipitations, une intense luminosité, une forte évaporation et de grands écarts de températures (Dubost, 2002).

Les zones arides sont généralement soumises à des régimes climatiques qui ne sont pas très favorables à la production de cultures. Les faibles précipitations totales et la grande variabilité des régimes pluviométriques posent des difficultés à la mise en culture des terres. Néanmoins, les populations locales dépendent de ces terres pour produire de la nourriture (White et Nackoney, 2003).

Le piémont du Ziban est soumis à un bioclimat aride avec 150 mm environ ; il ne reçoit pour les eaux de ruissellement que celles qui viennent du massif de l'Aurès ou du piémont de Nememcha, qui eux-mêmes se caractérisent par un climat semi-aride ; les écoulements sont donc intermittents et arrivent sous forme de crues (Côte, 2002).

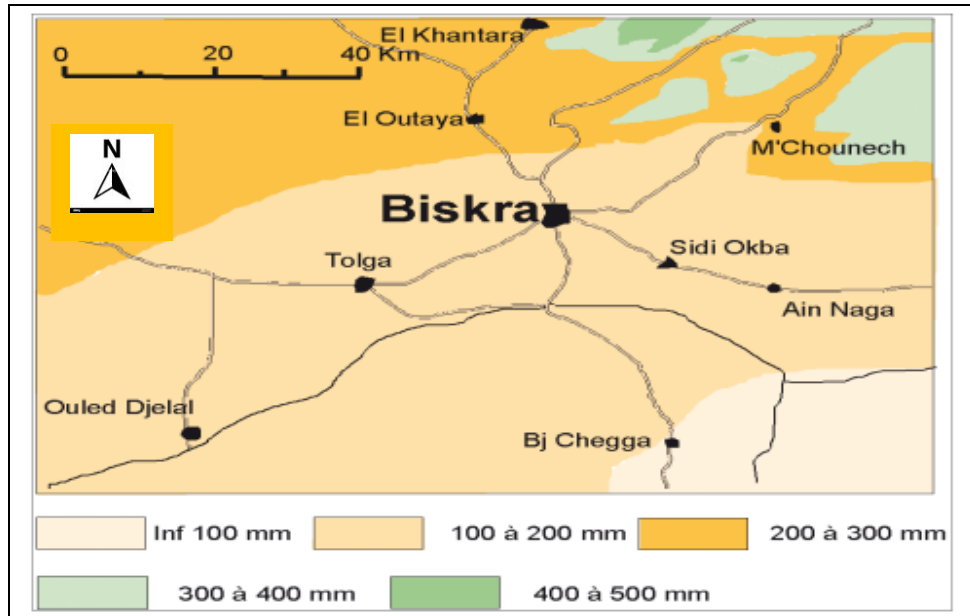


Figure 1 : Répartition des précipitations dans la région de Biskra (Extrait de la carte pluviométrie de l'Algérie au 1/500.000, 1971) in Rechachi (2017).

Le climat des Ziban est semi-aride à aride. En raison des phénomènes de désertification, l'été est long, chaud et sec, alors que l'hiver est court, froid et également sec (Faci, 2021).

5.1. Étude du climat de la région des Ziban

Dans cette étude, les données climatiques brutes et celles de l'analyse du climat, proviennent de deux séries : une série qui s'étale sur la période entre 1967 et 2012, soit 46 ans ; une autre série de données climatiques porte sur la période entre 2000 et 2018. Ces deux séries sont puisées, respectivement, dans Rechachi (2017) et Faci (2021).

5.1.1. Evolution des précipitations

L'analyse de la variation mensuelle des précipitations montre que septembre est le mois le plus arrosé avec une moyenne mensuelle de 22,77 mm et le mois le moins arrosé est celui de juillet une moyenne mensuelle de 1,76 mm.

La pluviométrie dans la région de Biskra est caractérisée par des irrégularités aussi bien interannuelles qu'intra-annuelles. La pluviométrie annuelle enregistrée sur une période de 18 ans (2000-2018) donne une pluviométrie moyenne de l'ordre de 118,75 mm. Par ailleurs, un

pic d'environ 297 mm a été noté en 2014 (fig. 2) alors que les valeurs les plus faibles sont respectivement de 42 mm en 2017 et 42,33 mm en 2018 (Boudibi, 2021).

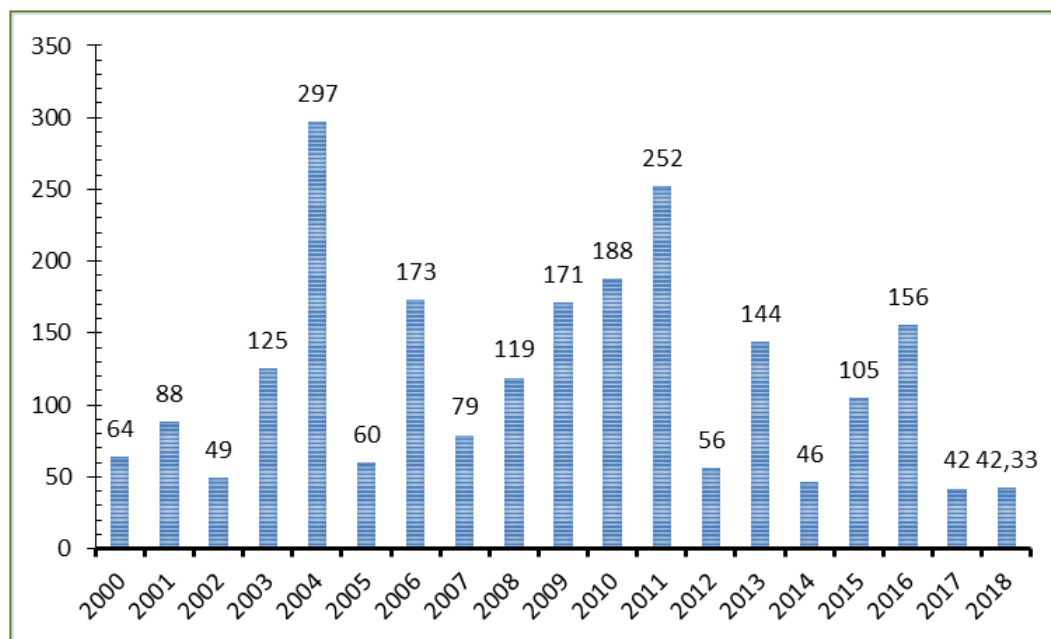


Figure 2: variation interannuelle des précipitations dans la région de Biskra entre 2000 et 2018. Source: Boudibi (2021).

5.1.2. Variations mensuelles et saisonnières des précipitations

La variation mensuelle de la précipitation pour la période de 1967 à 2012 est représentée dans le tableau suivant :

Tableau 6 : Précipitations moyennes Mensuelles en mm, (Station Biskra)

Station	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Total
Biskra	22,77	16,33	18,61	10,81	18,48	12,85	15,54	13,82	14,33	6,73	1,76	5	157,07

L'analyse de la variation mensuelle des précipitations montre que le mois de plus pluvieux est septembre avec une moyenne mensuelle de 22,77 mm, tandis que la moyenne annuelle du mois le moins arrosé est 1,7 mm et coïncide avec le mois de juillet.

La variation saisonnière des précipitations dans la région de Biskra (Tableau 6) durant la période des 46 ans renseigne sur la concentration des pluies dans les saisons d'automne (57,71 mm), d'hiver (42,14 mm) et du printemps (43,69 mm). Par contre, durant l'été, il n'est tombé que 13,49 mm de pluie. La région de Biskra reçoit un cumul moyen des saisons d'automne,

hiver et printemps qui représente 90 % de la quantité moyenne annuelle des précipitations (tableau 7).

Tableau 7 : Répartition saisonnière des précipitations à Biskra ; source Rechachi (2017)
(Tableau adapté et modifié)

Saison/total saison	Précipitation moyenne mensuelle (mm)		
Automne	Sep	Oct	Nov
	22,77	16,33	18,61
	57,71		
Hiver	Déc	Jan	Fév
	10,81	18,48	12,85
	42,14		
Printemps	Mar	Avr	Mai
	15,54	13,82	14,33
	43,69		
Eté	Juin	Juil	Aout
	6,73	1,76	5
	13,49		
Total des saisons (mm)	157,07		

Selon Boucetta (2018), la comparaison de la précipitation mensuelle entre la période de Seltzer (1913-1938) et la période de 1990-2015, pour la région de Biskra, a montré une diminution de la précipitation pour la majorité des mois : la moyenne de l'ensemble des mois a diminué de 13%.

5.1.3. Variation des températures

La région de Biskra se caractérise par un régime de température qui se traduit par des chaleurs extrêmes enregistrées, particulièrement, en été. En hiver, les températures sont relativement basses. L'amplitude thermique moyenne atteint, selon Rechachi (2017), 22°C.

La variation moyenne mensuelle de la température, dans la région de Biskra, au cours de la période 1967-2012 (**tableau annexe 1**), fait ressortir un maximum en septembre (33,34°C) et un minimum enregistré en janvier (10,93°C). L'hiver est généralement froid surtout durant les mois de décembre, janvier et février. En été, les températures sont élevées engendrant des

chaleurs exceptionnellement remarquables notamment durant les mois de juillet, août et septembre.

5.1.4. Evapotranspiration

Boudibi (2021) a procédé à l'estimation de l'évapotranspiration (ETP) par la méthode de Thornthwaite pour la région de Biskra et ce, pour la période de 18 ans (2000-2018). Le résultat de calcul de ce paramètre à partir des données climatiques, a mis en évidence une valeur considérablement élevée (1200,41 mm). Il n'y a que le mois de janvier qui a donné lieu à des précipitations supérieures à ETP calculée.

Ce chiffre traduit une grande perte en eau qui est occasionnée aux composantes biophysiques du milieu (végétation et sol) par des températures élevées.

5.2. Le régime climatique

Pour définir le régime climatique de la région des Ziban, on s'est basé, d'une part, sur les indications que l'on peut avoir après établissement du diagramme pluviothermique de Gaussen et Bagnouls, et d'autre part, sur le calcul de l'indice d'aridité de De Martonne.

5.2.1. Diagramme pluviothermique de Gaussen et Bagnouls

Ce diagramme a été utilisé pour déterminer la longueur de la période sèche au niveau de la région de Biskra ; cette période traduit la durée au cours de laquelle le déficit hydrique pourrait impacter le milieu naturel de la région d'étude.

On remarque que la courbe des précipitations passe au-dessous de la courbe des températures ; cet écartement entre ces deux courbes correspond à la période nettement déficitaire en eau (fig. annexe 1).

Tableau 8 : Températures et précipitations moyennes mensuelles de la région de Biskra (période 1967-2012) ; source : Rechachi (2017)

Mois	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec
T(°C)	10.93	12.68	16	19.53	24.70	30.04	33.23	32.69	33.34	22.01	15.65	11.77
P (mm)	18.48	12.82	15.54	13.82	14.33	6.73	1.76	5	22.77	16.33	18.61	10.81

En effet, le diagramme ombrothermique de Gaussen et Bagnouls qui a été obtenu par Boudibi (2021) dans la région de Biskra, a révélé la même tendance d'évolution des deux paramètres climatiques (P et T) (tableau 8). Cela est un indice pour conclure que le phénomène de

sécheresse prend une allure quasi-chronique durant les deux périodes (fig. 3).

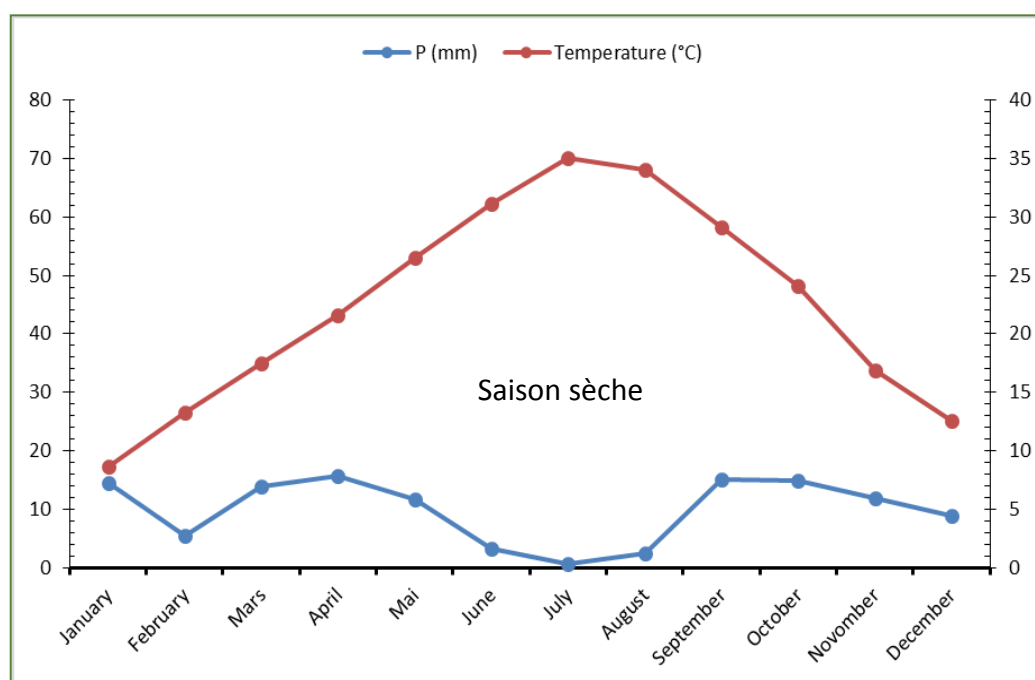


Figure 3: Diagramme ombrothermique de la région de Biskra; période 2000-2018; source: Boudibi (2021)

5.2.2. Estimation de l'indice d'aridité (Ia) de De Martonne 1923

Il s'agit d'un indice qui permet de déterminer le type de climat à partir de la moyenne annuelle des précipitations (P) en mm et de la température moyenne annuelle (T) exprimée en °C. la formule s'écrit comme suit :

$$Ia = \frac{P}{T + 10}$$

Avec **P** : les précipitations moyennes annuelles ; **T** : les températures moyennes annuelles.

De cette relation, plusieurs types de climats ont été distingués par De Martonne (tableau 9) ; il est noté que plus la valeur de l'indice d'aridité (Ia) est grande, le climat devient de moins en moins sec.

Tableau 9 : Les différents types de climats selon en fonction de l'indice de De Martonne

Indice d'aridité	Ia<5	5< Ia<7.5	7.5<Ia<10	10<Ia<20	20<Ia<30
Type de climat	Hyperaride	Désertique	Steppique	Semi-aride	Tempéré

S'agissant de la station de Biskra, **P**= 157,07 mm et **T**=21,88°C ; **Ia** qui peut résulter de la relation de De Martonne est égal à **4,92**, ce qui donne lieu à un climat hyperaride.

6. Conclusion

Le climat de la région des Ziban est de type aride ; il est parfois pluvieux en hiver et reste continuellement chaud et sec durant l'été. Les précipitations annuelles sont de l'ordre de 157,07 mm et sont souvent d'origine orographique ; tandis que la température moyenne annuelle est de l'ordre de 21, 88 °C.

La période sèche est longue ; elle peut parfois durer toute l'année. L'évapotranspiration est très élevée et avoisine 1038, 89 mm ; ce qui oblige les agriculteurs de la région à pratiquer l'irrigation pour assurer la viabilité de leurs exploitations.

De point de vue de l'activité agricole qui caractérise cette région, notamment à partir des années 1990, elle a connu une dynamique très louable. Cette dynamique a, en effet, favorisé l'émergence de nouvelles formes du système agricole et du paysage agricole oasien. Dans cette configuration, on peut identifier trois types d'agroécosystèmes oasiens : **i)** un agroécosystème formé d'anciennes oasis dont la plupart fait face au manque d'eau et aux problèmes de salinisation et de vieillissement des jardins ; **ii)** un agroécosystème qui contient des oasis de création plus ou moins récente en comparaison avec le premier type. Ce système est basé sur la culture de palmier dattier en association avec les arbres fruitiers (olivier, figuier, grenadier, vigne, citronnier) et les cultures herbacées (céréales, fourrage, légumineuse). Ce type se caractérise par la mise en œuvre de moyens et techniques de conduite modernes (mécanisation, irrigation, fertilisation, etc.) ; **iii)** le troisième type qui concilie plus ou moins difficilement les deux précédents systèmes de culture dans une perspective qui vise, d'une part à restaurer les vieux jardins, et d'autre part à augmenter la surface cultivée, notamment celles dédiée à l'activité phoenicicole.

Partie II : Méthodologie de travail

Chapitre 1 : Matériel et méthodes

1. Description de la méthodologie de travail

1.1. Contexte de la zone d'étude

La zone d'étude est située dans le Ziban occidental (Biskra) entre Ain Ben Noui et Tolga. Cette partie de Ziban est bien connue pour être la plus importante oasis des Ziban (Biskra) (Fig. 4), en termes de production et exportation de dattes de la variété de haute qualité "Deglet-Nour". La région de Biskra est située au nord-est de l'Algérie, à la limite du désert du Sahara) et a un climat aride (pluviométrie moyenne annuelle- chute inférieure à 200 mm) (Pouget 1980 ; Afrasinei et al. 2017). Les sols de ces oasis auraient résulté de l'action combinée du transport de colluvions et du transport éolien.

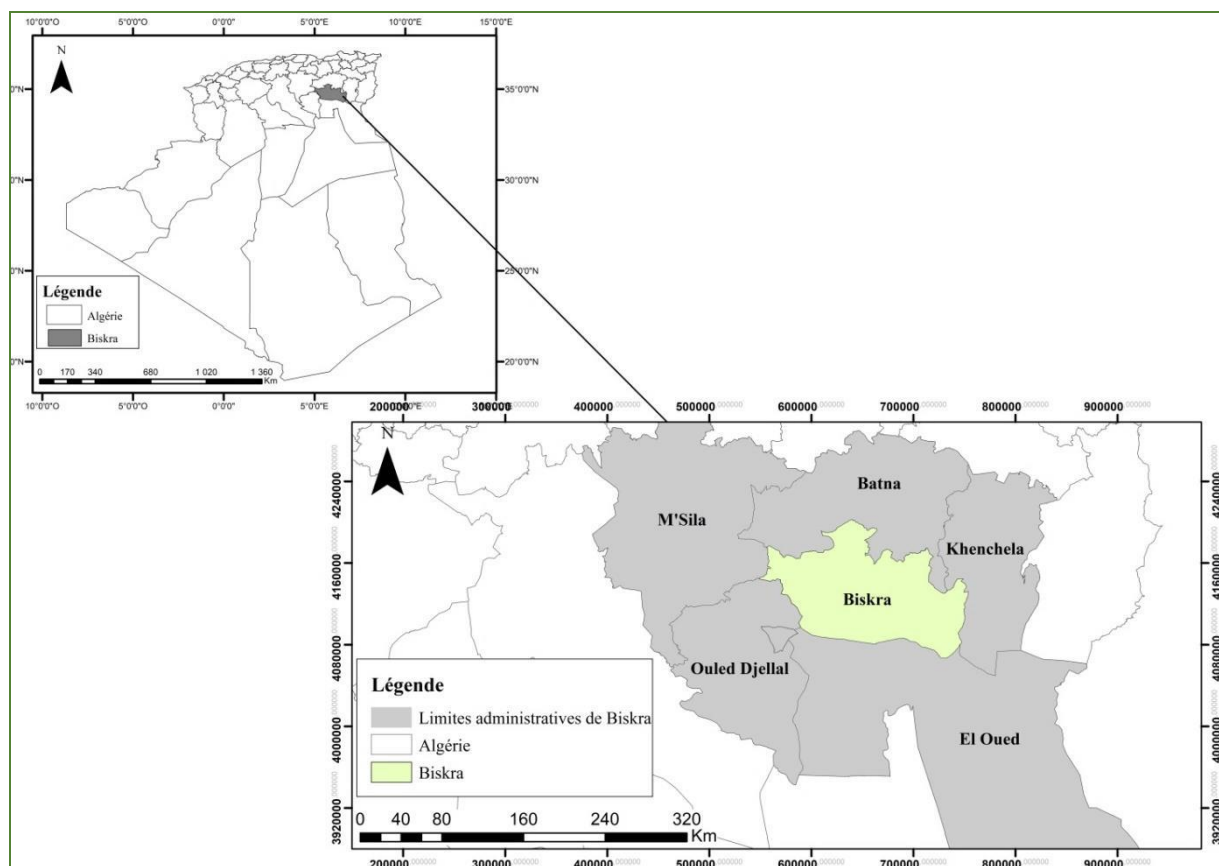


Figure 4 : Localisation de la région d'étude (Les Ziban, Biskra)

1.2. Définition de l'étendue géographique de l'étude et aspects développés dans la thèse

Tous les résultats qui seront présentés dans la partie résultats et discussion portent sur les différentes données pédologiques qui ont été acquises au niveau de la partie occidentale de la région des Ziban désignée également dans cette thèse par le Zab occidental. En effet, l'étendue géographique de l'étude désigne ici précisément les différents sites oasiens qui ont été étudiés par l'auteur, en 1991, en 2016, puis en 2021, et qui appartiennent à cet ensemble.

Les sites qui ont été étudiés *la première fois* (1991) font partie de la même entité naturelle ; ils sont représentés par les sols formés sur des accumulations gypso-calcaires de la région de Ain Ben Noui et ses environs, à savoir El Hadjeb et Oumache. Ces sols avaient été décrits, caractérisés de point de vue analytique (physico-chimique et minéralogique), puis classés selon les classifications FAO-UNESCO (1974 ; 1988) et Soil Taxonomy (1975).

La deuxième étude englobe les travaux qui s'étaient déroulées après 1991 ; soit en 2016 et 2021 ; ces travaux ont respectivement porté sur l'évaluation de l'état de dégradation des agroécosystèmes oasiens dans la région de Tolga et les secteurs qui lui sont environnants, tels que les oasis de Bordj Ben Azouz et Lioua (Fig. 5). Cet aspect a été traité en se servant de la technique de télédétection et l'approche classique (caractérisation analytique des sols et des eaux d'irrigation et de drainage).

La troisième étude est intervenue en 2021 et seconde et a eu lieu dans différents secteurs du Zab occidental et a porté sur 10 sites oasiens répartis sur deux toposéquences (Fig. 5). Les volets qui ont été abordés dans ce travail étaient principalement la caractérisation physico-chimique de la ressource pédologique, le monitoring de la dynamique des agroécosystèmes oasiens et la typologie des sols selon les systèmes de classification de la WRB (2015) et de la Soil Taxonomy (2014). Les sites étudiés se situent dans les palmeraies de Ain Ben Noui et El Hadjeb, Tolga, Ourlal, M'lili et Oumache.

Outre les aspects qui sont développés au fil de ces trois études, un ultime point a été soulevé à la fin de cette thèse, il consistait à essayer de mettre en lumière des faits pédogénétiques susceptibles d'aider à expliciter les changements qu'auraient subis ces sols durant les 30 dernières années, que ce soient au niveau de leurs propriétés ou au niveau des processus de pédogenèse. Les changements d'ordre typologique peuvent être cherchés en comparant uniquement les unités de sols de 1991 et 2021 ayant presque la même position géographique ou dont les pédons se situent approximativement au sein de l'unité qui a été décrite, il y a 30 ans (Fig.5).

La technique de télédétection spatiale a également été utilisée dans le monitoring des différents changements qui s'y étaient produits au cours des trente dernières années au niveau des sols de la région d'étude. La méthode est décrite dans le sous-titre **2.1.1.4** de ce chapitre.

2. Aperçus méthodologiques succincts

Compte tenu de la dépendance de l'objectif de cette étude des résultats de l'étude de 1991, il est indispensable de faire, au préalable, un aperçu rétrospectif sur le cadre dans lequel a été effectué ce travail, son approche méthodologique ainsi que les points saillants qui y avaient été dégagés. Ce rappel est également nécessaire, notamment, pour envisager l'opportunité d'exploiter les résultats de la typologie des sols dans le cadre de la présente étude.

2.1. Objectif de l'étude antérieure (1991) et modalités de sa mise en œuvre

Les sols à accumulation gypso-calcaire de la région de Ain Ben Noui et ses environs (El Hadjeb, Oumache) font partie de la partie occidentale des Ziban. Ils ont fait l'objet d'une caractérisation physico-chimique et de leur distribution spatiale par Abdesselam (1991) et Belghemmaz (1991). Après avoir déterminé les différents types de sols qui se trouvent dans cette zone, des aspects complémentaires relevant de la minéralogie de la micromorphologie de ces accumulations « gypso-calcaires » ont été abordés respectivement, par Belghemmaz (1991) et Abdesselam (1991).

Aussi, faut-il préciser que cette étude a coïncidé avec le lancement des premières opérations de concession des terres agricoles dans la région de Biskra.

a- Étape de terrain : moyens et méthodes mis en œuvre

Le travail s'est déroulé en 2 grandes phases ; une première phase qui a été entamée en juin 1991 et a duré plusieurs jours ; elle a été consacrée à la prospection et reconnaissance de terrain en vue de la validation des limites de l'ébauche de carte qui a été préparée à partir de l'étude. La deuxième phase a porté sur la description des profils pédologiques et à l'échantillonnage du sol. Les principaux moyens de l'étape de terrain et la méthode qui en a été utilisée, sont décrits en ce qui suit :

- i)** des photos aériennes n°41 à 43 et 56 à 58 ; à l'échelle 1/20.000 de la mission 1972 ;
- ii)** des cartes topographiques de Biskra aux échelles 1/50. 000 (n° 320 et édition 1922) et 1/200.000 (édition 1960) ;
- iii)** Les notices explicatives de la carte géologique (1964) à l'échelle (1/200.000) et de la carte hydrogéologique de Biskra ;
- iv)** Les critères qui y avaient été pris en compte étaient ceux liés aux conditions locales,

c.-à-d. aux facteurs de station tels que la géomorphologie, la topographie, l'occupation du sol, les aspects de salinisation, la végétation naturelle, sable éolien, la présence ou l'absence de la nappe phréatique près de la surface, le drainage naturel, la présence ou l'absence de la croûte de gypse et la couleur. Ce qui a permis de délimiter 16 unités physiographiques et d'élaborer l'esquisse de ces unités cartographiques (UCS) sur la carte.

Au terme de cette opération, 16 profils pédologiques (dont 12 seulement ont été présentées dans le tableau 10) ; la majorité de ces profils étaient des fosses qui ont été destinées pour la plantation de palmiers dattiers, ont été observés et leurs caractères morphologiques (organisation structurale du sol, la couleur, etc.) ont été minutieusement décrits et échantillonnés conformément à la méthodologie préconisée par Maignien (1969).

Tableau 10 : Positionnement des profils de sols et caractéristiques des sites oasiens (Juin 1991).

Sites/Profils	Coordonnées GPS
UP1	34°45'59,71'' N ; 5°33'51,29'' E ; Alt. 148 m
UP2	34°45'50 '' N ; 5°33'29,15'' E ; Alt. 91 m
UP3	34°47'14,29'' N ; 5°37'39,86'' E ; Alt. 114 m
UP4	34°48'41.90 '' N ; 5°40'11,52'' E ; Alt. 96 m
UP5	34°46'35,00 '' N ; 5°39'44.84'' E ; Alt. 74 m
UP6	34°46'55,83 '' N ; 5°41'22,08'' E ; Alt. 74 m
UP7	34°46'52,56'' N ; 5°42'54,03'' E ; Alt. 72 m
UP8	34°45'30,46'' N ; 5°41'51,40'' E ; Alt. 59 m
UP9	34°45'34.79'' N ; 5°39'38,16'' E ; Alt. 64 m
UP10	34°44'28,95'' N ; 5°35'57,12'' E ; Alt. 76 m
UP11	34°44'06,04'' N ; 5°38'03,60'' E ; Alt. 60m
UP12	34°45'09,55'' N ; 5°38'10,24'' E ; Alt. 64 m

b- Etape de caractérisation pédologique

La 2^{nde} phase c'est celle correspondant aux analyses des échantillons de sols pour la détermination des paramètres physico-chimiques (CE, pH, calcaire, gypse, carbone organique texture et bilan ionique).

Le pH a été déterminé sur un extrait aqueux au rapport 1/2,5 ; tandis que la CE (dS.m⁻¹) a été mesurée sur l'extrait de pâte saturée.

Une autre analyse a été effectuée par la diffraction au R-X pour mettre en évidence la présence de certaines espèces d'argiles et les sels prédominants.

c- Détermination des unités de sols homogènes

A l'issue de ces 2 étapes de cette étude, 6 profils-types représentés par les pédons 2 ; 4 ; 5 ; 7 ; 9 et 11, ont été ressortis en fusionnant plusieurs unités physiographiques, excepté le pédon 4 dont les caractéristiques étaient "uniques" ; sinon ceux ayant montré des caractéristiques morphologiques et analytiques similaires, ont été fusionnés pour dégager les unités pédologiques homogènes. Ce sont ces pédons représentatifs des unités pédologiques qui ont été retenus pour classer les sols selon les systèmes de classification de la FAO-UNESCO (1974), FAO-UNESCO révisée de 1988 et celle de la Soil Taxonomy de l'USDA (1975). A la fin de cette étape, on a pu identifier les principales unités typologiques de sols (UTS) qui prédominent dans la région d'étude.

2.1.1. Objectif des études postérieures à 1991 et contextes de mise en œuvre

Deux études pédologiques phares ont été consacrées à la typologie de ces sols :

❖ **La première a été présentée par Bensaid (1999)**, sous forme de note synthétique, sur les principaux types de sols rencontrés dans cette partie ouest des Ziban. Elle a été réalisée à la lumière des résultats obtenus en 1991.

❖ **La deuxième qui a été entamée en 2016 sur la dégradation des sols des agroécosystèmes ; les résultats de ce travail ont été publiés en 2018.**

Cette étude a succédé à la première (1991) après deux décennies et a eu lieu dans la même partie des Ziban ; elle consistait à évaluer l'état de dégradation de 3 oasis appartenant aux agroécosystèmes de Tolga (Belghemmaz et al., 2018).

❖ **La troisième est celle qui a lieu en 2021 (Belghemmaz et al., 2024a, Belghemmaz et al., 2024b).**

Cette étude a été consacrée à la caractérisation des sols des agroécosystèmes des oasis, leur fonctionnement, leur typologie ainsi que le monitoring de la dynamique agro-environnementale de ces sites en combinant les approches classique (caractérisation morpho-analytique des sols) et moderne (outils de la télédétection spatiale).

2.1.1.1. Méthode d'étude de la dynamique des agroécosystèmes oasiens

a) Description des sites oasiens et échantillonnage des sols

Le travail de terrain a été fondé sur la prospection et la reconnaissance des différents sites oasiens en vue de connaître les principaux aspects qui les caractérisent (tableau 11). Au cours de cette étape, des critères géomorphologiques et pédologiques ont été pris en compte. Ces

critères comprennent la localisation de l'oasis, la forme du paysage, les caractéristiques morphologiques (couleur et structure du sol), la présence ou l'absence d'efflorescences salines, la formation de croûtes gypso-salines, de croûtes calcaires, ou gypso-calcaires, et les effets de l'érosion éolienne, etc. La présence d'une nappe phréatique proche de la surface et le phénomène d'engorgement ont été des critères supplémentaires mais, parfois décisifs, car leur intégration sert pour différencier les sites spécifiques.

Tableau 11 : Positionnement des profils de sols et caractéristiques des sites oasiens (Juin 2021).

Sites/Profils	Coordonnées GPS	Observation
Site Ourlal1 P1	34°39'03,76'' N ; 5°29'37,85''E Altitude : 130 m.	Fosses récente ; nouvelles plantations de palmiers dattiers ; relief plat
Site Ourlal 2 P2	34°39'35,36'' N ; 5°32'59,37''E Altitude : 114 m.	Nouvelles plantations ; horizon Pertogypsic assez compact ; structure dégradée (structure en pseudo-sable) ; Salsola et Atriplex ; Topographie plane
Site M'lili 1 P3	34°41'05,44'' N ; 5°37'31,11''E Altitude : 92 m.	Niveau de la nappe se situant à environ 8-10 m Croûte en « Deb Deb » (accumulation gypso-calcaire) ; présence de Tuff. Oasis composée de jeunes Palmiers et olivier
Site M'lili 2 P4	34°40'45,06'' N ; 5°37'28,12''E Altitude : 72 m.	Verger bien portant (association d'oliviers et palmiers) ; absence de croûte.
Oumache P5	34°42'25,98'' N ; 5°41'00,86''E Altitude : 81 m.	Nappe très proche de la surface. Efflorescences salines en abondance ; sol humide en surface, développement d'espèces halophytes et arbres de Casuarina
Sud Tolga (M'khadma) P6	34°39'32,01'' N ; 5°28'52,99''E Altitude : 1320m	Oasis (palmier et figuier) ; sols d'accumulation éolienne
Sud de Tolga P7	34°40'39,67'' N ; 5°26'48,04''E Altitude : 141 m.	Verger : jeune plantation de palmiers. Encroûtement gypso-calcaire (Deb deb) ; aspect blanchâtre du sol ; friable en surface et très compact en subsurface et en profondeur
P8 Sud d'El Hadjeb (Ain El Karma)	34°45'29,12'' N ; 5°31'20,51''E Altitude : 185 m.	Situé à 5-6 Km à l'ouest d'El Hadjeb ; Au sein d'une palmeraie bien développée. Efflorescences de sels couvrant la surface de sol.
Oasis à El Hadjeb P9	34°47'38'' N ; 5°36'33''E Altitude : 175 m.	Sols d'apport éolien ; oasis composée de palmiers dattiers, de vigne et figuier. ; vieille palmeraie bien développée
Ain Ben Noui (Nord ITDAS) P10	34°47'51'' N ; 5°37'09,89''E Altitude : 141 m	Amas de sable avec des efflorescences assez salines abondantes.

Ce premier niveau d'observation a permis d'identifier les caractéristiques dominantes des sols et de définir 10 unités physiographiques homogènes.

Les sites oasiens observés sont répartis sur 2 toposéquences (Fig. 5) ; leurs profils pédologiques correspondent à des fosses (non plantées de palmiers) de plus d'1 m de profondeur.

Lors de l'échantillonnage, les horizons épais du sol sont parfois subdivisés même si les différences morphologiques ne sont pas évidentes sur le terrain. Ces subdivisions sont identifiées par des numéros qui suivent les désignations respectives des horizons (Soil Survey Manual de l'USDA, 2017).

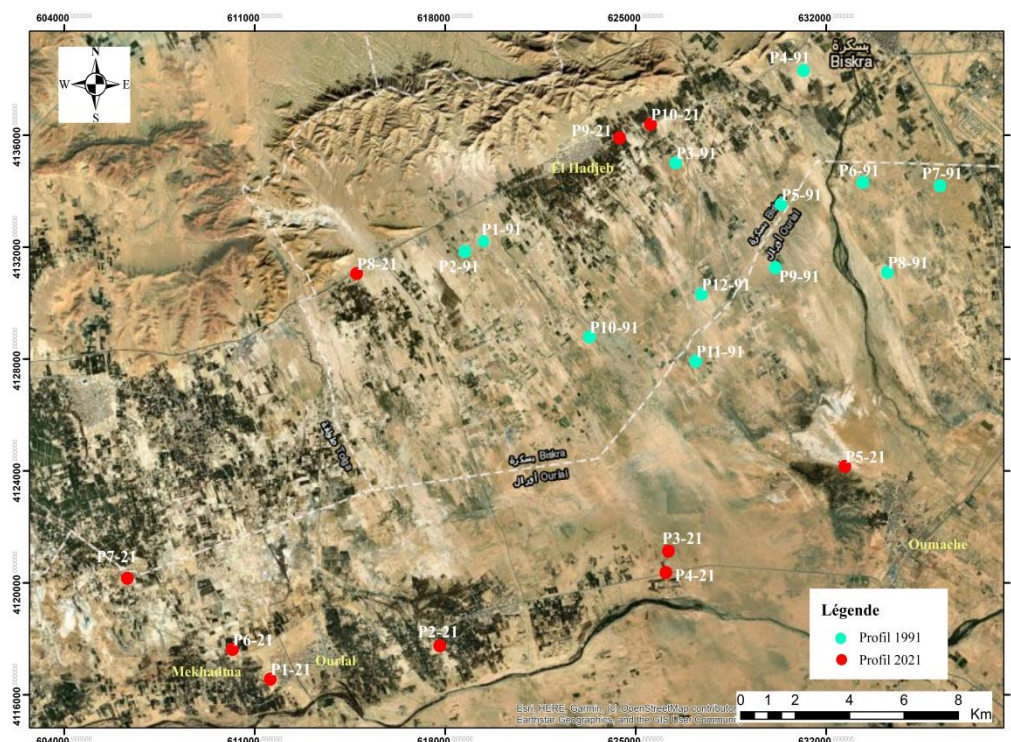


Figure 5: Distribution spatiale et positions des profils d'échantillonnage de sols des années 1991(en vert) et 2021 (en rouge) dans le Zab occidental des Ziban (Biskra)

Les sections des profils ont été rafraîchies pour faciliter l'observation et la description des horizons ainsi que l'échantillonnage du sol. Un nombre de 27 échantillons de sol a été prélevé dans les horizons détectés à différentes profondeurs (0-30, 30-60 et 60-120 cm). En outre, il faut préciser qu'un deuxième niveau d'observation a été nécessaire et il a été mené précisément à l'échelle du profil de sol et ce en vue de distinguer les horizons. Ainsi, l'identification des épipédons et les horizons diagnostiques de sub-surface, a été complétée après avoir combiné les données descriptives recueillies, in situ, sur chaque pédon avec les résultats de la caractérisation physico-chimique obtenus au laboratoire.

b) Méthodes d'analyse du sol

Les méthodes utilisées dans le cadre de cette thèse sont de deux types : **i)** les méthodes qui peuvent s'appliquer presque à tous les types de sols ; **ii)** les méthodes spécifiques qui sont adaptées aux sols contenant le gypse.

Les analyses de sol ont été réalisées en adoptant les méthodes de Mathieu et Pieltain (2003) et de Bashour and Sayegh (2007). Les échantillons de sol ont été séchés à l'air, broyés et passés au tamis de 2 mm. La séparation des particules granulométriques du sol a été déterminée par la méthode de la pipette Robinson.

❖ **Analyse granulométrique** : Compte tenu de la spécificité pédologique de ces milieux oasiens la présence de gypse constitue une contrainte analytique sérieuse pour la séparation des particules minérales du sol. La méthode de Vieillefon (1979) est appliquée pour empêcher la floculation de la suspension ; les échantillons doivent être traités avec une solution de chlorure de baryum pour créer des revêtements de sulfate de baryum autour des particules de gypse.

❖ **Appréciation de la texture du sol sur terrain** : Certains sols ne sont pas complètement dispersés lorsque l'analyse granulométrique standard leur est appliquée. D'après Soil Survey Manual (2017), cela concerne, par exemple, les sols présentant des propriétés andiques (quantités élevées de minéraux amorphes et mal cristallisés) et des sols à forte teneur en gypse (plus de 25 % environ). Pour les sols de ce type, pour lesquels la classe de texture estimée sur le terrain et la distribution granulométrique mesurée en laboratoire diffèrent sensiblement, la texture sur le terrain est qualifiée d'apparente. Cette texture apparente sur le terrain n'est qu'une appréciation tactile et ne permet d'avoir qu'une indication sur la présence de certaines fractions granulométriques dans le sol ; elle ne peut donc se substituer totalement au résultat de l'analyse en laboratoire.

c) Caractérisation chimique des sols

Le pH de la solution de sol a été mesuré sur un extrait dilué 1:2,5 ; la conductivité électrique (CE) a été mesurée dans l'extrait dilué 1:5.

Les méthodes d'analyse de la salinité du sol sont basées sur la CE d'un extrait aqueux du sol. La conductivité électrique de ces extraits (c'est-à-dire CE1:5) est une mesure de la quantité totale de sels solubles par unité de poids de sol. De telles mesures ont une application directe pour déterminer le bilan ionique.

Par conséquent, la composition ionique de la solution de sol, en plus des propriétés des sols, doit être prise en compte pour une interprétation correcte du stress dû à la salinité et des

interactions sol-plante (Bresler et al., 1982 ; Rengasamy, P, 2010 ; Van Straten, G, 2019; Amin et al., 2021).

❖ **Mesure de la salinité du sol :** La pâte saturée est la méthode d'extraction des sels solubles la plus utilisée ; elle est reconnue comme norme conventionnelle pour la détermination du bilan ionique et l'expression du degré de salinité des sols. Cependant, la confection des extraits de pâte saturée peut prendre beaucoup de temps, en même temps que des difficultés liées à la détermination du point de saturation du sol ont été rencontrées (US Salinity Laboratory Staff, 1954 ; Longenecker et Lyster, 1964) cités par He et al. (2013).

Parmi les rapports de dilution mentionnés ci-dessus, le rapport 1:5 est la méthode préférée pour déterminer les propriétés du sol en Australie et en Chine (Rayment et Lyons, 2011).

Même si l'extraction sol/eau 1:5 est relativement facile et reproductible, le processus d'équilibre sol/solution varie selon le type d'agitation (mécanique ou manuelle) selon que la suspension ait subi la filtration ultérieure ou pas (Chi et Wang, 2010 ; Rayment et Higginson, 1992 ; US Salinity Laboratory Staff, 1954), ce qui peut entraîner des changements par exemple, dans les valeurs du SAR (Sodium Absorption Ratio) déterminé à partir de l'extrait dilué 1:5.

❖ **La détermination des paramètres CaCO_3 , gypse, carbone organique et bilan ionique**

Le carbonate de calcium total a été obtenu en utilisant la méthode standard du calcimètre Bernard et le gypse a été dosé par la méthode gravimétrique. Le carbone organique (C.O.) a été déterminé par la méthode d'Anne. Les cations Ca^{2+} , Na^+ et K^+ sont déterminés dans l'extrait dilué 1:5 par spectrophotomètre à flamme tandis que les bicarbonates et les chlorures sont dosés dans le même extrait par la méthode standard de titrage. Mg est mesuré par la spectrophotométrie d'absorption et les sulfates par le spectrophotomètre UV visible.

2.1.1.2. Systèmes de classification internationaux des sols

La classification des sols concerne le classement des sols en fonction de leur aptitude à produire des plantes et des cultures d'importance économique et de leur utilisation pour l'habitat, les loisirs et l'industrie (Velayutham et al., 2017). Les systèmes de classification de la Soil Taxonomy et de la WRB ont été approuvés par l'Union Internationale des Sciences du Sol (IUSS) comme systèmes adéquats pour classer les sols à l'échelle internationale.

Les deux systèmes de classification ont été utilisés dans le cadre de cette thèse pour avoir une large vision sur la diversité des sols de la région des Ziban ; une comparaison entre les deux systèmes est également effectuée et ce, dans la perspective de mettre en évidence l'adéquation

de chacune des classifications pour une meilleure identification des sols arides de l'écosystème oasien de la région d'étude.

2.1.1.3. Monitoring des changements au niveau des sols

Ce volet s'intéresse à la recherche des changements qui auraient résulté au niveau des sols dans un contexte se caractérisant par la fragilité de l'écosystème oasien et dont l'exacerbation serait primordialement due à la mise en culture et au changement d'usage, qui s'y sont intensifiés durant les trois dernières décennies. L'étude actuelle s'appuie sur les informations antérieurement apportées par des travaux initiés en 1991.

Ce travail a été engagé en 2021 et a couvert une dizaine de sites représentés par 10 profils pédologiques. Ces aspects de terrain et laboratoire permettent de cerner les caractères morpho-analytiques des sols étudiés (Belghemmaz et al., 2024a ; Belghemmaz et al., 2024b) ; tandis que ceux obtenus par l'utilisation de l'approche de la télédétection (Belghemmaz et al., 2018 ; Belghemmaz et al., 2024a) pourront aider à la compréhension des principaux aspects de l'évolution qu'ont subis les sols de la région des Ziban.

Pour établir ce diagnostic, il a été suggéré de procéder à la comparaison de l'état des lieux actuel sur la pédodiversité, les propriétés des du sol et sur les processus contrôlant leur évolution, avec l'état des lieux qui peut être traduit par la diversité typologique de la ressource en sol qui y a été obtenu en 1991.

2.1.1.4. Télédétection

Ce volet est commun aux chapitre 2, 3 et 4 de la partie résultats et discussion qui portent respectivement sur le monitoring de la dynamique des agroécosystèmes oasiens, notamment en termes de changements affectant d'une part, leur état de surface, les propriétés liées à leur fonctionnement, leur utilisation, leur typologie, etc. et d'autre part, l'évaluation de leur état de dégradation.

Cette technique a reposé sur l'utilisation de divers capteurs et approches à distance pour l'identification et la cartographie des sols accumulations salines au sens large. La méthode utilisée s'est appuyée sur l'analyse spectrale et la classification de l'occupation du sol, ainsi que sur une caractérisation analytique de plusieurs paramètres des échantillons de sol et d'eau. Les caractéristiques du sel et les principales classes d'occupation du sol ont été extraites à l'aide d'un arbre de décision personnalisé (DT Classifier) de l'image Landsat du 19 avril 2016 (Biskra), comme présenté dans le sous-titre relatif à cette approche dans les chapitres 3 et 4 de la partie des résultats et discussion.

Les images satellitaires Landsat 5 (1991) et Landsat 8 (2021) ont été utilisées pour apprécier le degré de changement de l'occupation des sols et de leur utilisation. L'analyse des différences dans l'indice de végétation normalisé (NDVI), entre ces deux périodes, est effectuée pour essayer de faire ressortir l'évolution qui a eu lieu dans cette région.

2.1.1.5. Evaluation de l'état de dégradation des agroécosystèmes oasiens

a) Caractéristiques de la zone d'étude

La région de Tolga est située à l'ouest de Biskra, dans le Zab occidental des Ziban (Biskra), au nord-est de l'Algérie, à la frontière avec le désert du Sahara) et c'est l'une des régions les plus importantes d'Algérie en termes de production de dattes et d'exportation de la variété de haute qualité 'Deglet-Nour' à la fois au niveau national et international. Le climat des Ziban est aride (précipitations annuelles moyennes inférieures à 20 mm). Les sols de ces oasis résulteraient de l'action combinée de colluvions et de transports éoliens, marqués par les accumulations salines ; ils sont dans leur majorité de texture sableuse.

b) Méthode d'étude et recueil de données

La prospection des palmeraies de la région de Tolga a été effectuée en avril 2016 et a permis de prendre connaissance de l'hétérogénéité des jardins de palmier dattier ; il a été remarqué que certaines oasis ne montrent pas de problèmes apparents concernant leur développement, quant à d'autres, elles paraissent dans un état de stress qui est révélateurs de la présence de problèmes qui empêchent leur épanouissement. Un des principaux critères communs aux oasis tenait, notamment, au fait que le drainage est une pratique à prendre en considération dans cette investigation.

Après, d'autres critères ont été également intégrés tels que la forme du relief (position des oasis dans le paysage), l'âge des palmiers, le couvert végétal, état de surface du sol et son occupation, pour différencier entre les oasis.

Au cours de cette prospection, il a été noté que le phénomène de salinisation est très répandu dans les palmeraies de Tolga et ses environs ; il affecte les agroécosystèmes à des visiblement différents.

De ces sites oasiens, trois oasis ont été choisies ; elles font partie des 10 meilleurs sites des agroécosystèmes de la région des Ziban et sont situées entre les palmeraies de Bordj Ben Azzouz (BBA) et celles de Lioua. Leurs coordonnées correspondent aux lieux d'échantillonnage ; leur répartition est donnée comme suit :

- ❖ L'oasis 1 (Lioua): 34° 37' 53" N et 5° 24' 12" E ;
- ❖ L'oasis 2 (sud-est de Lioua : sur la rive nord de l'Oued Djedi),

34° 36' 49" N et 5° 24' 23" E ;

❖ L'oasis 3 (Sud des palmeraies de Bordj Ben Azouz), et 34° 40' 35" N et 5° 23' 39" E.

Les caractéristiques détaillées de ces oasis ainsi que les points où l'eau d'irrigation a été prélevée, sont données dans le tableau 29 du chapitre 3 de la partie résultats et discussion.

Dans chaque oasis, on a réalisé un profil pédologique à l'aide d'une tarière manuelle selon trois profondeurs de sol différentes (0-20 cm, 20-50 cm et > 50 cm). Au niveau de chaque oasis, on a prélevé trois échantillons d'eau, dont les sources sont différentes : eaux souterraines (oasis 1), eaux de drainage (oasis 2) et eaux de drainage (oasis 3).

c) Analyse des échantillons d'eau et du sol

Les échantillons de sol et d'eau ont été analysés selon les méthodes recommandées par (Mathieu et Pieltain 2003). En ce qui concerne les échantillons de sol, le pH et la CE sont mesurés sur un extrait d'eau 1:5 (1:5) en utilisant la méthode potentiométrique. Le taux du calcaire total a également été déterminé en dosant cet élément par la méthode volumétrique du Calcimètre Bernard. Pour les échantillons d'eau, on a seulement déterminé le pH et la CE en utilisant la méthode potentiométrique. Chaque paramètre a été mesuré avec 3 répétitions.

d) Analyse statistique

Nous avons effectué une analyse ANOVA à sens unique en utilisant les profils de sol (prélevés à trois profondeurs différentes dans les trois oasis) comme facteur. Ensuite, nous avons effectué une ANOVA à sens unique en utilisant la source de provenance des eaux (eaux de drainage, eaux souterraines et eaux de décharge de drainage) comme facteur. Lorsqu'il y a un effet du facteur, nous comparons les moyennes en utilisant le HSD (Honestly Significant Difference) de Tukey. Tous les tests ont été effectués à un niveau de signification de 5 %.

Partie III : Résultats et discussion

Chapitre 1 : Etat global des sols de la région de Ain Ben Noui et ses environs en 1991

Les résultats présentés dans cette section ont été obtenus dans le cadre d'un travail de mémoire d'ingénieur dont les travaux de prospection et de reconnaissance pédologiques et les analyses du sol ont été entamés dès juin 1991 pour se terminer un an après. La finalité de ce travail consistait en la caractérisation physico-chimique des sols à accumulation gypseuse de la région de Ain Ben Noui qui fait partie du Zab occidental. L'étude de ces sols a aussi porté sur la détermination des différents types de sols selon les systèmes de classification de l'USDA (1975), de la FAO (1973 et 1986) et du RPF (1992) dont les résultats ne sont pas présentés dans cette thèse.

Un essai sur la minéralogie de ces sols a été également tenté en vue d'identifier les minéraux les plus dominants dans ces sols et de déceler, en particulier, la présence de certains minéraux argileux dans ces milieux pédologiques spécifiques.

1. Contexte du travail et importance des résultats

Les sols de cette région font partie, dans leur majorité, de l'écosystème oasien de la région des Ziban qui se caractérise, principalement, par la culture du palmier dattier. Cet environnement a connu une dynamique agricole soutenue, notamment, au milieu des années 90 qui s'est poursuivie jusqu'à la fin du 20^{ème} siècle. Les ressources en sols ont, alors, subi des changements importants dans leurs propriétés, à cause de la pression anthropique qui n'a pas cessé de croître durant 3 décennies. La gestion de ces milieux fragiles et dynamiques est une question stratégique ; elle doit être fondée sur une approche qui prendra soin des ressources en sol et en eau. Parce que la surexploitation ou l'utilisation de ces ressources, à mauvais escient, peut engendrer la détérioration rapide des propriétés fonctionnelles des sols et l'apparition de problèmes qui se répercuteront sur le fonctionnement de ces écosystèmes et sur leur durabilité.

Les connaissances qui ont été acquises en 1991 sur ces sols, pourraient aider à étudier les changements qui auraient pu se profiler ou s'installer, avec le temps, dans ces endroits. Les impacts de leur exploitation « à outrance ou parfois inadéquate » peuvent probablement se traduire par des modifications aussi bien sur leurs fonctions écosystémiques (rétention d'eau et de bioéléments, séquestration du carbone et la biodiversité). C'est pourquoi, tout ce qui va être présenté sur l'étude de ces sols en 1991, se veut à la fois un regard rétrospectif et une

restitution critique qui portera sur les aspects majeurs de ces sols (propriétés, processus d'évolution et typologie).

2. Regard critique sur les caractéristiques morpho- analytiques des sols et choix des unités représentatives

Ce sont, tout d'abord, les 16 unités physiographiques des sols qui ont été différenciées en 1991 puis délimitées, sur terrain, en fonction de leur aspect de surface et compte tenu des critères qui ont été déjà explicités dans la méthodologie qui ont donné lieu à 16 unités cartographiques de sols. Seize profils pédologiques ont servi à l'étude de ces unités. Cependant, il a été jugé que le mode de distribution spatiale de ces unités, à ce niveau précis du travail (prospection pédologique et reconnaissance), ne reflétait que sommairement le produit de l'interaction des facteurs de pédogenèse de la région d'étude. La représentation qui en est dérivée s'était avérée incomplète, parce qu'elle est uniquement basée sur l'observation d'un certain nombre d'aspects qui pourraient renseigner sur des processus notoirement connus tels que la salinisation, l'hydromorphie, formation des croûtes de gypse et/calcaire, l'occupation du sol, etc.

C'est pourquoi, après la caractérisation physico-chimique des échantillons de sols, des détails importants ont été recueillis sur les propriétés des sols ; ce niveau d'étude a permis de compléter le diagnostic de terrain et de confirmer la présence de traits pédologiques communs entre certaines unités. Ceci a été à l'origine de la sélection de seulement 12 profils pour représenter les 12 unités cartographiques de sols (UCS) ; sur la base de leurs caractéristiques morpho-analytiques, ces UCS ont été considérées comme éligibles à représenter la diversité pédologique la région d'étude. Par contre, les 4 profils restants (P13, P14, P15 et P16), ne figurent pas dans cette thèse, parce que leurs propriétés ont été jugées redondantes.

A la fin, les unités typologiques de sols (UTS) ont pu être distinguées ; chacune de ces UTS peut représenter une ou plusieurs UCS avec un profil pédologique type. Il y a 8 profils types dont chacun est censé révéler le maximum d'analogie soit, en termes des conditions physiographiques du site où il apparait, soit en termes de caractéristiques analytiques et morphologiques, avec les profils qu'il représente au sein des 12 UCS. Cependant, cela a aidé uniquement à l'identification des profils types selon le type d'accumulation saline : les sols dominés par la présence des taux considérablement importants en gypse et ceux qui sont marqués par l'influence de sels solubles, ont été déterminés. La présence des croûtes calcaires ou calcaro-gypseuses est un aspect qui a été également intégré pour discriminer les profils types.

Néanmoins, cette approche, même si techniquement, a permis de donner une idée globale sur les principales UTS et sur les profils types, mais elle paraît insuffisante dans la mesure où elle n'a pas pu contenir les aspects communs aux sols. Ceci dit, les sols dominés par la présence du gypse peuvent parfois montrer des niveaux de salinité et /ou la présence de taux de CaCO_3 qui méritent d'être signalés. La même chose pour les sols (profils) à manifestation saline et ayant surtout des CE élevées, ceux-là peuvent renfermer des taux de gypse et/ou calcaire que l'on ne doit, évidemment, pas occulter.

3. Proposition de modalité de présentation des unités représentatives de sols

Il importe de préciser qu'en vue de rendre pratique la présentation des données synthétiques (morphologiques et physico-chimiques) et typologiques de ces UCS, il était indispensable et même impératif de re-classifier ces sols selon la WRB (2015) et ce, pour connaître les principaux types de sols qui prédominent dans la région d'étude. De cette manière, les objets à représenter ou à introduire dans ce qui va suivre, auront plus de cohérence et de signification. C'est ainsi, que cette classification a permis de regrouper les sols en fonction de leur typologie ; 2 RSGs (Reference Soil Groups) ont été alors distingués, à savoir les **Gypsisols** et les **Solonchaks**.

3.1. Les Gypsisols

On distingue, d'une part, les Calcic Gypsisols (Hypergypsic) qui, en plus de l'horizon gypsic par lequel ils sont définis, ils se caractérisent, par la présence d'un horizon diagnostic de subsurface de type calcic qui est utilisé comme qualificatif principal ; ces sols sont rencontrés dans les pédons 1, 2 et 8 et représentés par les pédons 1 et 8.

D'autre part, on note la présence des Haplic Gypsisols (Hypergypsic) qui se répartissent entre les UTS 3, 5, 9, 10 et 12 ; ces sols ne montrent aucun autre horizon diagnostic supplémentaire se formant entre 0 et 100 cm. Les pédons représentatifs de ces sols sont 3, 5 et 10.

3.2. Les Solonchaks

Ces sols se caractérisent par une forte teneur en sels solubles ; ils sont particulièrement fréquents dans les dépressions fermées et dans les formes plates du paysage (FAO, 2001). Trois variantes de ce RSG sont définies ; elles sont présentes dans les UTS 4, 6, 7 et 11. Il s'agit des Calcic Solonchaks, Gypsic Solonchaks et les Calcic Gypsic Solonchaks. Les profils représentatifs des Solonchaks sont 4, 6, 7 et 11. On remarque que dans ce RSG, les sols se distinguent par la présence de principaux qualificatifs qui sont liés à l'accumulation des

carbonates et/ou de gypse qui a favorisé la formation d'horizons calcic, gypsic ou les 2 au sein d'un même profil.

4. Caractéristiques des UTS représentatives et séquence des horizons

Les descriptions qui ont été accordées à ces unités de point de vue physiographique (type de relief et pente), morphologique (couleur et structure) et analytiques, sont synthétisées et recueillies dans les tableaux. Ces données restituent, d'une part, les résultats de l'investigation de terrain qui a eu à l'échelle du paysage et au sein du profil, notamment pour différencier et décrire les horizons pédologiques. D'autre part, elles rendent compte de l'état des propriétés des sols qui découlent des mesures de leurs paramètres chimiques dynamiques tels que la CE, le pH et les taux de C.O ainsi que leurs contenus en gypse et en calcaire.

Les combinaisons des horizons les plus fréquemment reconnues dans les profils étudiés sont de type A-C-R ; cette séquence correspond à la majorité des profils exceptés P11 et P6 dont les séquences d'horizons sont différentes et se présentent, respectivement, comme suit : A-Csa-R et A-Cg-R. Les deux dernières séquences d'horizons qui ont été rencontrées dans P11 et P6, s'établissent en fonction du développement des processus 'intrazonaux' (Roquero, 1979) ; ces processus consistent en l'hydromorphisme et l'alcalinisation qui prédominent localement.

4.1. Caractéristiques des UTS des Gypsisols

4.1.1. Calcic Gypsisols (Hypergypsic)

Ces UTS sont représentés par les profils types des UCS 1, 2 et 8. Leurs différentes caractéristiques qui décrivent les facteurs de station, sont résumées dans le tableau 12.

Tableau 12 : Caractéristiques physiographiques de l'UCS 1

UCS	Profil	Relief, topographie et autres caractéristiques du paysage	Matériau parental	Drainage	Végétation
1 2 8	1*	Glacis ; Plate (0-2% de pente)	sablo-argileux	Modéré	Naturelle
	2	Glacis ; ondulé, pente variable de 2-6%	Sablo-argileux	Normal	Naturelle
	8*	Glacis ; ondulé, pente variable de 2-6%	Sablo-argileux	Pauvre	Naturelle

*: profils représentatifs des UCS

a) Description morphologique des profils des UCS

Données morphologiques de l'UCS 1

Horizon A : 0-18 cm

Brun très pâle (10 YR 8/4) sec, jaune brunâtre (10 YR 6/6) humide, sable limoneux, particulaire, non collant et non plastique, tendre, peu nombreux pores moyens à fins discontinus, forte effervescence, assez nombreuses racines fines, transition abrupte et régulière.

Horizon C1cs : 18-64 cm

Brun très pâle, (10 YR 8/4) sec, jaune brunâtre (10 YR 6/6) humide, limon sableux, massif, non collant et peu plastique, tendre, peu nombreux pores fins discontinus, forte effervescence, assez nombreuses racines moyennes, transition abrupte et régulière.

Horizon C2 cs : 64-99 cm

Brun très pâle (10 YR 8/4) sec, brun jaunâtre (10 YR 5/6) humide, limon, massif, peu collant et peu plastique, ferme, peu nombreux pores très fins continus, forte effervescence, assez nombreuses racines fines, transition distincte et régulière.

Horizon C3 cs : 99-133 cm

Brun très pâle (10 YR 8/4) sec, brun jaunâtre (10 YR 5/6) humide, massif, peu collant et peu plastique, ferme, peu nombreux pores très fins continus, faible effervescence, assez nombreuses racines fines, transition distincte et régulière.

Tableau 13: Résultats analytiques du profil n°1

Prof. (cm)	pH eau (1 :2,5)	CEps (dS.m ⁻¹)	Gypse (%)	CaCO ₃ (%)	C.org. (%)	M.O (%)
0-18 A	7,7	6.53	0.79	22.02	0.27	0.46
18-64 C1cs	7.6	3.94	20.31	15.56	0.11	0.20
64-99 C2cs	7.5	4.39	60.95	4.74	0.11	0.20
99-133 C3cs	7.5	7,8	70.74	3.03	0.23	0.40
133-145 C4cs	7.4	9.56	81.66	2.27	0.11	0.20
145 et + C5cs	7.4	5.19	81.29	3.03	0.23	0.40

Horizon C4 cs : 133-145 cm

Blanc (10 YR 8/1) sec, jaune pâle (10 YR 7/3) humide, massif, peu collant et peu plastique, friable, peu nombreux pores très fins continus, faible effervescence, transition abrupte et régulière.

Horizon C5 cs : 145- 159 cm et plus

Brun très pâle (10 YR 8/3) sec, brun jaunâtre (10 YR 5/6) humide, limon fin, massif, non collant et peu plastique, friable, faible effervescence.

Données morphologiques de l'UCS 8

Horizon A : 0-90 cm

Brun très pâle (10 YR 7/3) sec, jaune brunâtre (10 YR 6/6) humide, sable limoneux, particulaire, non collant et non plastique, tendre, peu nombreux pores moyens discontinus, forte effervescence, peu nombreuses *grosses racines*, transition abrupte et régulière.

Horizon C1cs : 90-123 cm

Brun très pâle (10 YR 8/3) sec, brun jaunâtre (10 YR 5/6) humide, limon fin, massif, effervescence moyenne, assez nombreuses moyennes racines, transition distincte et régulière.

Horizon C2 cs : 123- 139 cm

Brun très pâle, (10 YR 8/3) sec, brun jaunâtre (10 YR 5/6) humide, massif, peu collant et non plastique, très friable, faible effervescence, très peu nombreuses racines très fines, transition distincte et régulière.

Horizon C3 cs : 139- 161 cm

Blanc (10 YR 8/2) sec, brun très pâle (10 YR 7/4) humide, massif, collant et peu plastique, peu nombreux fins pores discontinus, faible effervescence, très peu nombreuses racines fines à très fines.

Tableau 14 : Résultats analytiques du profil n°8

Prof. (cm)	pH eau 1 :2,5	CEps (dS.m⁻¹)	Gypse (%)	CaCO₃ (%)	C. org (%)	M.O (%)
0-90 A	7,7	6,67	6,12	20,6	0,19	0,33
90-123 C1cs	8,1	8,25	62,45	02,08	0,27	0,46
123-139 C2cs	7,8	4,15	84,34	05,31	0,19	0,33
139-161 C3cs	7,3	4,04	94,45	02,27	0,23	0,4

b)

b) Caractéristiques synthétiques des UTS des Calcic Gypsisols (Hypergyptic)

Les profils types des UCS 1, 2 et 8 caractérisent les sols non cultivés qui sont formés sur un matériau minéral riche en sable limoneux. Les profils 1 et 8 sont profonds et sont de type A-CCs sans discontinuité lithologique. Les résultats analytiques de P1 et P8 sont données, respectivement, dans les tableaux 13 et 14. Le pH de P1, P2 et P8 est alcalin et il varie entre 7,4 et 8,1. D'après l'échelle de salinité définie par Dahnke et Whitney (1988), les horizons de

ces profils sont modérément à fortement salés, leur CE est comprise entre 3,9 et 9,56 dS.m⁻¹. Avec des taux arrivant jusqu'à plus de 90 %, le gypse constitue l'élément le plus abondant dans ces profils avec des taux qui ont tendance à enrichir les horizons inférieurs du sol, particulièrement ceux situés au-delà de 90 cm. Le CaCO₃ se concentre dans les horizons de surface avec un taux qui arrive à 22% ; la distribution de cet élément est faible ($\leq 5\%$) dans les niveaux inférieurs des profils. Le taux de C.O est extrêmement faible dans ces profils.

La structure du sol est généralement particulière en surface, mais, elle devient massive dès l'horizon C1Cs. La couleur du sol à sec est peu variable dans les deux profils ; la valeur se situe entre 7 et 8 avec une chroma comprise entre 1 et 4.

4.1.2. Haplic Gypsisols (Hypergypsic)

Ces UTS sont représentés par les profils types des UCS 3, 5 et 10. Leurs caractéristiques qui définissent les conditions de station figurent dans le tableau 15.

Tableau 15 : Caractéristiques physiographiques des UCS représentatives

UCS	Profil	Relief, topographie et autres caractéristiques du paysage	Matériau parental	Drainage	Végétation
3, 5, 9 10, 12	3*	Glacis ; ondulé, pente variable de 2-6% ; lieu-dit " Choucha "	sablo-argileux	Normal	Palmeraie
	5*	Glacis ; ondulé ; pente variable de 2-6% ; micro-dunes ; affleurement de la croûte gypseuse	Sablo-argileux	Imparfait à modéré	Verger de palmiers en voie de dépérissement
	10*	Glacis ; ondulé, pente variable de 2-6%	Sablo-argileux	imparfait	Naturelle

* : profils représentatifs des UCS

a) Description morphologique des profils des UCS

Données morphologiques de l'UCS 3

Horizon A : 0-32 cm

Brun très pâle (10 YR 8/4) sec, jaune (10 YR 7/6) humide, limon fin, particulière, peu collant et non plastique, tendre, peu nombreux pores très fins discontinus, effervescence moyenne, peu nombreuses racines très fines, transition distincte et régulière.

Horizon Ccs : 32-119 cm

Blanc (10 YR 8/1) sec, brun très pâle (10 YR 7/3) humide, massif, non collant et non plastique, friable.

Tableau 16 : Résultats analytiques du profil n°3

Prof. (cm)	pH eau 1 :2,5	CEps (dS.m⁻¹)	Gypse (%)	CaCO₃ (%)	C. org (%)	M.O (%)
0-32 A	7,7	8,01	78,27	01,70	0,31	0,53
30-119 Ccs	7,7	11,0	83,27	01,13	0,03	0,06

Données morphologiques de l'UCS 5

Horizon A : 0-20 cm

Brun très pâle (10 YR 8/4) sec, jaune (10 YR 6/6) humide, limon fin, structure particulaire, peu collant et peu plastique et tendre, effervescence moyenne à l'HCl, transition abrupte et régulière.

Horizon C1cs : 20-85 cm

Blanc (10 YR 8/2) sec, brun très pâle (10 YR 7/4) humide, peu collant et non plastique, friable et tendre, faible effervescence à l'HCl, transition distincte à graduelle et ondulée.

Horizon C2cs : 85-152 cm

Blanc (10 YR 8/2) sec, brun jaunâtre (10 YR 6/4) humide, massif, peu collant et non plastique, friable, peu nombreux pores très fins et continus, forte effervescence à l'HCl, transition abrupte et régulière.

Horizon C3cs : 152-167 cm

Jaune (2.5 YR 7/8) sec, brun jaunâtre (10 YR 6/6) humide, structure massive, peu collant, peu plastique et friable, peu nombreux pores très fins et continus, forte effervescence à l'HCl, nombreux cristaux de sels de petite taille, transition abrupte et régulière.

Horizon C3cs : 167- 212 cm

Blanc (10 YR 8/1) sec, gris brunâtre (10 YR 7/2) humide, structure massive, peu nombreuses tâches de couleur ocre et rouille à contraste et limites nets, peu collant, peu plastique et très friable, faible effervescence à l'HCl.

Tableau 17 : Résultats analytiques du profil n°5

Prof. (cm)	pH eau 1 :2,5	CEps dS.m-1	Gypse (%)	CaCO ₃ (%)	C.org. (%)
0-20 (A)	7.8	3,33	68.67	2.65	0.03
20-85 (C1cs)	7.7	33.10	86.21	01,32	0.07
85-152 (C2cs)	7.8	19.94	51.34	15.56	0.07
152-167(C3cs)	7.7	16.86	51.91	12.91	0.03
167-212(C4cs)	7.5	5.00	36.47	17.27	0.03

b) Caractéristiques synthétiques des UTS des Haplic Gypsisols (Hypergypsic)

Les profils types de l'UCS 3 et 5 se situent, respectivement, dans les palmeraies dont l'une était en voie de dépérissement (P5) ; cependant P10 représente un terrain non cultivé. Les sols de cette UTS sont représentés par un profil de type A-Ccs, profond et de couleur très variable (brun très pâle en surface au blanc et jaune dans le reste des horizons). La structure est particulière dans l'horizon supérieur et devient massive dans les horizons Ccs. Le symbole cs est adopté par Maignien (1969) pour désigner l'accumulation gypseuse ; à ce symbole peuvent correspondre gy, jg et wg dans la WRB (2015). Les résultats analytiques de P3 et P5 sont, respectivement, présentés dans les tableaux 16 et 17. Le taux de M.O est très faible dans tout le profil. Le pH du sol est globalement alcalin et n'excède pas 7,8. La distribution du calcaire dans le profil montre que les parties inférieures du sol contiennent des taux de carbonates modérés (12-17%), alors que les horizons de surface et de sub-surface n'en recèlent que de très faibles taux (<2.65%).

Concernant l'accumulation de gypse, elle est nettement élevée et sa répartition est continue le long du profil. L'horizon proche de la surface (20-85 cm) renferme le plus grand taux (86,21%), cependant, dans le dernier horizon de P5 (C4Cs), la concentration de gypse décroît de plus de la moitié (36,47%) en comparaison avec l'horizon de sub-surface.

La salure est, en effet, très prononcée dans les horizons moyens (20-167 cm) et ses valeurs oscillent entre 16,86 et 33,10 dS.m⁻¹ dans cette section du profil. L'accumulation saline est moins élevée en surface et dans le dernier horizon ; la valeur de la CE dans les 3 profils types se situe entre 3,33 et 5,0 dS.m⁻¹.

La couleur du sol (état sec) est dans les profils types 3, 5 et 10 est brun très pâle (10YR 8/4) dans les horizons A sauf dans celui de P3 ; elle garde la même hue, mais acquiert une valeur de 8 avec une chroma oscillant entre 1 et 2 pour les horizons sous-jacents (CCs).

Données morphologiques de l'UCS 10

Horizon A : 0-12 cm

Brun très pâle (10 YR 8/4) sec, brun très pâle (10 YR 6/6) humide, polyédrique, peu collant et peu plastique, dur, faible effervescence, très peu nombreuses racines fines, transition abrupte et régulière.

Horizon C1cs : 12-49 cm

Blanc (10 YR 8/1) sec, brun (10 YR 5/3) humide, limon fin, massif, peu collant et peu plastique, friable, très peu nombreux fragments de minéraux tubulaires allongés, forte effervescence moyenne, transition abrupte et irrégulière.

Horizon C2cs : 49-111 cm

Blanc (10 YR 8/2) sec, jaune pâle (5 Y 7/3) humide, limon argileux, massif, peu collant et peu plastique, dur, forte effervescence, très peu nombreuses racines très fines.

Tableau 18 : Résultats analytiques du profil n°10

Prof. (cm)	pH eau 1 :2.5	CEps (dS.m⁻¹)	Gypse (%)	CaCO₃ (%)	C.org. (%)	M.O (%)
0-12 A	7,5	26,41	73,08	00,37	0,31	0,53
12-49 C1cs	7,6	22.50	64.69	9.11	0,54	0,93
49-111 et + C2cs	7, 8	8,68	71,61	11,58	0,11	0,20

4.2. Les Solonchaks

Ces UTS sont représentés par les profils types des UCS 4, 6, 7 et 11. La description des facteurs de station de chaque UCS est donnée dans le tableau 19.

On remarque que ces unités de sols sont réparties sur des glacis dont la pente est comprise entre 2-6% et le drainage naturel est modéré à imparfait. De telles conditions sont déjà favorables pour que ces UTS soient saturées en eau ; les sels peuvent également s'y accumuler, notamment si l'irrigation des jardins de palmeraies était mal pratiquée.

Tableau 19 : Caractéristiques physiographiques des UCS représentatives

UCS	Profil	Relief, topographie et autres caractéristiques du paysage	Matériau parental	Drainage	Végétation
4, 6, 7 et 11	4*	Sud de la station ITDAS (Ain Ben Noui), Glacis ; ondulé, pente variable de 2-6% ; efflorescences salines	Sablo-argileux	Imparfait à pauvre	Naturelle
	6*	Glacis ; ondulé ; pente variable de 2-6% ; micro-dunes ; affleurement de la croûte gypseuse	Sablo-argileux	Imparfait à modéré	Verger de palmiers en voie de dépérissement
	11*	Glacis ; ondulé, pente variable de 2-6%	Sablo-argileux	imparfait	Palmiers dattiers de plantation récente

*: *profils représentatifs des UCS*

a) Description morphologique des profils des UCS

Données morphologiques de l'UCS 4

Horizon A : 0-55cm

Brun très pâle (10 YR 8/4) sec, jaune brunâtre (10 YR 6/6) humide, limon fin, particulaire, non collant et non plastique, tendre, présence d'un niveau dur de quelques cm d'épaisseur, effervescence moyenne à l'HCl, peu nombreuses racines fines, transition distincte et régulière.

Horizon Ccs : 32-119 cm

Blanc (10 YR 8/1) sec, brun très pâle (10 YR 7/3) humide, massif, non collant et non plastique, friable.

Tableau 20 : Résultats analytiques du profil n°4 (UTS 4 ; 6 ; 11)

Prof. (cm)	pH eau 1 :2,5	CEps (dS.m ⁻¹)	Gypse (%)	CaCO ₃ (%)	C. org. (%)
0-55 (A)	8,3	19,78	5,00	18,60	0,03
55-115 (CIg)	8,1	22,62	0,68	22,40	0,7
115-155 (CIIg)	8,0	10,73	0,44	15,94	0,03

b) Données morphologiques de l'UCS 6

Horizon A : 0-45 cm

Brun très pâle (10 YR 8/4) sec, jaune (10 YR 6/6) humide, limon fin, particulaire, peu collant et non plastique, peu dur, peu nombreux pores très fins discontinus, forte effervescence moyenne, peu nombreuses racines grosses, transition abrupte et régulière.

Horizon C1cs : 45-72 cm

Blanc (10 YR 8/2) sec, jaune brunâtre (10 YR 6/6) humide, limon fin, massif, peu collant et non plastique, friable, peu nombreux pores fins discontinus, faible effervescence, peu nombreuses racines très fines, transition abrupte et régulière.

Horizon C2cs : 72-97 cm

Brun très pâle (10 YR 8/4) sec, jaune brunâtre (10 YR 6/6) humide, limon fin, massif, peu collant et non plastique, friable, peu nombreux pores fins et discontinus, forte effervescence, peu nombreuses racines moyennes, transition distincte et régulière.

Horizon C3cs : 97- 153 cm

Brun très pâle (10 YR 8/3) sec, jaune rougeâtre (7,5 YR 7/6) humide, peu nombreuses tâches noires à contraste distinct, massif, peu collant et non plastique, friable, très peu nombreuses racines très fines, transition abrupte et régulière.

Horizon C3cs : 153- 173 cm

Blanc (10 YR 8/2) sec, jaune rougeâtre (7,5 YR 7/6) humide, peu nombreuses tâches fines à contraste vague, limon fin, massif, peu collant et non plastique, friable, très peu nombreuses fines racines, faible effervescence.

Tableau 21 : Résultats analytiques du profil n°6

Prof. (cm)	pH (eau) 1 :2,5	CEps (dS.m⁻¹)	Gypse (%)	CaCO₃ (%)	C. org (%)
0-56 A	7,7	31,23	43,63	08,92	0,53
56-76 C1Cs	7,5	11,24	77,33	01,13	0,15
76-101 C2Cs	7,4	5,31	76,20	02,65	0,19
101-128 C3Cs	7,5	6,55	65,28	01,13	0,15
128-173 C4Cs	7,5	3,33	87,29	05,88	0,07

UCS 11

Horizon A : 0-8 cm

Blanc (10 YR 8/2) sec, jaune brunâtre (10 YR 6/6) humide ; limon fin ; structure particulaire, peu collant, peu plastique et très friable, peu nombreux pores fins et continus, forte effervescence à l'HCl, peu nombreuses racines fines à grosses, transition distincte et régulière.

Horizon II C1 Sa : 08-34 cm

Gris brunâtre (10 YR 7/2) sec, jaune (10 YR 6/2) humide, limon sableux à limoneux, massive, peu nombreuses tâches moyennes à contraste distinct, peu nombreux pores très fin et continus, présence de cailloux de forme allongée ressemblant à des poupées, forte effervescence à l'HCl, peu nombreuses racines fines, transition abrupte à distincte et irrégulière.

Horizon IIIC2 Sa : 34-64 cm et

Blanc (10 YR 8/1) sec, gris brunâtre (10 YR 6/2) humide, massive, peu nombreuses tâches fines de couleur grise à contraste distinct, peu collant et peu plastique, nombreux cailloux (dimension de graviers) allongés en formes de poupées, forte effervescence, à l'HCl, transition abrupte et régulière.

Horizon IIIC3 Sa : 64- 107 cm

Blanc (10 YR 8/1) sec, gris (10 YR 5/1) humide, limon argileux, structure massive, peu collant, peu plastique et très friable, très peu de fragments de minéraux de petite taille, forte effervescence à l'HCl.

Horizon IVC4 Sa : 107- 152 cm

Gris clair (10 YR 7/1) sec, brun jaunâtre « très sombre » (10 YR 3/2) humide, limon argileux, structure massive, peu plastique, peu collant et très friable, très peu nombreux fragments de minéraux de petite taille, forte effervescence à l'HCl.

Tableau 22 : Résultats analytiques du profil n°11

Prof. (cm)	pH eau 1 :2,5	CEps (dS.m⁻¹)	Gypse (%)	CaCO₃ (%)	C. org. (%)
0-8	8,2	31,43	79,59	1,56	0,35
08-34	7,5	36,07	38,56	22,6	0,42
34-64	7,6	31,79	29,29	15,94	0,46
64- 107	7,7	37,30	33,26	20,50	0,54
107- 152	7,4	36,07	76,17	11,77	0,70

c) Caractéristiques synthétiques des UTS des Solonchaks

Les caractéristiques analytiques de tous les Solonchaks sont présentées dans les tableaux 18, 19, 20 et 21.

Les profils types des UCS se caractérisant par la présence de Solonchaks ayant en commun un seul aspect fondamental qui est lié à la présence d'une forte salinité à différents niveaux de ces profils. Cependant, si l'on tient compte d'autres caractéristiques telles que le type de profil qui selon FAO (2001) est de type AC, les taux de gypse et du calcaire, la couleur du sol et la position dans le paysage, il est possible de les répartir comme suit :

i) *des Solonchaks avec un profil de type A-CSa (P11)* où la salure est excessivement élevée avec une répartition quasiment uniforme le long du profil rencontrés; les valeurs de la CE se situent, respectivement, entre 31 et 37 dS.m⁻¹, dans l'horizon A et dans les horizons de profondeur. En plus de la salinité, l'accumulation du gypse, avec des taux atteignant 79 %, envahit tous les niveaux du sol, cet élément (gypse) peut également être signalé comme un fait important dans ce type de Solonchaks. La présence du calcaire en des taux modérés (15-22%) dans les 3 horizons sous-jacents à l'horizon A (0- 8 cm), semble aussi influencer ce profil. Le pH est alcalin et varie entre 7,4 et 7,7 dans les horizons inférieurs avec un pic de 8,2 en surface (tableau 22).

ii) *des Solonchaks rencontrés en P6 combinant entre 2 aspects* : la salinité et le gypse qui, à notre avis, pourraient dominer l'évolution de ces sols. Le profil est de type A-CCs ; la salinité est élevée en surface (31 dS.m⁻¹) et en subsurface (11 dS.m⁻¹) et modérée selon l'échelle de Dahnke and Whitney (1988), dans les horizons du bas du profil. Le CaCO₃ est présent en des quantités faibles (tableau 21). Le pH dans ce profil type est presque comparable à ce qui a été remarqué dans P11.

iii) *un troisième type de profil (P4)* est celui qui représente les Solonchaks ayant un profil marqué par la présence de tâches de pseudo-gley (A-Cg) qui traduisent des conditions d'hydromorphie qui s'étaient créées localement dans ce site. C'est aussi un profil type qui combine entre trois aspects : la salinité, le gypse et le calcaire, aussi bien que l'hydromorphie, comme éléments susceptibles d'impacter son évolution. Le pH présente les valeurs les plus élevées (8- 8,3) des deux précédents Solonchaks (P6 et P11). Les valeurs de la CE oscillent entre 10 et 22 dS.m⁻¹) indiquent une salinité élevée dans ce profil (tableau 20). Le calcaire se répartit le long du profil en des taux modérés à relativement élevés (15- 22%). L'accumulation de gypse est généralement forte, elle passe de 43% en surface (A) à 87% dans les horizons sous-jacents.

5. Principaux types de sols dans le Zab occidental, Ziban (Biskra)

L'étude qui a été menée par Abdeslam (1991) et Belghemmaz (1991) sur les sols de cette partie des Ziban a révélé une gamme de types de sols. Les sols ont été classifiés par ces

auteurs selon trois systèmes de classification : la Soil Taxonomy de l'USDA (1975), la FAO (1974) et sa version révisée de 1988. Les principales unités typologiques de sols qui ont été déterminées sont données dans le tableau 23.

5.1. Typologie de sols obtenue selon la classification FAO-UNESCO

L'application des critères des classifications des sols de la FAO (1974) et FAO révisée (1988) ont révélé une diversité limitée de sols dans la région de Ain Ben Noui et ses environs.

En effet, les sols d'accumulation gypseuse sont très majoritaires dans les deux versions de la classification FAO.

a) Classification FAO (1974) : En termes d'abondance, ce sont les Gypsic Xérosols qui prédominent (84 %), suivis des Calcic Xérosols et Gleyic Solonchaks dont le taux de chacun de ces 2 types est inférieur à 10% (fig. 6).

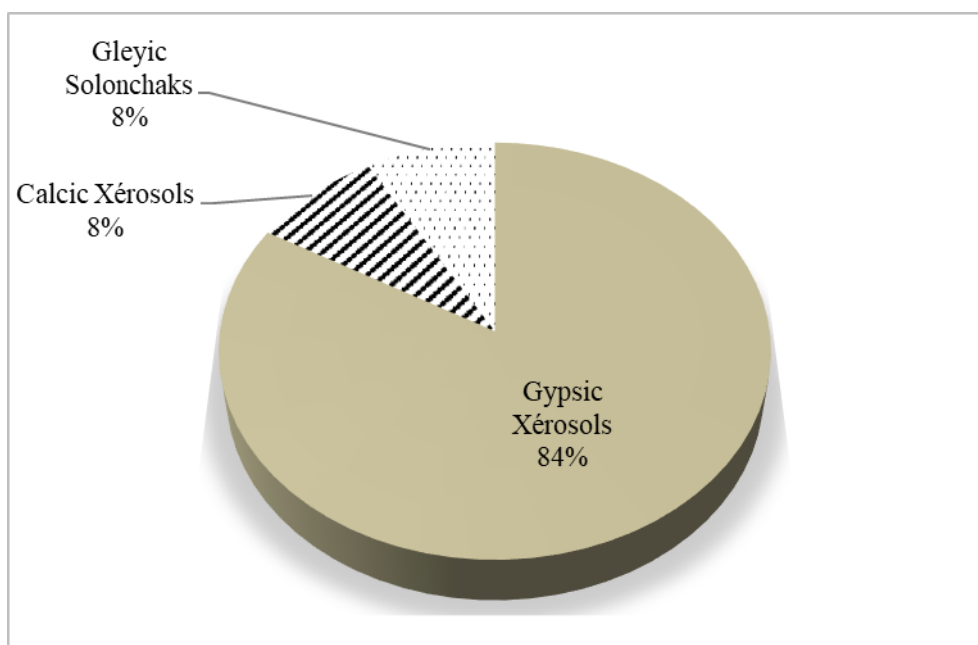


Figure 6 : Abondance relative des types de sols dans les Ziban (1991) selon la classification FAO-UNESCO (1974)

b) Classification FAO (1988) : la prépondérance des sols renfermant le gypse est également abondante (92 %) ; mais, l'avantage de cette version tient surtout au fait qu'elle a permis de différencier entre les Gypsisols qui évoluent en présence à la fois du processus d'hydromorphie engendré par la présence de la nappe phréatique proche de la surface et de la salinité (Saline Hydromorphic Gypsisols) d'une autre catégorie de Gypsisols qui est soumise uniquement au contact avec l'eau de la nappe, c'est les Typical Hydromorphic Gypsisols. Le reste des sols (8 %) est de type Ordinary Saline Haplosols (fig.7).

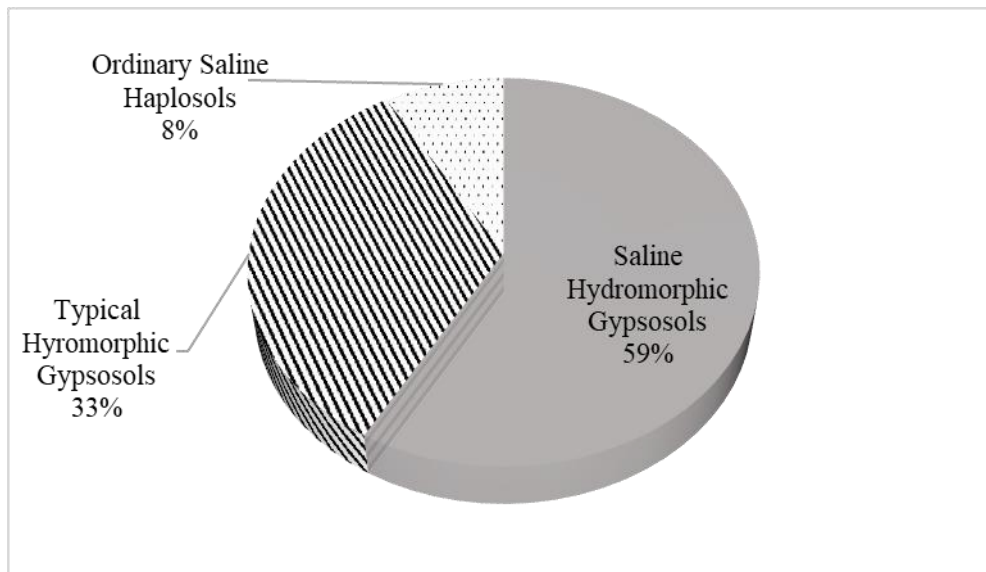


Figure 7 : Abondance relative des types de sols dans les Ziban (1991) selon la classification FAO-UNESCO (1988)

c) Chronologie, connotation et correspondance

Le nom Gypsisol vient de L. gypsum et se réfère aux sols avec une accumulation substantielle de sulfate de calcium. Dans la légende de la carte des sols du monde de la FAO (1974), les gypsisols ont été classés sous les Yermosols et sous les Xérosols. À partir de 1988, les Gypsisols ont été portés au niveau hiérarchique le plus élevé de la carte des sols de la FAO. Dans la taxonomie des sols, les Gypsisols sont classés sous les Aridisols en tant que Gypsiorthids. En URSS, les Gypsisols étaient appelés « sols désertiques ».

5.2. Typologie des sols obtenue selon le système de classification de l'USDA (1975)

Cette classification, comme celles de la FAO, a permis de mettre en évidence l'abondance des sols gypseux avec un taux de (84%), suivis des sols salés et des sols calcaires qui occupent des espaces égaux dans la région d'étude. Seulement, on s'aperçoit que le spectre de diversité des sols est relativement plus large en comparaison avec ceux de la FAO. Les sols gypseux sont subdivisés en 2 Grands Groupes (GG) : les **Typic Gypsiorthids** et les **Petrogypsic Gypsiorthids** qui sont différenciés en fonction de la présence de croûte ou d'encroûtement gypseux. Ces deux GG de sols présentent le même taux d'abondance (84%) que celui donné par la classification (FAO, 1974). Cette classification englobe, en plus des Salorthids, le GG des Typic Calciorthids.

5.3. Comparaison de la typologie des sols dans les systèmes de la ST (1975) et FAO (1974) et (1988)

Cette comparaison vise à juger de l'adéquation des 2 systèmes de classification (FAO et USDA) pour déterminer la typologie des sols du Zab occidental ; autrement dit, il sera question de décrire leurs avantages et limites, notamment, dans le contexte de sols contenant une diversité de sels et dont les processus pédogénétiques sont contrôlés par l'effet d'un climat extrêmement aride, donc excessivement évaporant. Ce qui pourrait rendre ces milieux dynamiques, particulièrement, vis-à-vis de la composante saline.

On remarque que la ST et les 2 versions de la classification FAO confirment la présence des sols à accumulation gypseuses en abondance avec un taux dépassant 80 % dans la région de Ain Ben Noui et ses environs (fig. 8). Cependant, les différences qui méritent d'être soulignées dans cette confrontation, sont comme suit :

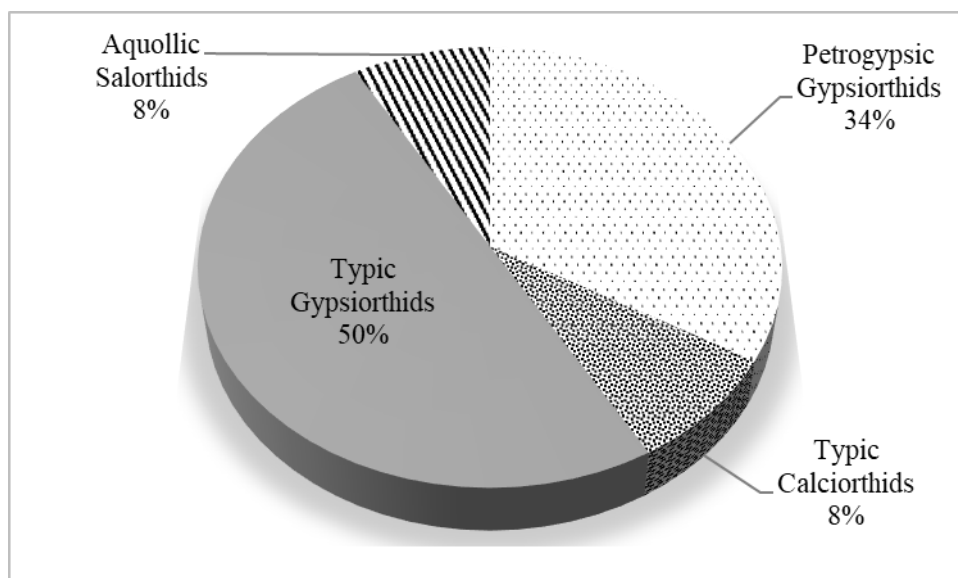


Figure 8 : Abondance relative des types de sols dans les Ziban (1991) selon la classification USDA (1975)

❖ Dans la ST, **i)** au sein des sols gypseux, une différence majeure tenant à la forme d'accumulation du gypse, a été prise en compte pour distinguer deux GG de Gypsiorthids ; **ii)** les sols manifestant la présence d'une accumulation calcaire, ne sont pas omis et ils apparaissent dans un GG à part entière. Parce qu'au sens taxonomique, ce type de sols renferme un horizon calcic ; **iii)** les sols ayant des manifestations salines ont été classifiés en leur associant le régime hydrique aquollic qui prévalait 'localement' en 1991.

❖ *Dans le système FAO (1974), i)* les sols sont classés en fonction du régime hydrique ; *ii)* il est, certes, rendu compte dans cette classification de la présence des 3 types d'accumulations salines (sels plus solubles que le gypse, le gypse et le calcaire), mais, seuls les Solonchaks ont été identifiés et désignés en leur associant un qualificatif "Gleyic" (P11) qui décrit le processus pédologique spécifique qui les caractérise ; *iii)* dans d'autres profils, la salinité est un aspect qui prévalait dans d'autres profils en association avec le gypse et/ou calcaire par exemple, mais, cela n'est pas pris en compte par cette version.

❖ *Dans la classification FAO (1988), i)* les sols de type Gypsisols et ceux d'accumulations salines (Solonchaks) ont été fidèlement représentés et ce, en se basant dans leur identification, sur des critères objectifs ayant permis de tenir compte de leur contexte pédologique (propriétés intrinsèques) et des facteurs du milieu (relief, présence de la nappe, etc.) ; *ii)* les sols dont le matériau minéral renferme des taux de calcaires nettement perceptibles, n'ont pas été rangés par cette classification, ni dans le type des sols "calcaire" à part entière, ni dans d'autres types de sols où ce caractère devrait être inclus en combinaison avec une caractéristique principale.

5.4. Classification actualisée des sols du Zab occidental

Les systèmes de classification des sols ont considérablement évolué. En effet, la 1^{ère} et la 2^{ème} édition de la WRB ont respectivement eu lieu en 1998 et 2006. La 3^{ème} édition de cette classification a été élaborée en (2015). Et c'est cette version de la WRB qui sera appliquée pour re-classifier ces sols. Ceci provient des amendements et ajouts qui ont été effectués par l'IUSS Working Group WRB (2015) à cette classification. Plusieurs nouveaux qualificatifs ont été proposés et validés pour expliciter certaines propriétés importantes des sols. Des règles précises ont été introduites dans l'utilisation de spécificateurs pour la définition des sous-qualificatifs.

Quant à la ST de Soil Survey Staff, elle a également connu des changements substantiels après la version de 1995. Dans sa 12^{ème} version, la classification des sols des régions arides a été profondément amendée ; les critères diagnostics ont été révisés et de nouvelles dénominations ont alors affecté les sous-ordres, les groupes et les grands groupes.

5.4.1. Classification selon la WRB (2015)

Dans son édition de 2015, la WRB a apporté des éléments nouveaux pour améliorer le système de classification des sols qui est adopté par l'UNESCO-FAO jusqu'à la fin des 1980. Ces éléments ont porté aussi bien sur la révision des règles de classification, l'introduction de nouveaux critères pour l'identification des horizons diagnostic, que la redéfinition des grands groupes de sols (RSG).

L'essai de reclassification des sols étudiés en 1991, selon cette nouvelle approche, a permis d'avoir un spectre d'examen assez large sur les propriétés diagnostiques des sols et même sur les types de sols. Le choix des qualificatifs principaux et secondaires, bien qu'il dépende de l'appréciation de l'auteur (pédologue), il aide à différencier les types de sols appartenant à un même RSG par l'intégration des aspects qui marquent les sols en fonction de leur prépondérance et de leurs degrés d'influence.

Les unités typologiques de sols qui ont été déterminées (tableau 23) sont regroupées en seulement 2 RSGs, à savoir, les Gypsisols qui représentent 67% des UTS et les Solonchaks qui occupent 1/3 des terrains de Ain Ben Noui et ses environs (fig. 9).

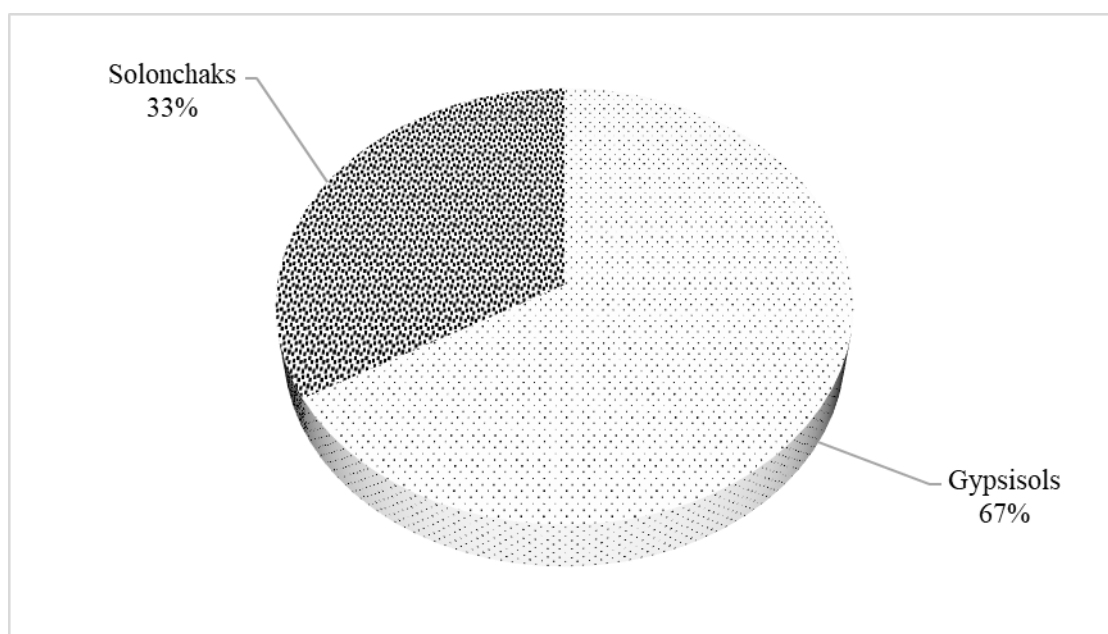


Figure 9 : Abondance relative des types de sols dans les Ziban (1991) selon la classification WRB (2015)

Au sein des Solonchaks, un seul type de sols a été trouvé, c'est celui présentant un horizon gypsic et/ calcic (P4, P6, P7 et P11). Tandis que les Gypsisols, ils sont subdivisés en deux grands types, l'un avec un qualificatif faisant état de la présence d'un horizon calcic (P1, P2 et P8), et l'autre, son qualificatif principal est Haplic (P3, P5, P9, P10 et P12). Les deux types de Gypsisols manifestent des accumulations de gypse notables ; le qualificatif secondaire "Hypergypsic" leur est commun.

Les unités typologiques représentatives qui ont été choisies sont les UTS 1 et 8 pour les Calcic Gypsisols (Hypergypsic) ; les UTS 3, 5 et 10 pour les Haplic Gypsisols (Hypergypsic) ; et les UTS 4, 6 et 11 pour les Solonchaks présentant un gypsic (P6) et calcic et gypsic combinés (P11).

D'autres différences peuvent émerger entre la typologie produite par les deux anciennes versions de la FAO-UNESCO et celle qui a été obtenue en utilisant la WRB (2015). Les

aspects décrivant l'hydromorphie dans bien de pédons, ne sont pas pris en compte dans la classification récente de ces sols ; ces aspects n'apparaissent même pas à travers des qualificatifs ou sous-qualificatifs.

Etant donné que les Gypsisols sont majoritaires, on remarque que la typologie de certains d'entre eux ne change pas grandement tels que dans les pédons 1, 2, 3, 5, 8, 9, 10, 11 et 12, c.-à-d., ils restent dans la catégorie des sols gypseux mais, ils prennent des qualificatifs "Episalic, Hypersalic, ou Endosalic" désignant le développement du phénomène de salinité dans ces sols (tableau 23).

Tableau 23 : Correspondances des types de sols selon la FAO-UNESCO (1974 et 1988) dans la WRB (2015) dans la région de Ain Ben Noui et ses environs

UTS/Pédon	Unités de sols selon FAO-UNESCO (1974 et 1988) et WRB (2015)	
	FAO 1974 et FAO 1988	WRB 2015
1	Gypsic Xérosols Hydromorphic Saline Gypsisols	Petrocalcic Gypsisols (Hypergypsic)
2	Gypsic Xérosols Typical Hydromorphic Gypsisols	Calcic/Petrocalcic Gypsisols (Hypergypsic)
3	Gypsic Xérosols Typical Hydromorphic Gypsisols	Haplic Gypsisols (Hypergypsic)
4	Calcic Xérosols Ordinary Saline Haplosols	Calcic /Petrocalcic Solonchaks (Gypsic)
5	Gypsic Xérosols Hydromorphic Saline Gypsisols	Haplic Gypsisols (Endosalic, Hypergypsic)
6	Gypsic Xérosols Hydromorphic Saline Gypsisols	Gypsic Solonchaks (Hypersalic)
7	Gypsic Xérosols Hydromorphic Saline Gypsisols	Gypsic Solonchaks (Episalic, Yermic)
8	Gypsic Xérosols Hydromorphic Typical Gypsisols	Calcic/Petrocalcic Gypsisols (Hypergypsic)
9	Gypsic Xérosols Typical Hydromorphic Gypsisols	Haplic Gypsisols (Hypergypsic)
10	Gypsic Xérosols Hydromorphic Saline Gypsisols	Haplic Gypsisols (Episalic ,Hypergypsic)
11	Gleyic Solonchaks Hydromorphic Saline Gypsisols	Calcic Gypsic Solonchaks (Hypersalic)
12	Gypsic Xérosols Hydromorphic Saline Gypsisols	Haplic Gypsisols (Episalic, Hypergypsic)

Nota : dans la ligne du haut, c'est la version 1974 de la FAO ; en bas, c'est la version 1988 de la FAO.

Il existe des Gypsisols (P6- et P7) qui sont devenus des Solonchaks dans la WRB (2015).

Par contre, le pédon 4 qui était un Calcic Xerosols (FAO, 1974) et Haplosols (FAO, 1988) a eu une équivalence dans les Petrocalcic Solonchaks de la WRB.

5.4.2. Classification selon la Soil Taxonomy de l'USDA (2014)

La mise en œuvre des critères de diagnostique appliqués par l'équipe de la SSS (Soil Survey System) de l'USDA (2014) a permis de dégager les correspondances des sols par rapport à la version de l'USDA (1975).

En effet, pour les mêmes caractéristiques des sols (descriptives et analytiques), on a constaté que la recherche d'horizons diagnostiques, a donné lieu à des horizons diagnostics similaires entre les deux versions pour plus de 2/3 des pédons. En se basant sur ce constat, il ressort que l'horizon diagnostique de subsurface " Petrogypsic " a été identifié dans les pédons 1, 2, 3, 7, 8, 9, 10, et 12. Pour le reste des pédons, l'horizon calcic a été rencontré dans le pédon 4.

Par contre, l'unité de sol représentée par le pédon 11, se caractérise par la salinité et la présence d'un horizon salic dans les deux versions du système de l'USDA (2014) ; cependant, après actualisation, les horizons calcic et gypsic ont pu être introduits.

La classification des sols de la région d'étude selon la 12^{ème} version de la Soil Taxonomy de l'USDA de 2014 montre une variabilité limitée de la typologie des sols. Le sous-groupe des Typic Petrogypsids est le type de sols qui occupe les $\frac{3}{4}$ des terrains étudiés, suivi des Haplosalids avec ses deux sous-groupes (Calcic Gypsic et Petrogypsids) et enfin, arrive le sous-groupe des Typic Haplocalcids (P4) qui dénote de la présence minoritaire des sols calcaires dans ces endroits des Ziban (fig.10).

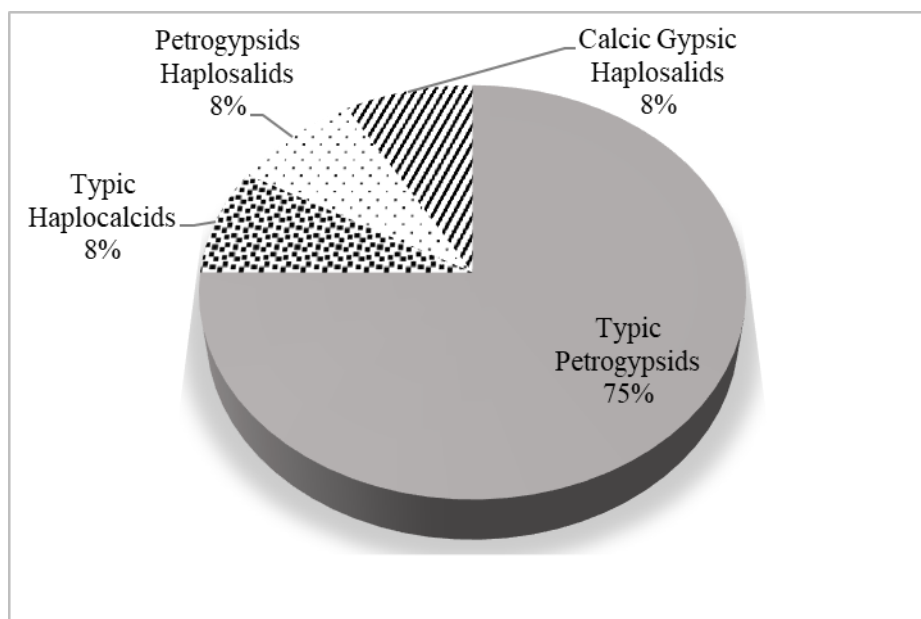


Figure 10 : Abondance relative des types de sols dans les Ziban (1991) selon la classification USDA (2014)

Ce que l'on doit retenir de l'actualisation de la classification des sols montre que des changements importants ont été apportés par la version récente de la Soil Taxonomy (tableau 24); les pédons 7, 8, 9, 10 et 12 qui étaient des Typic Gypsiorthids, avec un horizon gypsic, ils deviennent des Typic Petrogypsids.

Quant au pédon 6, qui avait simplement un horizon gypsic, on remarque que ses propriétés diagnostiques ont laissé apparaître deux horizons diagnostics, le petrogypsic et le salic en même temps.

Tableau 24 : Comparaison de la typologie de sols dans les versions de 1975 et de 2014 de la Soil Taxonomy de l'USDA.

UTS/ Pédon	Grand groupe (GG) ; 1975 et principaux horizons diagnostiques	Grand groupe (GG) ; 2014 et principaux horizons diagnostiques	Changement
1, 2, 3 et 5	Petrogypsic Gypsiorthids ; Petrogypsic	Typic Petrogypsids ; Petrogypsic	Aucun
7, 8, 9, 10 et 12	Typic Gypsiorthids ; Gypsic	Typic Petrogypsids ; Petrogypsic	Petrogypsic
4	Typic Calciorthids	Typic Haplocalids ; Calcic	Aucun
6	Typic Gypsiorthids ; Gypsic	Petrogypsic Haplosalids ; Petrogypsic, Salic	Petrogypsic et Salic
11	Aquollic Salorthids ; Salic	Calcic Gypsic Haplosalids ; Salic	Calcic et Gypsic

Note : SG : Sous-groupe

Ce pédon (P6) ne correspond plus à un sol gypseux (USDA, 1975), mais plutôt à un Haplosalids (USDA, 2014). Un autre changement notable a affecté la classification du pédon 11 qui est marqué par le processus de salinité ; on s'aperçoit qu'en plus de l'horizon salic (USDA, 1975), il combine deux autres caractéristiques en relation avec l'accumulation de gypse et la présence des carbonates que la ST a intégrés dans sa version de 2014.

6. Conclusion

L'aperçu qui a été donné sur l'état 'global' sur les sols de la région de Ain Ben Noui et ses environs a livré des informations importantes sur les propriétés des sols de cette région des Ziban, sur les processus de pédogénèse qui y prédominent ainsi que sur leur diversité.

La détermination de leur typologie en 1991 et la mise à jour qui leur est appliquée en utilisant les deux systèmes de classification des sols, à savoir la (WRB, 2015) et la Soil Taxonomy de l'USDA (2014), a apporté des précisions importantes sur leurs principales contraintes (problèmes de salinisation, croûtes gypseuse et ou calcaire, accumulation des eaux, etc.) ainsi que sur leur distribution dans le paysage de la région. La gamme des sols gypseux est la plus prépondérante, viennent ensuite les sols salés avec leurs différentes variantes dans les 2 systèmes de classification. La présence des sols calcaires est visiblement très ponctuelle, sinon dans la WRB (2105), il n'existe plus de Calcisols.

Le monitoring des changements d'usages et les changements affectant leurs propriétés et même leur typologie, aux termes des dynamiques liées à la gestion des agroécosystèmes, durant les 30 dernières années, est un volet qui est abordé dans les chapitres qui suivent.

Chapitre 2 : Dynamique des agroécosystèmes : incidences pédologique et agro-environnementale de 30 ans de mise en culture

1. Caractérisation physico-chimique des sols

Les principaux résultats analytiques sont présentés dans le tableau 25. Les valeurs de pH dans les sites étudiés sont variables et se situent entre 7,47 et 8,56. Ils indiquent que les sols sont généralement alcalins. Ce sont les oasis représentées par les profils 5 et 7 qui ont des valeurs d'enregistrement ≥ 8 . Quant à la salinité, on note qu'elle est également variable et oscille entre 1,50 (P9H3) et 30 dS·m⁻¹ en P5H1.

1.1. Caractérisation des sols des agroécosystèmes oasiens des Ziban, monitoring et typologie des sols

1.1.1. Caractérisation physico-chimique des sols

Les principaux résultats analytiques sont présentés dans le tableau 25.

1.1.1.1. Réaction des sols (pH)

Les valeurs de pH des sites étudiés sont variables et comprises entre 7,47 et 8,56. Elles indiquent que le sol est généralement alcalin. Ce sont les oasis des profils 5 et 7 qui ont une valeur de 8 ou plus. Le potassium, le soufre, le calcium et le magnésium sont plus disponibles à un pH plus élevé et les micronutriments sont plus disponibles à un pH plus faible (McCauley et al., 2017).

Le pH et le M.O. du sol affectent fortement la fonction du sol et la capacité des plantes à fournir des nutriments. Plus précisément, le pH affecte la solubilité et la disponibilité des nutriments des plantes, la performance des pesticides (y compris les herbicides) et la décomposition de la M.O (McCauley et al. 2017). Un pH élevé empêche le transfert du Fe ou du Zn vers les plantes, selon Alloway (2009) ; Hansen et al. (2006) cité par Moreno-Jiménez et al. (2022).

1.1.1.2. Salinité du sol mesurée sur un extrait dilué 1 :5

La salinité du sol peut être causée par des actions anthropogéniques comme l'utilisation d'eau riche en sel pour l'irrigation ou les effets négatifs d'une irrigation mal gérée dans les régions sèches, ou il peut s'agir d'un phénomène naturel. La salinité des champs peut être détectée par la présence de plantes halophytes, de croûtes blanches, d'un aspect huileux ou d'un manque de croissance des plantes. La conductivité électrique (CE) peut être utilisée pour calculer la salinité (FAO et ITPS, 2020).

Tableau 25 : Résultats de la caractérisation physico-chimique des sols dans le Zab occidental, region des Ziban

Pedons (P) / Horizons (H)		Caractéristiques chimiques des sols					Matière organique (MO) et texture des sols	
		Prof. (cm)	pH (eau)	CE (dS·m ⁻¹) A 25°C	CaCO ₃ (%)	Gypse (%)	MO (%)	Texture
P1	H1	0–30	7.67	5.35	13.26	32.71	0.53	SL
	H2	30–60	7.77	10.15	16.96	24.70	0.95	SL
P2	H1	0–30	7.77	2.55	8.26	33.91	1.16	SL
	H2	30–60	8.00	22.15	11.09	30.87	1.38	SCIL
	H3	60–120	7.475	19.49	11.30	33.20	0.85	SCIL
P3	H1	0–30	7.58	4.34	17.61	19.17	0.11	SL
	H2	30–60	7.72	8.74	24.35	43.63	0.42	SL
P4	H1	0–30	7.54	4.00	12.72	10.33	0.74	SL
	H2	30–60	7.51	17.29	13.26	10.16	2.01	SL
P5	H1	0–30	8.20	30.00	3.91	47.80	1.59	L
	H2	30–60	8.13	12.64	2.93	37.52	0.53	L
	H3	60–120	8.41	7.23	6.20	32.40	0.11	L
P6	H1	0–30	7.91	4.47	6.30	47.37	0.63	L
	H2	30–60	7.76	3.11	7.07	56.91	0.63	L
	H3	60–120	7.60	2.39	7.50	56.37	2.01	L
P7	H1	0–30	8.56	8.89	0.00	85.43	0.42	SCI
	H2	30–60	8.46	3.10	0.02	85.48	0.53	SCI
	H3	60–120	8.05	2.58	0.00	87.48	0.53	SCI
P8	H1	0–30	7.70	2.58	8.48	29.04	0.53	SL
	H2	30–60	7.60	2.25	9.78	10.60	0.32	SL
	H3	60–120	7.59	2.08	9.78	29.69	0.53	SL
P9	H1	0–30	7.52	4.44	14.24	17.76	1.80	SL
	H2	0–60	7.55	2.28	11.09	17.36	1.38	SL
	H3	60–120	7.55	15.39	15.43	4.28	1.80	SL
P10	H1	0–30	7.50	5.33	3.91	43.04	0.42	SCI
	H2	30–60	7.82	2.39	10.65	31.12	0.85	SCI
	H3	60–120	7.71	2.19	13.04	17.03	1.59	SCI

Note: SL = sandy loam, L = loam, SCI = sandy clay, SCIL = sandy clay loam.

En ce qui concerne la salinité, on note que la CE peut également varier et s'étendre de 2,08 (P8H3) à 30 dS.cm⁻¹ pour P5H1. Eu égard de l'échelle d'appréciation de la salinité de sols de

l'extrait dilué 1 :5 (tableau 26), on remarque que la salinité des sols des sites étudiés est peu variable et ses valeurs peuvent être réparties en deux grandes classes :

- ❖ Une classe comportant les horizons et profils avec un degré de salinité élevé ; cette classe représente 45 % des échantillons de sols et concerne les différents horizons des profils 2, 4, 6, 7, 9, 10 et tout le profil 8 qui est localisé à El Hadjeb.
- ❖ Une classe qui définit les oasis ayant des sols extrêmement salés ; cette classe concerne la majorité des échantillons. Cette salinité ($CE > 4 \text{ dS.m}^{-1}$) caractérise les différents niveaux des profils : 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9 et 10. Le profil 5 (Oasis d'Oumache) est entièrement dominé par une très forte salinité.

Tableau 26 : Normes d'interprétation de la salinité du sol pour un extrait dilué 1:5 (Durand, 1983)

Degree of Salinity	Electrical Conductivity (dS.m^{-1})
Sol non salé	$CE \leq 0.6$
Faiblement salé	$0.6 < CE \leq 1.0$
Modérément salé	$1 < CE \leq 2.0$
Sol fortement salé	$2 < CE \leq 4.0$
Sol extrêmement salé	$CE > 4$

Il faut noter que les oasis à faible salinité sont généralement des sites à très faible teneur en CaCO_3 associés à des dépôts de gypse sous forme de croûte.

Par ailleurs, le degré de salinité du sol peut être évalué en adoptant les normes d'interprétation relatives à l'extrait de pâte saturée (tableau 27).

Tableau 27 : Interpretation of the saturated paste soluble salts test (Dahnke and Whitney, 1988).

Degree of Salinity	Electrical Conductivity (dS.m^{-1})
Non-saline	0.0-2.0
Slightly Saline	2.1-4.0
Moderately Saline	4.1-8.0
Strongly Saline	8.1-16.0
Very Strongly Saline	>16.1 +

On note que dans P2H2 et P4H2, la CE est respectivement de 22 et 17 dS.m^{-1} malgré que l'échantillonnage ait été effectué en été (juin 2021) ; le même fait a été décrit par Hadj Miloud dans les sols du Bas-Chélif. Cet auteur a argué cela par le fait que le mouvement des sels n'est

pas toujours ascendant durant la saison sèche, mais cela diffère d'un sol à un autre et dépend du comportement salin de chaque sol.

Dans ces agroécosystèmes arides, le mouvement ascendant de l'eau et son évaporation de la surface du sol entraînent une accumulation de sels. Selon Foth (1990), l'eau a tendance à se déplacer aussi rapidement vers le haut du sol que vers le bas. Par ce fait, on peut expliquer l'augmentation des valeurs de la CE, en particulier, dans la plupart des horizons de surface et de subsurface. D'autre part, la salinité élevée de P5 est due à la présence d'une nappe d'eau proche de la surface.

La position topographique des oasis représentées par P2, P3, P4 et P5, situées dans des endroits qui font partie de la dépression, peut être un facteur de dégradation du sol par la salinisation secondaire et/ou par l'engorgement. De tels problèmes peuvent affecter la production de diverses cultures au sein de ces espaces agricoles ; le développement des palmiers dattiers et leur production peuvent également être compromis.

Selon (Foth. 1990), l'irrigation est majoritairement pratiquée dans des régions à faible pluviométrie, où le lessivage est minimal et où les sols irrigués ont tendance à accumuler les sels. Cette tendance à la salinisation secondaire du sol serait due, soit à la défectuosité du réseau de drainage, soit à l'absence de réseau de drainage. Ce problème a été également constaté à Zelfana (Ghardaia) par Benslama et al. (2020).

Le lessivage est une pratique qui peut être utilisée sur les sols sableux des sites oasiens étudiés pour éviter l'accumulation de sel dans la zone racinaire. Un risque de salinisation pourrait cependant survenir du fait de l'apport d'eau d'irrigation supérieur à l'évapotranspiration en raison des caractéristiques hydropédologiques de ces sols. Les oasis P2, P3, P4 et P5, sont, par contre, situées dans des sites peu favorables au drainage (topographie plane ou zone de dépression) ; l'intégration de la technique de lessivage dans la gestion de l'irrigation de ces oasis peut donc poser un sérieux problème, notamment si elle n'est pas pratiquée avec prudence. Autrement dit, le risque d'accumulation des sels peut augmenter à mesure que le surplus d'eau d'irrigation est apporté. En l'absence de drainage, les sels auront tendance à s'accumuler, dans un premier lieu, au niveau du sol lui-même (à l'échelle du profil), puis, la salinisation pourrait contaminer d'autres palmeraies. D'après Faci (2021), 95% des drains dans les oasis de Sidi Okba (Zab oriental) et Tolga (Zab occidental) sont presque inexistantes. Par ailleurs, l'irrigation par submersion qui est pratiquée par 67% des phoeniculteurs dans les Ziban, occasionne des pertes considérables en eau.

Junior et al. (2019) cités par Shaaban (2024) ont évoqué le rôle décisif que peuvent jouer le réseau du drainage, la forme du relief et la topographie sur le mouvement des sels dans les

sols et leur dissémination dans le paysage et leur accumulation précisément dans les zones de dépressions. Cela peut justifier pourquoi les pédon des sites oasiens d'Ourlal (P1 et P2), de M'lili au niveau du P4 et d'Oumache (P5), sont le siège d'une accumulation élevée en sels et ce, en comparaison avec les sites représentés par P6 à P10 qui, à leur tour, sont soumis à l'irrigation.

L'exemple le plus emblématique de l'impact des facteurs de l'environnement (topographie, nature des sols, qualité de l'eau d'irrigation) et l'activité anthropique dans l'exacerbation du problème de la salinisation secondaire, est la palmeraie de Bordj Ben Azouz dont une partie de son paysage ressemble à une cuvette (photo 1) ; la salinité (CE moyenne 1 :5) de l'eau de drainage ($9,46 \text{ dS.m}^{-1}$), selon Belghemmaz et al. (2018), est presque sept fois moins salée que celle des eaux de drainage déchargées dans cet environnement.



S. Belghemmaz et M. Hafidhi (2016)

Photo 1: Lac d'accumulation des eaux d'irrigation et de drainage à proximité des palmeraies de Bordj Ben Azouz (Tolga).

Par contre, l'eau "stagnante" de cette cuvette, avec une CE de 67 dS.m^{-1} , est 15 fois plus salée que celle de l'eau d'irrigation ($4,31 \text{ dS.m}^{-1}$). La salinité du sol dans cette dépression avoisine $9,16 \text{ dS.m}^{-1}$.

En outre, dans le site de Sidi Yahia (Oued Righ), Bakhti et al. (2024) ont mis en évidence une salinité d'eau d'irrigation plus élevée ($10,4 \text{ dS.m}^{-1}$) en comparaison avec celle utilisée pour irriguer les oasis de Bordj Ben Azouz (Tolga), mais, la salinité de l'eau de drainage ($26,2 \text{ dS.m}^{-1}$) est largement inférieure à celle de la zone d'accumulation des eaux excédentaires de la région d'étude.

D'après Khadraoui (2010), dans les sols où prédominent les phénomènes d'halomorphie et hydromorphie, la salinité en surface peut atteindre 50 dS.m^{-1} ; cet auteur attribue cette forte salinité à la dynamique des sels qui serait étroitement liée à la présence d'un plan d'eau qui

lui-même est soumis à l'absence de d'exutoire et aux conditions locales (géomorphologie et climat).

Pour élucider le mécanisme par lequel le processus d'hydromorphie s'est ponctuellement installé dans l'oasis de Bordj Ben Azouz (photo 2) et a donné naissance à des tâches de pseudo-gley, Roquero (1979) évoque deux formes sous lesquelles cela peut se produire : **i)** forme donnant lieu à la formation de d'un pseudogley résultant de propriétés intrinsèques du profil accompagnées d'autres conditions géomorphologiques, **ii)** et une forme qui favorise le développement d'un gley " authentique" dans lequel l'hydromorphisme est exacerbé par la géomorphologie, provoquant ainsi, une couche d'eau permanente dans la partie supérieure du profil.



S. Belghemmaz et M. Hafidhi (2016)

Photo 2 : Aspect blanchâtre du sol traduisant une accumulation excessive de sels (salant blanc). Site de Bordj Ben Azouz (Tolga)

Il paraît que les conditions hydropédologiques du milieu ne sont pas, a priori, toutes vérifiées pour qu'il y ait formation de "véritable" gley dans ce site oasien. Car, les variations saisonnières de l'humidité s'opposent à la création d'une nappe phréatique permanente. Mais, il est possible d'y avoir les pseudogleys soit, en raison de la profondeur très variable de la nappe phréatique, soit en raison de la présence d'eau stagnante due à une couche imperméable. Selon Khadraoui (2010), les sols à caractère hydromorphes qui sont inventoriés dans différentes régions du Sahara algérien, se localisent souvent dans les espaces et terrains irrigués. Ainsi, selon Shabbir et al. (2018), la gestion de la quantité importante d'eau de drainage de manière sûre et durable sans compromettre l'environnement est un défi majeur pour l'agriculture irriguée dans les conditions désertiques chaudes. L'utilisation inconsidérée de l'eau saline/saumâtre est trop souvent associée au développement de la salinité du sol, de la sodicité, de la toxicité ionique et de la pollution des eaux souterraines (Zaman et al. 2018).

La teneur excessive en sels du sol entraîne une accumulation d'ions toxiques, en particulier le sodium (Na^+) et le chlorure (Cl^-), qui perturbent la physiologie des plantes. Des niveaux élevés de Na^+ interrompent l'équilibre ionique essentiel et limitent l'absorption des éléments nutritifs, en particulier le magnésium (Mg^{2+}), le calcium (Ca^{2+}) et le potassium (K^+). Ce déséquilibre a un impact sur plusieurs processus physiologiques, tels que la régulation hormonale, la photosynthèse, l'activité enzymatique et le transport des nutriments, ce qui peut se traduire par la baisse des rendements des cultures (Karakas et al., 2020).

1.1.1.3. CaCO_3

La teneur de cet élément dans les sols varie d'un endroit à l'autre ; dans les profils P5, P6, P7 et P8, elle varie de faible à très faible, avec des valeurs médianes $<10\%$. Dans d'autres endroits, cependant, les profils sont modérément calcaires (tableau 25).

Les sols calcaires sont définis comme des sols contenant des quantités significatives de carbonate de calcium qui peuvent affecter distinctement les propriétés du sol liées à la croissance des plantes, qu'elles soient physiques, telles que les relations sol-eau, et l'encroûtement du sol, ou chimiques telles que la disponibilité des nutriments pour les plantes (Rasha, 2005) dans Taalab et al. (2019). Il est donc bien connu que les sols contenant de grandes quantités de CaCO_3 ont généralement un pH alcalin. Khalefa (2007) in Taalab et al. (2019) et singar et al. (2022) ont montré que les plantes sont confrontées à une faible disponibilité du phosphore et du potassium dans cette condition chimique, ce qui entraînera des problèmes plus graves que la carence. L'augmentation de la disponibilité de ces nutriments est l'un des objectifs importants de la nutrition des plantes.

1.1.1.4. Gypse

La teneur en gypse d'un sol est un critère pour les horizons gypseux et pétrogypseux et pour la classe minéralogique au niveau de la famille (Soil Survey Staff, 2014a).

Tous les profils de sol des oasis étudiées contiennent du gypse (tableau 25). A noter que la quasi-totalité des échantillons ont des teneurs $\geq 10\%$; et l'accumulation de cet élément devient excessive avec des taux $\geq 85\%$, notamment, dans le profil 7 où l'on observe la présence d'une croûte de gypse ; cette formation est localement nommée " Deb Deb ".

Selon Boyadgiev et al (1996), les sols gypseux se trouvent généralement sur des terrains plats ou vallonnés, ou dans des dépressions.

Le mécanisme par lequel le gypse peut affecter les propriétés du sol et influencer le comportement des cultures est la dissolution et la translocation de ses ions dans le sol ou d'un endroit à l'autre du paysage (Porta, 1998) dans Azizi et al. (2011). Le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

en quantités suffisantes peut affecter les propriétés du sol et causer des problèmes en termes de fertilité, de croissance des plantes et de production végétale (Peyman Azizi et al., 2011).

La précipitation et la dissolution du matériau parental est le principal mécanisme pédogénétique qui aurait conduit à la formation de gypse et à son accumulation dans ces sols à différents niveaux du paysage.

La teneur en gypse augmente avec la profondeur, atteint un maximum dans tous les pédons à environ (30-80 cm), et diminue à nouveau dans les parties inférieures des sols, ce qui suggère la lixiviation du gypse et la remontée capillaire pendant les périodes humides et sèches conduisant à l'élimination du gypse de la surface du sol et des horizons inférieurs ; cet élément se redépose dans les couches moyennes des pédons (Peyman Azizi et al., 2011).

Les sols contenant du gypse se comportent différemment des sols où les minéraux silicatés prédominent, et lorsque le gypse est le composant principal du sol, il contrôle son comportement (photo 3). Selon Peyman Azizi et al. (2011), le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) en quantités suffisantes affecte les propriétés du sol et cause plusieurs problèmes.

Ces problèmes surviennent lors de la gestion du sol et de l'eau, ce qui explique pourquoi les agriculteurs ont des difficultés à mettre en œuvre l'irrigation, la fertilisation, la plantation de palmiers dattiers et d'autres bonnes pratiques, ainsi qu'à lutter efficacement contre l'activité destructrice du vent. Toutes ces limitations peuvent refléter le risque de dégradation de ces systèmes oasiens.



Photo 3 : Oasis située au nord de Benthious (P6) ; le taux de gypse est élevé (47-56%), mais, la palmeraie est très bien portante.

Cependant, Diressen et al. (2001) ont mentionné l'impact du gypse sur les cultures, en notant que si de petites quantités de gypse ne nuisent pas aux plantes, des teneurs en gypse supérieures à 25%, typiques des sous-sols gypseux, perturbent l'équilibre des nutriments et

réduisent la disponibilité des nutriments essentiels aux plantes comme le phosphore, le potassium et le magnésium.

1.1.2. Faciès chimique des solutions du sol

Les solutions chimiques des sols des sites de la zone d'étude présentent généralement un faciès chimique hyper-chloruré calcique et hyper-sulfaté calcique (fig.11). Dans les palmeraies d'Oumache, Abdelhafid et al. (2019) ont constaté que l'eau du forage provenant de l'éocène inférieur, est d'un faciès sulfaté calcique et magnésien ; ceci revient à l'influence des formations calcaires et calcaires dolomitiques qui constituent l'aquifère de la nappe.

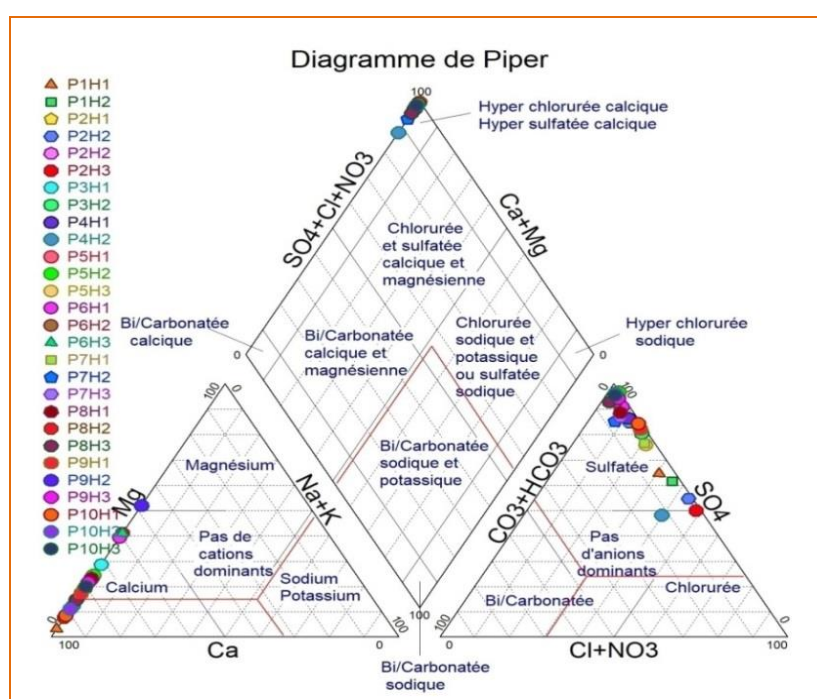


Figure 11: Diagramme de Piper du faciès chimique des solutions salines du sol dans le Zab occidental de la région des Ziban.

Le faciès salin de type chloruré-sulfaté a été décrit par Loyer et al. (1989) ; son origine d'après ses auteurs serait due au fait que les solutions chlorurées soient affectées par la présence de gypse d'origine sédimentaire dans le milieu, qui est redistribué par les eaux de nappes superficielle ou profonde.

La présence de sels en quantité suffisante confère aux écosystèmes arides, des caractéristiques particulières qui affectent les paysages de faciès typiques, influencent l'aspect du milieu édaphique, l'occupation des sols, et posent une problématique spécifique de mise en valeur agricole. Ces faciès salins ne sont pas figés, mais au contraire très évolutifs sous des influences naturelles, telle que la sécheresse qui impacte périodiquement ces milieux, ou bien

sous des influences anthropiques qui peuvent modifier encore plus rapidement ces manifestations salines (Loyer et al., 1992).

Dans la région Lagunera du Mexique, l'utilisation d'eaux de forage riches en sulfate et en sodium, orientée par faute de drainage, les fads des sols irrigués vers une forte salinité sulfatée sodique. L'utilisation d'eaux rééquilibrées en calcium grâce à des amendements locaux, devrait pouvoir réorienter ce faciès vers un type sulfaté calcique beaucoup moins nocif pour l'agriculture (Gondlez Barrios, 1986) in Loyer (1992).

❖ **Composition chimique de la solution du sol des Solonchaks et Gypsisols**

La solution du sol est susceptible d'être dominée par un anion ou cation ; la prépondérance d'un élément (cation ou anion) par rapport à d'autres peut induire des changements sur l'évolution du sol et se répercuter, particulièrement, sur son état structural.

Les pédologues français différencient les sols salins en fonction des cations dominants dans le sol, en particulier, le rapport entre les cations bivalents et monovalents (Duchaufour, 1988 ; Loyer et al., 1989). Pour apprécier ce risque, les pédologues français ont mis au point quelques rapports que l'on peut appliquer pour le cas des sols des Ziban :

Rapport $\frac{Cl}{SO_4}$: Plyusnin (1964) a utilisé ce rapport pour classer les sols salés. L'application de ce rapport à tous les sols de la région d'étude donne lieu à une composition chimique (tableau, annexe 2) à dominance de sulfates pour environ 51 % des échantillons de sol ($\frac{Cl}{SO_4} < 0,5$) ; ce faciès chimique est valable pour divers horizons de tous les pédons à l'exception de P1 et P5. Les sols dont la solution du sol est marquée par le faciès chloruré sulfaté ($0,5 < \frac{Cl}{SO_4} < 1$) caractérise à la fois les Solonchaks (P2, P4 et P5) et les Gypsisols (P1, P3, P9 et P10). Le faciès chimique de type sulfaté chloruré ($1 < \frac{Cl}{SO_4} < 5$) est caractéristique des pédons 1, 2, 4, 5 et 7 qui représentent les Solonchaks (P2, P4 et P5) et les Gypsisols avec encroûtement gypseux (P7H1).

1.1.3. Texture du sol et matière organique

Les sols des zones arides sont pauvres en M.O en raison de la faible couverture végétale, de la température élevée et de la texture grossière. La teneur en carbone organique des sols situés en dessous de l'isohyète de 300 mm de pluies varie entre 0,05 et 0,2 % dans les sols à texture grossière, 0,2 à 0,3 % dans les sols à texture moyenne et 0,3 à 0,4 % dans les sols à texture fine. L'analyse granulométrique des sols gypseux est particulièrement délicate à cause du risque de floculation des particules de sol. Néanmoins, le problème de floculation a pu être

évitée en adoptant la méthode de Vieillefont (1979). Différentes classes de texture de sols ont été ainsi déterminées (tableau 25).

La fraction des sables est la plus dominante dans ces sols ; les taux d'argile et des limons sont faibles et ne dépassent pas 30% ; elles sont même nulles dans les profils 4, 5, 6, 7 et dans les horizons supérieurs du profil 10. Ceci montre que les sites étudiés sont sujets à l'effet des vents, c'est pourquoi, ils contiennent d'importants dépôts de sable éolien.

En ce qui concerne le M.O., ses taux sont très faibles et restent largement <2%. Dans les sols des régions semi-arides et arides de Libye, Elaalem et al. (2021), parlent également de taux de M.O nettement bas. Driessem et al. (2001) attribuent cette pauvreté en M.O à au matériau du sol qui est dominé par le sable. Ces faibles quantités de M.O. peuvent aussi s'expliquer par la forte minéralisation que subissent les substances humiques dans ce contexte aride.

6.1. Signification de la texture du sol dans un matériau pédologique gypseux

Pour mieux apprécier la texture des sols de la région d'étude et lui donner une signification notamment, en termes de ses implications possibles, sur les comportements des sols vis-à-vis de la fertilité chimique, la rétention en eau, la structure, etc., on peut se référer à une méthode différente de celle de la Soil Taxonomy qui définit les classes texturales courantes des sols. Cette méthode est celle utilisée par Soil Survey Manual de l'USDA (2017) spécifiquement aux matériaux pédologiques gypseux (tableau annexe 3).

L'utilisation de cette méthode pour différencier les sites oasiens en fonction de leurs taux de gypse a permis de constater que la moitié des échantillons de sols sont composés de matériau gypseux riche *en limon sableux fin*. Ces échantillons ont des taux de gypse compris entre 15 et 40 %. Les pédons concernés par cette caractéristique sont répartis entre les 2 toposéquences comme suit :

- ❖ Sur la toposéquence 1, on trouve P1, P2 et les horizons P3H1, P5H2 et P5H3 ;
- ❖ Sur la toposéquence 2, on a le pédon 8 et les horizons P9H1, P9H2, P10H2 et P10H3.

Pour les matériaux pédologiques contenant 40 % ou plus, en poids de gypse dans la fraction de terre fine, le gypse domine les propriétés physiques et chimiques du sol au point que les classes granulométriques qui seront définies n'auront aucune signification. Deux termes sont utilisés à la place de celui de la texture :

i) Gypse grossier où 50 % ou plus de la fraction de terre fine est constituée de particules d'un diamètre compris entre 0,1 et 2,0 mm. **ii) Gypse fin** : Moins de 50 % de la fraction de terre fine est constituée de particules d'un diamètre compris entre 0,1 et 2,0 mm (Soil Survey Manual, 2017).

Pour ce type de matériaux de sols contenant des taux de gypse $\geq 40\%$, deux catégories de matériaux de sols peuvent être distingués en se basant sur la taille de leurs particules (tableau 28) ; à partir de chacune de ces catégories, on fait ressortir la texture correspondante.

❖ **Les sols avec un matériau de gypse fin riche en limon** : deux types de texture ont été identifiés, à savoir **i) la texture modérément limoneuse** qui représente près de la moitié des échantillons de sol et **ii) la texture équilibrée (medium texture)** qui caractérise environ 20 % des échantillons étudiés.

Les pédons et horizons dominés par une texture modérément limoneuse (SL) sont P1, P2H1, P3, P4, P8 et P9 (tableau 25). Tandis que les sols à texture équilibrée (L) sont représentés par P5 et 6 (tableau 25).

Tableau 28: Les pédons contenant un matériau gypseux riche en limon sableux fin

Matériau de sol gypseux riche en limon sableux fin	
Pédons/ horizon situés sur la toposéquence 1	Pédons/ horizon situés sur la toposéquence 2
P1; P2; P3H1; P5H2; P5H3	P8; P9H1; P9H2 P10H2 et P10H3

❖ **Matériau de sol argileux:** dans cette catégorie de matériau, on a pu déterminer la **texture fine** (SCI) dans les pédons et horizons suivants: P2H2 P2H3, P7 et P10. Ce type de texture couvre près de 1/3 des échantillons des sites étudiés.

Toutefois, on a curieusement remarqué qu'après application des critères de la Soil Survey Manual (2017) pour définir les types de textures des sols gypseux, la classe texturale grossière n'a pas été détectée dans les sites oasiens des deux toposéquences.

2. Fonctionnement des agroécosystèmes oasiens vs contraintes environnementales

2.1. Contraintes pédologiques

a- Salinité du sol

La salinité du sol est indirectement mesurée par la CE de la solution du sol ou d'un extrait de saturation du sol. La salinité indique l'aptitude du sol à la culture.

Lors de l'observation sur le terrain (P1, P2, P5, P8, et P10), en particulier pendant la saison sèche, l'accumulation de sel peut être directement détectée ; l'accumulation de sels peut être directement observée ; les efflorescences salines sont constituées de cristaux qui se répandent aussi bien, sur la surface des profils en formant parfois une mince croûte de sels (P5 et P2), ou

ils se répartissent à travers leurs différentes couches du sol. Compte tenu de ces manifestations salines et du $\text{pH} < 8,5$, il convient de qualifier de tels sols de '*white alkali soils*' qui ont été décrits par Brady (1984).

Les sels solubles remplissent les espaces et les canaux du sol (Gumuzzio et Casas, 1988); par conséquent, ils peuvent, influencer la production des unités structurales du sol, particulièrement, en régions arides (Brady, 1984).

Le métabolisme des cultures est affecté par la salinité du sol et l'érosion s'ensuit fréquemment. Les zones arides sont salinisées en raison d'une irrigation excessive et dans les endroits où les nappes phréatiques salines sont peu profondes (profil 5). Les concentrations élevées de sel dans la nappe phréatique ont été causées par le changement du niveau des eaux souterraines. L'élévation continue du niveau de la nappe phréatique a entraîné la salinisation du sol (Singh et al. 2018).

Cependant, les agriculteurs ont pu empêcher la salinisation excessive de ces oasis en utilisant de l'acide humique, notamment dans le cadre d'une irrigation excessive. Selon Singh et al. (2018), les anions et les cations peuvent être fixés par les acides humiques, puis éliminés des zones racinaires. D'autre part, la salinité du sol peut être atténuée en la préservant par la mise en place de plantes de couverture et qui peuvent survivre dans des conditions de salinité.

Dans certaines régions, les effets négatifs de la salinité et de la sodicité du sol seront probablement exacerbés par le changement climatique (FAO et ITPS 2021).

L'existence d'une nappe phréatique vraisemblablement salée à une faible profondeur, avec des niveaux élevés dans les ions, est liée à l'horizon salin du profil 5. Pendant les mois humides, cette nappe phréatique remonte à la surface, résolvant les sels et saturant le sol. Mais, dans le profil 3, il n'y a pas d'horizon salin développé de manière permanente, et la nappe phréatique ne se produit que de manière intermittente en raison des conditions humides.

Selon Shahid (2013), les principales répercussions de l'augmentation de la salinité du sol comprennent la perturbation de l'écosystème et la perte de biodiversité, ainsi qu'une augmentation de la menace d'érosion due à la régression de la végétation et à la dégradation de la structure du sol, une diminution des rendements des cultures et la désertification. En raison de l'extension de la salinisation secondaire, de nombreuses zones dégradées de la région des Ziban ont été abandonnées (photo 4).



Belghemmaz S. et Hafidhi M. (2016)

Photo 4 : palmeraie dégradée et laissée à l'abandon à cause du manque d'eau (Sud de Tolga)

b- Accumulation de gypse

Le minéral sulfaté le plus répandu dans les sols de la zone d'étude est le gypse, que l'on retrouve, notamment, dans les profils 2, 3, 6 et 7 où l'on a identifié des horizons gypsic et pétrogypsic. Cet élément est commun dans les régions arides et semi-arides et a une association significative avec le régime d'humidité du sol (Doner et Warren, 1989) dans Hashemi et al. (2011).

Les sols gypseux ont de multiples usages ; selon Herrero et Boixadera (2006) p798, ces sols étaient cultivés depuis fort longtemps dans de larges conditions climatiques et selon des pratiques de management durables. Mais, leur fertilité demeure une question préoccupante notamment dans le contexte d'une agriculture intensive.

D'après Herrero et Boixadera (2002) et Roulet (2011) cités par Biedermann et al. (2014), le gypse peut conférer aux sols certaines caractéristiques : une texture sableuse et une structure particulière, un pH élevé, un faible taux de M.O (< 1%), une solution du sol saturée par rapport à la calcite et un manque d'eau excessif pour les plantes. Les propriétés des sols du Ziban correspondent, globalement, à celles qui ont été décrites par ces auteurs ; le gypse en tant qu'un des constituants majeurs de ces sols, peut influencer leur évolution et imposer certaines restrictions quant à leur mise en culture. Il convient de préciser qu'une de ces limitations tient à la forme d'accumulation du gypse ; la croûte et l'encroûtement gypseux qui sont omniprésents dans le paysage du Zab occidental, constituent un fait pédologique tellement ordinaire dans la région, que les agriculteurs, de par le passé, ont su concevoir la solution technique qui les a aidés à conserver leurs palmeraies et à continuer à entretenir leurs oasis (Photos 5 (a) et 5 (b)).



Belghemmaz S. et Hafidhi M. (2016)

Photo 5 : (a) une partie du lit de Oued Djedi (tronçon sillonnant les oasis de Lioua) ; (b) coupe d'une berge de l'oued illustrant un matériau de sol enrichi par les colluvions de l'Oued Djedi



Belghemmaz S. et Hafidhi M. (2016)

Photo 6 : Profil de sol constitué d'une accumulation de gypse et de calcaire sous forme de croûte ; site de Lioua

Dans les oasis situées entre El Hadjeb et Tolga et ses environs, les formations gypseuses endurcies de type "Deb Deb" sont éliminées "mécaniquement" pour aménager les fosses de plantation de palmiers dattiers (Photo 6).

Selon Soil Survey Manual de l'USDA (2017), tous les différents types d'horizons B sont, ou étaient à l'origine, des horizons de subsurface. Les horizons B comprennent des horizons (cimentés ou non) présentant des concentrations illuviales de carbonates, de gypse ou de silice résultant de processus pédogénétiques. Mais, pour les sols la partie occidentale des Ziban, l'horizon B n'a pas été identifié. Néanmoins, on estime que le processus d'illuviation, bien qu'il soit limité dans cette zone aride, il pourrait contribuer à la formation d'horizons d'accumulation de gypse et/calcaire, particulièrement, dans les sites oasiens irrigués.

Les changements ne sont pas considérés comme pédogénétiques s'ils ne sont pas liés aux horizons sus-jacents. Certaines couches présentant des accumulations de silice, de carbonates, de gypse ou de sels plus solubles sont incluses dans les horizons C, même si elles sont cimentées. Cependant, si une couche cimentée s'est formée par des processus pédogénétiques plutôt que par des processus géologiques (par exemple, lithification), elle est considérée comme un horizon B.

c- Calcaire

En ce qui concerne les avantages du carbonate de calcium dans les sols salins, Visconti et de Paz (2012) ont rapporté que lorsque le calcium, le bicarbonate et/ou le sulfate sont suffisamment concentrés dans l'eau d'irrigation, la précipitation de la calcite et du gypse empêche la salinité de la solution du sol d'atteindre des valeurs nocives. Outre leur effet favorable sur la salinité, la calcite et le gypse ont également une influence positive sur l'équilibre cationique du sol.

La plupart des sols étudiés n'ont pas d'horizon diagnostique calcaire tel que défini par Soil Taxonomy (2014) et IUSS Working Group WRB (2014). Les taux de carbonate de calcium sont faibles à moyens ; ils dépassent rarement 20 %. Cependant, ces sols restent particulièrement riches en sels solubles et en gypse. Le CaCO_3 , même en faible quantité, peut provoquer des carences oligo-éléments ; Foth (1990) considère que cette déficience en Fe, Mn et Zn, est un aspect commun aux sols des régions arides qui sont calcaires et alcalins.

2.2. Contraintes climatiques : Effet du vent et accumulation de sable

Cette section s'intéresse à l'état actuel des accumulations de sable dues aux vents et à leur impact sur les agroécosystèmes oasiens des Ziban, plutôt qu'au problème de l'ensablement et à la dynamique des dunes. Haouchine (2010) rapporte que la vitesse annuelle la plus élevée, fréquemment atteinte en avril, est de 5,7 m/s et que la vitesse moyenne annuelle est d'environ 4,5 m/s. Les vents sirocco, avec une fréquence moyenne de 58 jours par an, dominent la zone sud-est de Biskra (région des Ziban). Jusqu'à 6,5 m/s, la vitesse du vent peut transporter les

poussières et les particules de sable fin ($\varnothing < 0,25$ mm ; les grains de sable d'un diamètre allant jusqu'à 1 mm sont soulevés à des vitesses de vent de 10 m/sec. A 20 m/sec, des particules de 4 à 5 mm peuvent également être emportées (Verheye, 2009).

Selon Borrelli et al. (2015), l'érosion éolienne se produit lorsque trois conditions sont réunies : **(1)** le vent est suffisamment fort, **(2)** la surface du sol est sensible, et **(3)** il y a peu ou pas de protection de la surface.



Belghemmaz S. et Hafidhi M. (2016)

Photo 7: 7(a) et 7(b): brise-vent construit à base de matériau inerte (branches mortes de palmiers); dans (b), le talus de soutènement érigé à partir sable dunaire pour renforcer la fixation de la barrière inerte (site de Lioua).

Secs et violents, les siroccos endommagent les pâturages et les cultures oasiennes. Pratiquement tous les sites étudiés présentent des sables éoliens importants. Ces accumulations sont de forme très variable et se concentrent dans les zones où des obstacles inertes (brise-vent inertes : photos 7 (a) et (b)) ou vivants sont présents.

Les amas de sable et les petites dunes que l'on trouve dans les oasis 9 et 10 sont typiques et témoignent de la puissance de ces vents (photos 8 (a) et (b)).



S. Belghemmaz (2021)

Photo 8: (a) voile de sable couvrant une partie du piedmont du Mont de Boughezal; 8(b) sols formés sur des dépôts éoliens (Site Ain Ben Noui: P10).

Selon Creswell et Martin (1998), les principaux effets du vent et des chaleurs extrêmes sont d'augmenter le taux d'évaporation de l'eau et donc d'accroître les effets de l'aridité. Les cultures peuvent subir des effets "mécaniques" dommageables causés par le vent.

Bien que le processus d'action du vent et de transport des matériaux soit clairement reconnu, il n'est pas évident de mesurer son impact dans les zones d'accumulation. De telles mesures sont plus efficaces dans le voisinage immédiat des zones de déflation, où l'épaisseur et le volume des dépôts de sable ou de loess peuvent être facilement déterminés (Dan and Yaalon, 1971) cités par (Willy H. Verheye, 2009).

3. Dynamique des agroécosystèmes et changements au niveau des sols

Traditionnellement, les études de formation et de développement des sols se sont concentrées sur les processus se produisant sur les échelles du siècle au millénaire (Walker & Syers, 1976). Cependant, il y a une conviction croissante de l'importance des changements qui apparaissent à des échelles de temps (sub-décadal changes) inférieures aux décennies et dont

l'origine serait, particulièrement, imputable aux changements d'utilisation des terres, à la pollution et aux facteurs climatiques (Varallyay, 1990) in Seaton et al. (2020).

Cette étude intervient, après 30 ans, dans un contexte se caractérisant par l'amplification de la fragilité des écosystèmes par les actions de mise en culture qui s'y sont intensifiées et qui continuent encore à affecter cette partie des Ziban.

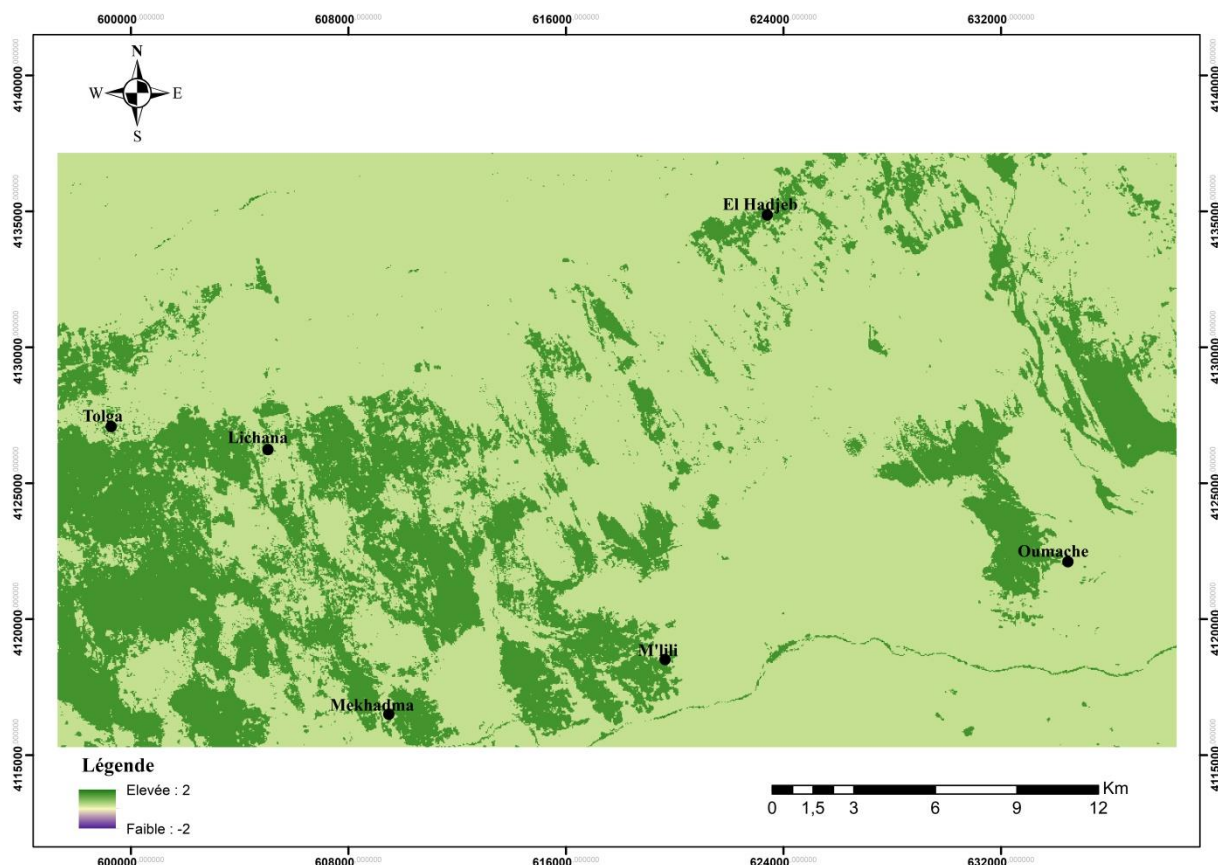


Figure 12 : Estimation de l'indice de végétation dans le Zab occidental (Ziban) en 1991.
Image Landsat 5 (1991)

D'après Richter Jr & Markewitz (2001) in Seaton et al. (2020) et Tugel et al. (2005) l'importance des changements qui affectent les sols et la détermination de la vitesse de ce changement font objet d'un avis largement partagé. Tandis que pour Schmidt et al. (2011) et selon Amundson et al. (2015), il serait plutôt important d'étudier l'impact potentiel de ce changement sur le fonctionnement du système terrestre.

Les images satellitaires multispectrales Landsat 5- 1991 (fig. 12) et Landsat 8 -2021 (fig. 13) qui ont été générées par Google Earth Engine en vue de l'estimation du changement de la végétation et le changement d'usage des terres, montrent que des changements apparents ont

eu lieu dans la région d'étude. En effet, le déclin de la végétation pourrait correspondre, particulièrement, à la régression des palmeraies dans différents secteurs du Zab occidental.

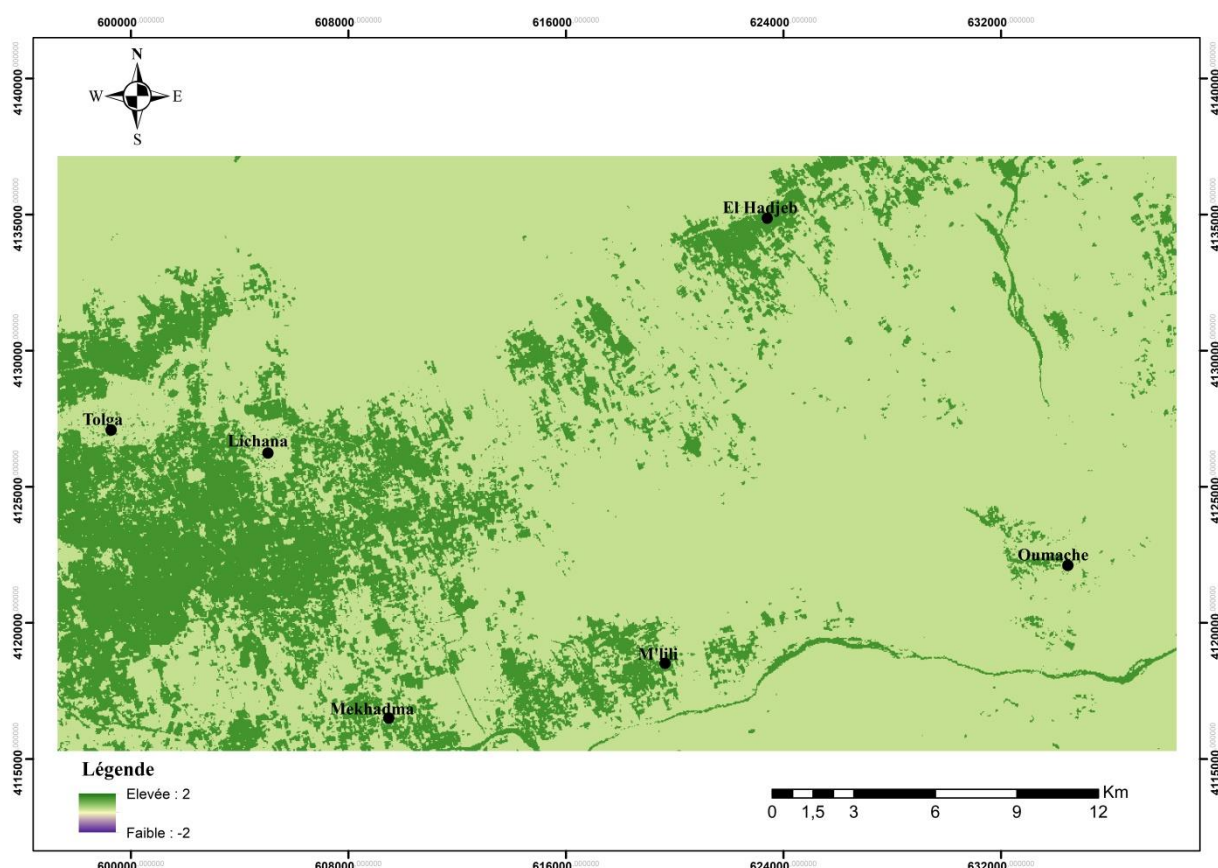


Figure 13 : Estimation de l'indice de végétation dans le Zab occidental (Ziban) en 2021.
Image Landsat 8 (2021)

Cette régression des oasis concerne le sud de Tolga et dans les sites de M'lili et à un degré nettement élevé les oasis d'Oumache (fig. 13). Le dépérissement des vergers oasiens pourrait être attribué au manque d'eau, le vieillissement des vergers ainsi qu'à la dégradation des conditions pédologiques de ces sites à cause de l'accroissement de la salinité des sols dans ces endroits. Ce problème qui menace les agroécosystèmes des Ziban a été également soulevé par Mihi, Tarai et Chenchouni (2017) ; Afrasinei et al. (2017) et Afrasinei et al. (2018).

Les agroécosystèmes oasiens situés au Zab occidental ont subi des dynamiques importantes en termes de changement de l'occupation du sol et de son usage. Il y a eu durant ces 30 dernières années une tendance à augmenter la surface agricole qui est orientée pour la culture du palmier dattier. Cette dynamique aurait été accompagnée par l'augmentation de la demande en eau d'irrigation dans cette région, la surexploitation des nappes peu profondes que Faci (2021) y a signalée, et par l'exacerbation du phénomène de salinisation secondaire à Oumache, M'lili et Ourlal.

Dans d'autres secteurs, l'indice de végétation qui a été révélé par l'image Landsat 8 (fig. 14) et celle estimant le changement d'usage des terres pour la période 1991 et 2021 (fig.), indiquent une augmentation des espaces couverts par la végétation ; il s'agit de nouveaux espaces oasiens qui ont été créés, plus précisément à El Hadjeb, à l'est de M'lili, nord Tolga et au sud de Lichana.

Dans la zone d'étude, il y a environ 11 508 hectares qui ont subi des modifications notables entre 1991 et 2021, en termes d'utilisation des terres ou de l'évolution du couvert végétal. Ces changements sont liés à deux types de transformation du paysage de cette partie des Ziban ; il y a d'une part, des surfaces agricoles entières qui sont devenues des sols dénudés, probablement, à cause de la dégradation des conditions de l'écosystème oasien. D'autre part, on peut noter les surfaces cultivées ont considérablement augmenté durant cette période ; l'expansion de l'agriculture dans le Zab occidental signifie le renforcement de la culture du palmier dattier. Cette tendance a été confirmée par l'analyse de Mihi et al. (2017) en utilisant Landsat Time-Series ; le constat de ces auteurs sur la période 1984- 2013 (30 ans) a fait état d'une évolution impressionnante de la surface des terres occupée par le palmier dattier pour arriver à environ 26 km². D'après les mêmes auteurs, ce changement s'est malheureusement opéré au détriment d'une surface équivalente de pâturage.

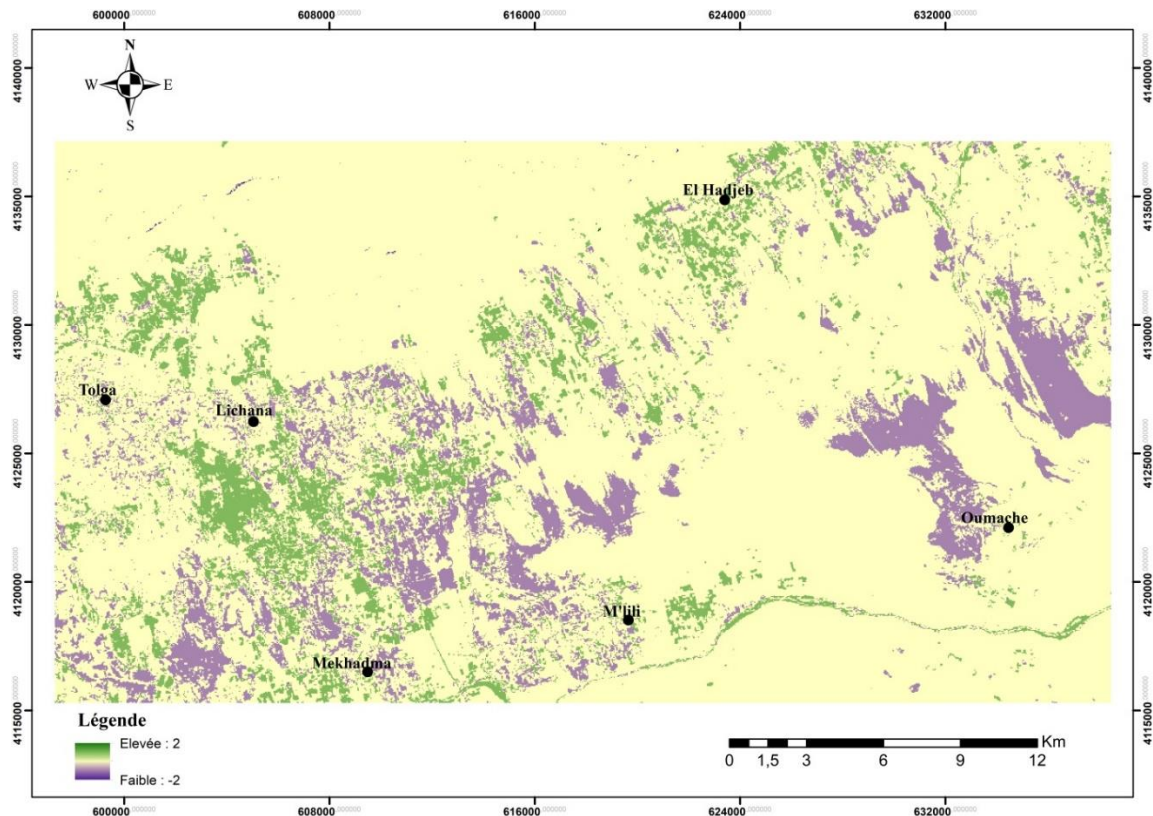


Figure 14 : Estimation du changement de l'indice de végétation dans le Zab occidental (Ziban) entre 1991 et 2021. Image Landsat 8 (2021)

Chapitre 3 : Utilisation de la télédétection et de l'approche conventionnelle pour l'évaluation de la dégradation des sols dans les agroécosystèmes oasiens des Ziban (Tolga)

1. Introduction et problématique des agroécosystèmes oasiens de Tolga

Dans la région saharienne, les agroécosystèmes oasiens représentent la meilleure pratique de gestion des terres caractérisées par de fortes contraintes géo-biophysiques. Une oasis, principalement constituée de plantations de palmiers dattiers, ne représente pas seulement un système de production d'aliments, mais aussi un écosystème vivant (Mihi et al., 2017 ; Liu et al. 2017). Selon Kessah (1995), une oasis est aussi un héritage culturel et socio-économique, donc, un patrimoine qui doit être préservé.

Les oasis sahariennes algériennes sont principalement situées dans des dépressions endoréiques (photo 9). En plus des températures élevées, des taux d'évapotranspiration (ETP) élevés et des faibles précipitations du climat typiquement attribué à ces écosystèmes, lorsqu'ils sont irrigués, leur fonctionnement hydrologique doit être bien équilibré, car aujourd'hui ils peuvent souffrir d'excès d'eau et d'engorgement (Idder et al. 2014).



S. Belghemmaz et M. Hafidhi (2016)

Photo 9 : Système oasien composé de culture sous-étages ; site de Lioua

2. Etat du problème et risque de son développement

Une anthropisation excessive, une gestion exigeante des pratiques agricoles et des conditions climatiques extrêmes peuvent conduire à la transformation des oasis en zones non productives.

L'avancée du sable et la salinisation du sol et de l'eau sont les deux principales menaces qui pèsent sur les oasis du Sahara algérien (Mihi et al., 2017 ; Afrasinei et al. 2017 ; Afrasinei et al. 2018). Ces menaces sont confirmées par d'autres études concernant l'utilisation de l'eau salée d'une oasis saharienne et également dans le sud de la Tunisie (Trabelsi et al. 2012 ; Macdonald et Davies 2000 ; Ghiglieri et al. 2013).

En Algérie, les recherches antérieures et actuelles se sont intéressées à certaines zones sahariennes où les ressources naturelles (eau, sol, flore et faune) ont été constamment exposées à une anthropisation excessive et à des conditions climatiques difficiles (Dubost, 1986 ; Boumaraf, 2013 ; Idder et al. 2014).

Ce travail est concentré aux oasis de Tolga qui sont situées dans la région de Biskra (nord-est de l'Algérie), plus précisément, dans une zone connue sous le nom de Zab occidentale (partie occidentale des Ziban). Des travaux précédents ont montré que certaines oasis sont sujettes à la maladie du palmier (Fusariose) tandis que d'autres souffrent du manque d'eau d'irrigation ou ont des problèmes d'engorgement et de salinisation (Mihi, Tarai, et Chenchouni 2017).

L'accumulation des sels dans le sol de l'oasis (salinisation secondaire) peut provenir des eaux d'irrigation qui sont souvent salines, d'une ETP élevée, d'infiltrations et d'un mauvais réseau de drainage (Daoud et Halitim 1994 ; Yahiaoui et al. 2015 ; G. I. Metternicht et Zinck 2003 ; G. Metternicht et Zinck 2008). L'utilisation des engrais à mauvais escient, peut déposer dans le sol des quantités supplémentaires de sels.

Malgré que des travaux aient porté sur ces menaces majeures des oasis des Ziban, mais le problème nécessite encore d'être mieux élucidé et ce, afin d'essayer de comprendre l'impact de ces risques sur le fonctionnement hydro-pédologique de l'agroécosystème d'oasis.

3. Approches d'évaluation de l'état de dégradation des oasis

Les données et les techniques de télédétection (fig. 15) combinées aux méthodes analytiques et statistiques appliquées aux échantillons de sol et d'eau sont utilisées dans cette étude pour essayer d'évaluer de façon efficace et l'état actuel de la dégradation de ces oasis.

L'évaluation de l'état du problème de salinisation du sol et de l'eau dans trois oasis différentes dans la région de Tolga, est un objectif essentiel de cette étude.

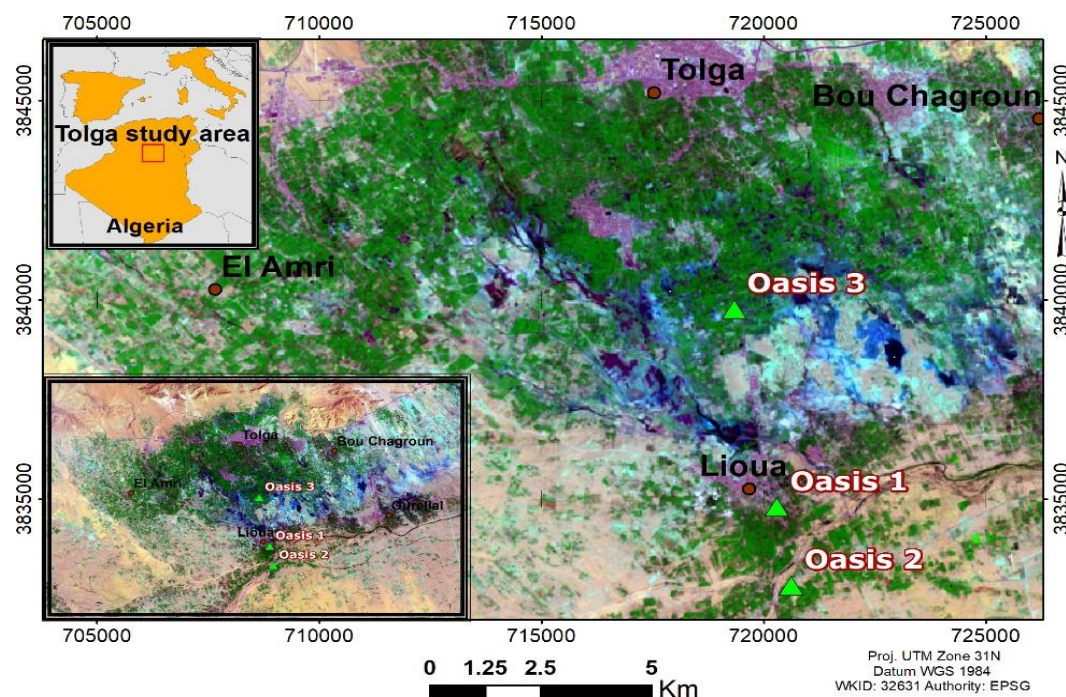


Figure 15 : Localisation géographique des profils d'échantillonnage dans les trois oasis. Composite fausses couleurs 752 de la scène Landsat 8 du 19 avril 2016. Les zones salines et hydrosalines (petites zones de sebkha et de daya) sont visibles dans les teintes cyan (bleu-vert) et bleu - bleu foncé.

3.1. Caractéristiques des sites oasiens étudiés

Le travail de prospection de terrain a eu lieu en avril 2016 et a été accompagné de description, in situ, des caractéristiques des trois oasis (tableau 29).

Tableau 29 : Principaux aspects physiographiques et pédologiques des 3 oasis

Nom et Situation du site	Aspects majeurs de l'oasis et traits pédologiques essentiels	Données générales sur les eaux. Salinité mesurée in situ
Oasis 1 Lioua	Palmeraie dégradée ; absence d'eau d'irrigation ; manifestations salines visibles dans certains vergers du site ; pente faible ; végétation halophyte abondante	Forage à 100 m ; salinité du drain principal 3,3 g/l
Oasis 2 Lioua sud-est (Sur la rive nord de l'Oued Djedi) 34°36'49 " N 5°24'23" E	Bon état des vergers situés dans l'environnement immédiat du forage 1 ; présence de croûte gypso-calcaire "Deb Deb" sur plus de 2 m de profondeur ; les cultures associées au palmier en sous étages (proches du forage 2) sont épanouies ; à l'est de de cette oasis, présence d'une végétation naturelle halophyte peu abondante	Eau du forage 1 : salinité 1,9 g/l à 25 °c ; Forage à une profondeur >200 m ; eau du forage 2 (34°37'15 " N 5°24'10" E) : salinité 2,2 g/l à 25 °c, prof. 150 m. (près de l'Oued Djedi)
Oasis 3 Sud BBA 34°40'35" N 5°23'39" E	Nouvelles plantations de palmier dattier littéralement dégradée ; pente presque nulle ; présence de "gley/pseudogley" et de tâches ocres sur la face des horizons ; aspect d'hydromorphie dominant (lac)	Eau de drainage chargée en sels (> 10 g/l)

BBA : Bordj Ben Azouz

3.2. DT Classifier

Selon (Afrasinei et al. 2017 ; G M Afrasinei et al. 2018), onze indices spectraux ont été appliqués et les seuils ont été calculés en utilisant les valeurs moyennes et d'écart-type de chaque indice d'image.

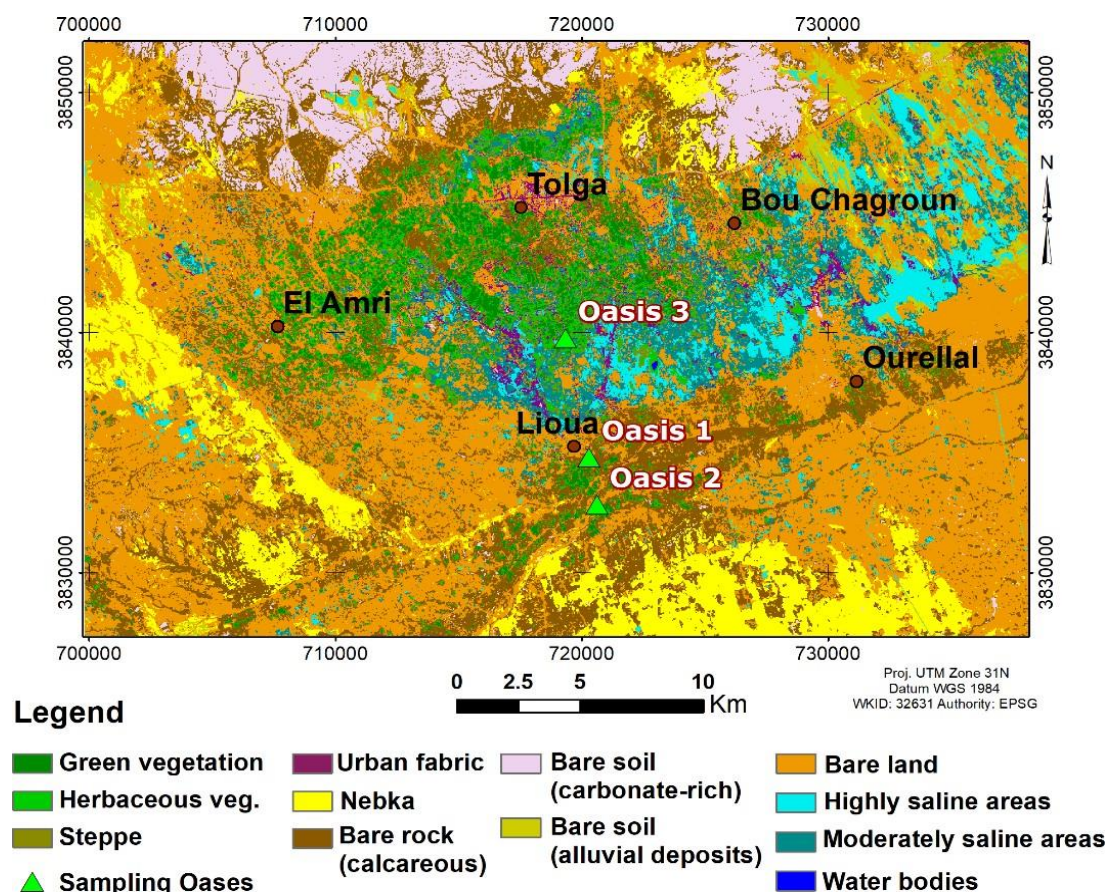


Figure 16: Classification par arbre de décision de l'image Landsat du 19 avril 2016 (Biskra)

Ces indices ont été particulièrement conçus pour faire face aux problèmes de confusion spectrale donnés par l'extraction d'éléments désertiques hautement réfléchissants et d'éléments d'occupation du sol des zones arides.

Les douze classes extraites sont présentées dans la figure 16 et leur description suit celle proposée par (Afrasinei et al. 2017).

Pourtant de nombreuses études ont prouvé que la télédétection est plus efficace que les méthodes traditionnelles pour la cartographie de la salinité des sols, Fatholouloumi et al. (2020) in Ding et al. (2020) et Fathizad et al. (2020) cités par Ding et al (2020), ont précisé qu'il reste encore des limites pour atteindre une cartographie de précision élevée pour ce problème.

3.3. Caractérisation chimique du sol et de l'eau

Les résultats analytiques obtenus pour les trois oasis sont résumés dans le tableau 30. En général, on remarque que le pH du sol est alcalin. En outre, selon l'échelle de salinité des sols établie par Mathieu et Pieltain (2003), les échantillons de sols peuvent être considérés comme salés. D'après les normes de Baize (2006) relatives à l'interprétation des taux du CaCO_3 de des sols, on constate que les échantillons prélevés dans les oasis sont faiblement à modérément calcaires.

En ce qui concerne les échantillons d'eau, nous pouvons observer que le pH est alcalin. En ce qui concerne la salinité, et d'après Ayers et Westcot (1985), ces eaux sont dans la classe 5 ; elles ne sont pas adéquates pour l'irrigation. Cependant, des marques de salinité élevée (aspect blanchâtre du sol dominé par les cristaux de sels) apparaissent de part et d'autre du fossé de drainage (Oasis 2) ; cet aspect indiquant une salinité excessive du milieu, envahit également la zone de décharge des eaux de drainage (près de l'Oasis 3).

Tableau 30 : Caractérisation chimique des sols et des eaux

Nature et origine des échantillons	Paramètres des sols				Paramètres de l'eau	
	Prof. (cm)	pH (eau)	CE _{1:5} (dS/m) à 25 °C	CaCO ₃ (%)	pH	CE (dS/m) à 25°C
Oasis 1 (Sols et eau de la nappe profonde)	0-20	8,18	1.95	4.57	7.48	4.16
	20-50	8.12	2.23	14.15		
	>50	7.96	2.79	4.63		
Oasis 2 (Sol et eau de la fosse de drainage)	0-20	7.94	2.03	0.007	8.11	9.46
	20-50	7.80	2.10	2		
	>50	8.11	2.02	9.01		
Oasis 3 (Sol et eau issues de la zone d'accumulation des eaux de drainage)	0-20	8.48	8.30	9.40	8.94	67.16
	20-50	8.26	8.76	15.80		
	> 50	8.48	10.98	16.1		

3.3.1. Comparaison des caractéristiques du sol des trois oasis

L'analyse ANOVA utilisant les profils de sol comme facteur, montre une différence significative pour les caractéristiques du sol pH et CE entre les trois oasis ; cependant, il n'y a

pas de différence significative pour le CaCO_3 entre les trois oasis. Le résultat de la comparaison du pH (1:5) et de la CE (1:5) du sol entre les trois profils de sols échantillonnés dans les trois oasis est présenté dans le tableau 31.

Tableau 31 : Comparaison du pH et de la CE du sol dans les 3 oasis

Paramètres du sol	Prof. (cm)	Oasis 1	Oasis2	Oasis3
pH_(1:5)	0-20	8.18	7.94	8.48
	20-50	8.12	7.8	8.26
	>50	7.96	8.11	8.48
	Moyenne	8.08	7.95	8.40
	HSD 0.05	0.33		
CE_(1:5) (dS/m) à 25°C				
0-20		1.95	2.03	8.3
20-50		2.23	2.1	8.76
> 50		7.96	2.02	10.98
Moyenne		2.32	2.05	9.34
	HSD0.05	2.15		

Prof. : Profondeur

Le résultat de la comparaison du pH du sol à trois profondeurs en utilisant le test de Tukey HSD0.05 entre les oasis 1 et 2 et entre 1 et 3, ne montre pas de différence statistiquement significative. Cependant, il y a une différence statistiquement significative pour le pH du sol entre l'oasis 2 et l'oasis 3 (tableau 31).

En ce qui concerne les paramètres CE, la comparaison du test de Tukey ne révèle pas de différence statistique entre les oasis 1 et 2. Cependant, il existe une différence statistiquement significative entre les oasis 1 et 3 et 2 et 3 (tableau 31).

3.3.2. Comparaison de l'alcalinité et de la salinité des eaux

La comparaison de la moyenne des paramètres CE et pH des eaux des trois endroits présentés dans le tableau 32. Pour l'alcalinité de l'eau, il existe une différence statistiquement significative entre les trois origines de l'eau à un niveau de signification de 5 %. En ce qui concerne la salinité de l'eau, il existe une différence statistiquement significative entre les eaux de drainage et les eaux souterraines (forage), d'une part, et les eaux de drainage qui va à la zone d'accumulation (lac), d'autre part, à un niveau de signification de 5 %.

Tableau 32 : Résultats de la comparaison entre les échantillons d'eau en fonction de leurs origines

Paramètres de l'eau		Eau des drains	Nappe profonde	Zone d'accumulation des eaux de drainage
pH	R1*	8,89	8,05	7,36
	R2	8,95	8,12	7,5
	R3	9	8,16	7,59
	Moyenne	8.94	8.11	7.48
	HSD 0.05	0.20		
CE _(1:5) (dS/m)	R1	10.89	2.7	69.4
	R2	6.91	5.12	68.3
	R3	10.6	5.13	63.8
	Moyenne	9.46	4.31	67.16
	HSD 0.05	5.69		

*R1, R2 et R3 représentent les répétitions : 1, 2 et 3.

3.3.3. Evaluation de l'état de dégradation dans les trois oasis

Cet aspect est discuté en fonction des caractéristiques hydro-pédologiques et du fonctionnement du réseau de drainage. Les résultats du taux en CaCO₃ des sols des trois oasis ne montrent pas de différence significative. Ce résultat est en accord avec les résultats de (Mostephaoui et al., 2013). En effet, ces auteurs ont identifié, dans cette région, la présence de l'encroûtement gypseux comme la principale caractéristique pédologique de ces sols. L'état de dégradation de ces trois oasis sera discuté en se basant sur les valeurs des paramètres pH et CE et également sur d'autres aspects de terrain, notamment, sur la présence visuelle de certaines formes d'accumulation de gypse (cristaux, croûtes et encroûtement).

a) Oasis 1 : palmeraies de Lioua

Les valeurs de pH du sol ont montré que le gradient d'alcalinité décroît du haut vers le bas du profil du sol. La même tendance se dégage pour la salinité du sol (salinisation ascendante).

En ce qui concerne les eaux souterraines, malgré leur qualité chimique inappropriée en termes de salinité, les agriculteurs peuvent encore les utiliser en raison de la texture du sol (principalement sableuse et naturellement favorable au drainage). De plus, les drains dans cette oasis sont fonctionnels ; l'élimination des eaux d'irrigation chargées en sels, en dehors de l'espace cultivé, constitue une condition favorable pour le développement des cultures oasiennes.

b) Oasis 2 : sud-est de Lioua (palmeraie située sur la rive nord de l'oued Djedi)

La principale caractéristique pédologique de cette oasis est la présence d'un encroûtement de gypse appelé 'Deb Deb' à plus de 2 mètres de profondeur du sol (photo 5). Le pH et la CE ne sont pas très élevés et sont presque constants dans le profil du sol. Ceci semble être en accord avec les résultats rapportés par (Mostephaoui et al., 2013 ; Sedrati 2011 ; Hiouani et Bensaid, 2009), et justifie la spécificité pédologique de ces sols consistant en la présence d'accumulation de gypse. En effet, la seule contrainte dans cette oasis est la présence d'un encroûtement gypseux qui nécessite des opérations spécifiques pour la plantation de nouveaux palmiers dattiers (photo 6).

c) Oasis 3 : sud des palmeraies de Bordj Ben Azouz

Dans cette Oasis (photos 1 et 2), la salinité du sol est élevée avec un profil salin descendant (maximum de salinité en profondeur). De point de vue morphologique, on a remarqué la présence d'efflorescences salines dans certains endroits ; cet aspect de salinité a été également mis en évidence par Mihi et al. (2017) dans une oasis située au sud de Biskra.

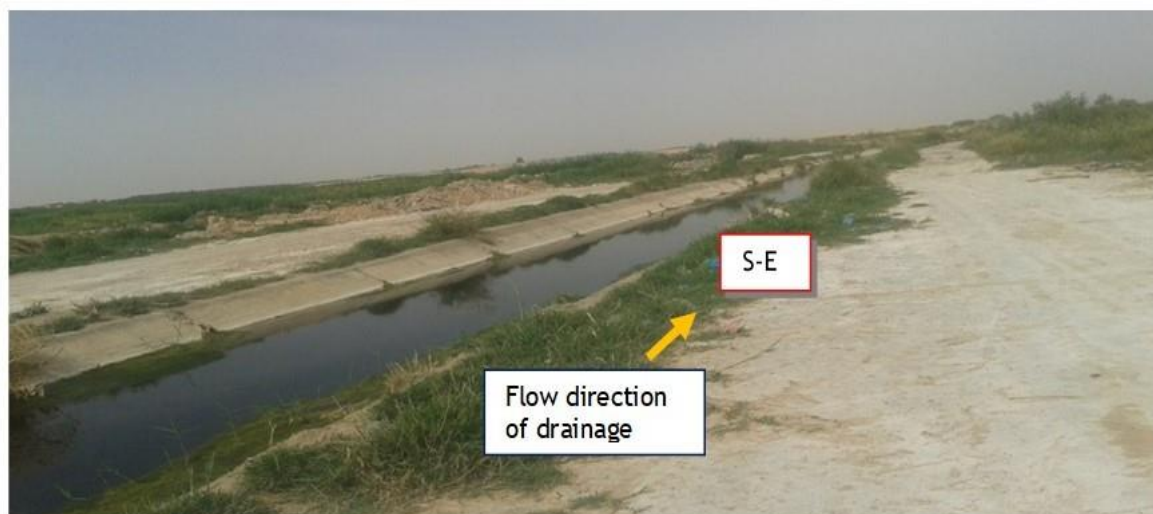
On pense qu'au vu de ces résultats et des données d'observation, le phénomène de salinisation dans l'oasis compromet gravement la croissance du palmier dattier. A ce titre, (Dubost 1991) a constaté que les palmiers dattiers pouvaient souffrir de la présence de la nappe phréatique à une profondeur inférieure à 12 mètres. Ceci suggère que le réseau de drainage doit bien fonctionner ; malheureusement, l'état du réseau de drainage dans cette oasis est médiocre.

Il est à rappeler que l'oasis 3 est située à proximité du point où s'accumulent les eaux de drainage des oasis avoisinantes. La salinité de l'eau est presque sept fois plus élevée que celle des fossés de drainage (Oasis 2). Cette eau a également une alcalinité sévère ; étant largement $>8,5$, le pH est très alcalin. Cette eau est de mauvaise qualité ; le risque de dégradation des sols dans cette oasis peut être prévisible. Dans leur étude menée en Tunisie dans une oasis moderne, (Askri et Bouhlila, 2010) ont trouvé que la CE de l'eau de drainage entre 11,8 et 18,7 dS/m peut induire, en plus de la salinisation du sol, une alcalinisation du sol à proximité d'une zone des eaux de drainage.

Pour ce qui est des efflorescences salines fréquentes qui apparaissent à la surface du sol dans cette oasis, cela peut prouver que les pratiques de lessivage et de drainage sont totalement défaillantes. Le même problème a été observé en Tunisie par (Hatira et al., 2007) et a été expliqué par le fait qu'en raison de l'absence de lixiviation, les sels n'atteignent pas les canaux de drainage pour être évacués vers l'exutoire.

Par ailleurs, la présence d'efflorescences salines est également cohérente avec l'analyse spectrale et la classification DT, puisque l'Oasis 3 couvre la classe 'zones fortement salines', ayant une grande étendue dans le secteur environnant (Fig. 1 et 2), sur un rayon d'au moins 5 km. Cependant, elle diminue vers le sud et, finalement, elle n'apparaît pas (ou du moins elle n'est pas détectable superficiellement par le capteur) à proximité des emplacements de l'Oasis 1 (dans un rayon de 1 km) et de l'Oasis 2 (dans un rayon de 2,5 km).

Enfin, un fait qui a particulièrement marqué l'agriculture oasienne dans la région de Tolga et qui a retenu notre attention, est le développement intensif de la plasticulture observé sur le terrain. Kebibeche (2013) et Afrasinei (2017) ont également souligné cette tendance dans leurs travaux. Cette nouvelle façon de cultiver les sols a systématiquement conduit à un changement dans l'occupation du sol, l'utilisation des terres, la gestion de l'eau et du sol et a inévitablement affecté l'environnement oasien. Dans ce contexte, nous avons remarqué plusieurs oasis composées uniquement de palmiers dattiers qui ont été abandonnées par les agriculteurs ; par contre, d'autres oasis, ne souffrent apparemment d'aucune restriction dans leur fonctionnement.



Belghemmaz S. et Hafidhi M. (2016)

Photo 10 : Bon fonctionnement du drain (oasis 2). Il n'y a pas de risque de dégradation des palmeraies.

Cette situation de l'environnement oasien (aridité et conditions salines), la gestion et les moyens (techniques, humains et financiers) que les agriculteurs utilisent peuvent être un facteur déterminant pour l'évolution de ces agroécosystèmes de manière durable.



Belghemmaz S. et Hafidhi M. (2016)

Photo 11: Fossés de drainage infestés par la végétation (oasis 3). Elle montre le problème de l'engorgement dû à un drainage insuffisant ou défectueux. Ici, la salinité est excessive et l'alcalinité est élevée.

4. Conclusion

La cartographie de l'occupation du sol par télédétection et la détermination de la salinité de l'eau et du sol de trois oasis différentes qui font partie des palmeraies de la région des Ziban (Tolga), Biskra, ont montré que la salinisation est le problème majeur de ces oasis.

L'analyse de l'image satellitaire (Landsat du 19 avril 2016), le travail de terrain (prospection observation et description) et les analyses des échantillons de sols et de l'eau qui ont, notamment, porté sur le pH et la CE, ont permis d'avoir des résultats préliminaires, mais importants, sur le degré de salinisation et l'état de dégradation des sols. D'après les normes de Durand (1983), le sol est, en général, fortement salé (oasis 1 et 2) ; il est extrêmement salé dans l'oasis 3 (sud de Bordj Ben Azouz) et le pH est très alcalin, surtout dans l'oasis 3. Ceci révèle que la salinisation et le risque d'alcalinisation peuvent mettre en danger la durabilité de ces palmeraies.

La dégradation des sols de ces agroécosystèmes a des raisons diverses ; les raisons les plus directement liées à cette dégradation sont la qualité de l'eau d'irrigation et les pratiques de gestion (irrigation et drainage). Les causes indirectes sont celles liées à l'augmentation des surfaces consacrées à la culture du palmier dattier dans cette région. Cela a forcément induit un accroissement de la salinisation secondaire, du moins, dans les sites étudiés.

Chapitre 4 : Typologie des sols dans les agroécosystèmes des Ziban

La détermination de la typologie des sols a été réalisée en utilisant les systèmes de classification des sols de l'IUSS Working Group de la WRB (2015) et celui de la Soil Taxonomy de l'USDA (2014). La typologie des sols qui a été produite, selon les deux systèmes, a été comparée et ce, à l'effet d'essayer de trouver des corrélations entre les principaux types de sols, notamment, en termes de leurs correspondances les uns aux autres. Eu égard de la complexité du milieu pédologique –typiquement oasien- de la partie occidentale de la région des Ziban dû, d'une part, à la présence de sels et d'autre part, à l'évolution de leurs propriétés, particulièrement, dans un contexte de surexploitation, il a été intéressant de faire le point sur la compatibilité des deux systèmes à décrire ces sols avec une assez grande pertinence,

1. Classification des sols selon WRB-IUSS (2015)

L'étude de la typologie des ressources en sols des agroécosystèmes oasiens des Ziban, selon le système de classification de la WRB (2015), a permis d'observer une variabilité spatiale de la pédodiversité. Trois Groupes de Sols de Référence (RSG) y ont été trouvés ; les Arenosols, les Gypsisols et les Solonchaks. Le nom complet de chaque type de sol a été mentionné (tableau 33) après avoir pris en ligne de compte les caractéristiques descriptives des sols, en particulier la morphologie (structure et couleur) et leurs résultats analytiques des paramètres ayant été déterminés au cours de leur caractérisation physico-chimiques (tableau 25). La détermination des horizons diagnostics était une étape décisive pour la détermination des RSG.

Tableau 33 : Typologie des sols des Ziban selon la WRB (2015)

Pédons	Unités typologiques de sols selon WRB (2015)
1	Haplic Gypsisols (Hypogypsic, Protocalcic, Protosalic, Yermic)
2	Gypsic Solonchaks (Calcaric)
3	Calcic/PetrocalcicGypsisols (Protosalic, Yermic /Aridic)
4	Gypsic Solonchaks (Calcaric)
5	Gypsic Solonchaks (Hypersalic)
6	Haplic Gypsisols (Hypergypsic, Protosalic, Yermic)
7	HaplicGypsisols (Hypergypsic, Dolomitic/Calcaric)
8	Haplic Gypsisols (Hypogypsic, Protocalcic, Yermic)
9	Haplic Gypsisols (Arenic, Endosalic, Hypogypsic, Protocalcic)
10	Haplic Gypsisols (Arenic, Protocalcic, Protosalic)

En effet, le résultat de la classification WRB (2015) et USDA (2014) ont été mis côte à côte dans le tableau juste pour mettre en évidence les correspondances des types de sols qui pourraient être obtenues en utilisant les deux systèmes.

1.1. RSG des Solonchaks

De tels sols ont été observés au niveau des sites de la toposéquence qui fait partie du bassin versant de l'Oued Djedi. Ils sont caractérisés par une accumulation variable de sels solubles. Les pédons (2, 4 et 5) de ces sites oasiens présentent des caractéristiques qui permettent de satisfaire les critères requis pour déterminer d'une part, un horizon diagnostique de surface de type ochric et, d'autre part, des horizons diagnostiques de subsurface de type salic ; l'horizon gypsic est accessoirement associés au salic dans les 3 pédons.

En plus de leurs caractéristiques principales, ces sols révèlent d'autres caractéristiques qui sont devenues utiles pour compléter la classification des sols ; autrement dit, la présence de gypse et de carbonates secondaires, et de dépôt éolien, dans ces endroits a permis d'ajouter les principaux qualificatifs et les qualificatifs supplémentaires de part et d'autre du RSG. C'est ainsi qu'on a pu distinguer trois principaux types de Solonchaks qui représentent ensemble 30% des sols étudiés (fig. 17) ; ces 3 types sont :

- ❖ **Gypsic Endosalic Solonchaks (Calcaric)** dans le pédon 2 ; ce type est salé en profondeur en même temps qu'il présente un horizon gypsic à tous les niveaux du profil ;
- ❖ **Gypsic Yermic Solonchaks (Calcaric)** représenté par le pédon 4 ; le sol de ce site se caractérise par la présence de dépôts éoliens et de l'horizon gypsic à < 100 cm à partir de la surface ;



S. Belghemmaz (2021)

Photo 12 : Profil 4 (site M'lili 2) ne présentant aucune croûte de gypse et /ou calcaire

❖ **Gypsic Solonchaks (Hypersalic)** dans le pédon 5 (oasis d'Oumache) ; il s'agit d'un Solonchaks qui, en plus de la salinité excessive ($CE1:5=30 \text{ dS.m}^{-1}$), il est le siège d'une forte concentration en gypse (32- 47%) qui s'est traduite par l'apparition d'un horizon gypsic entre 0-120 cm.

La classification du pédon 2 dans le RSG des Solonchaks, n'est pas équivoque malgré qu'il pourtant un horizon diagnostic de subsurface y a été trouvé ; le taux de gypse y est élevé (30-33%) et se répartit de façon uniforme du haut du profil vers le bas. Mais, sur le plan morphologique, l'état structural du sol manifestant un gonflement qui donne l'impression d'une structure en pseudo-sables. La végétation naturelle halophyte (*Salsola vermiculata*, l'atriplex, etc), sont des indicateurs de la salinité. Eu égard de ces deux aspects fondamentaux qui caractérisent le pédon 2, et en plus de l'horizon diagnostic salic, on a estimé que l'évolution de ce sol est présentement plus influencée par la salinité que par le gypse.

La formation des horizons salic et gypsic dans ces zones aurait, vraisemblablement, eu lieu de deux manières : **i)** la première implique une formation ancienne due à un processus naturel de dépôt de sels par évaporation ; la présence de la nappe phréatique aurait influencé ce processus. **ii)** la seconde est liée à l'anthropisation avancée des sols dans ces agro-écosystèmes oasiens. Les problèmes de gestion de l'eau d'irrigation et des sols provoquent l'amplification de la salinisation secondaire.

De plus, il a été noté que la topographie de la plupart des sites oasiens n'est pas favorable au drainage naturel des eaux d'irrigation excédentaires. En effet, le mauvais drainage ou son absence, peut augmenter l'accumulation de sels et l'engorgement dans les zones situées en bas du paysage (Belghemmaz et al., 2018). Les Gypsic Solonchaks est un type de sols qui a été déterminé par Assami (2020), dans la partie ouest des Ziban, à des altitudes basses au même titre que les Gleyic Solonchaks ; ces types de sols gypseux ont été, respectivement, rencontrés dans les pédons 2, 4 et 5 de la présente étude, et dans l'oasis de Bordj Ben Azouz (sud de Tolga) où le phénomène de Gley a été décrit par Belghemmaz et al. (2018). Dans la région de San Luis Potosí (Mexico), les mêmes Solonchaks avec un horizon diagnostic gypsic ont été rapportés par Martínez-Montoya et al. (2012).

Pour faire la distinction entre les différents types de sols tels que les Solonchaks et les Gypsisols des Ziban qui présentent des similitudes qui peuvent rendre leur classification délicate, Hadj Miloud et al. (2018), ont estimé que l'utilisation de l'approche 'MFIS' : Mamdani Fuzzy Inference System, peut aider à juger avec précision du degré d'appartenance des types intermédiaires à l'un ou à l'autre des RSGs. Ce système expert a été utilisé par ces

auteurs pour distinguer entre un Solonchak à un Calcisol ou à un Gypsisol, dans le nord de l'Algérie.

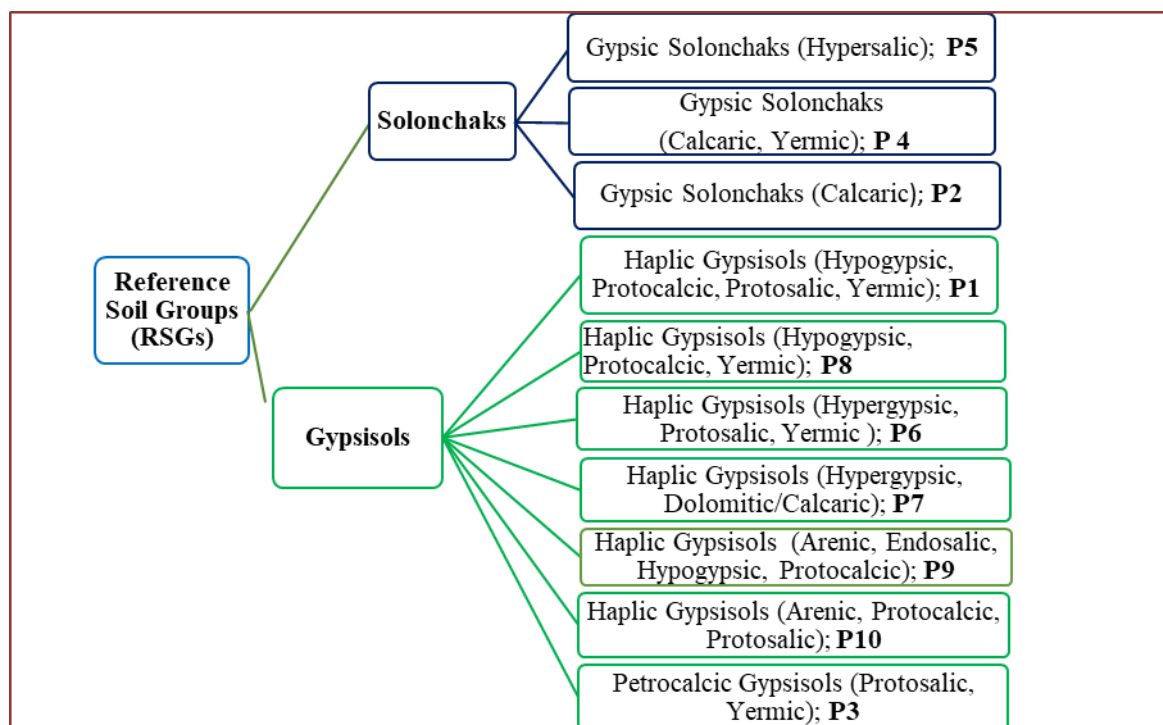


Figure 17: Typologie des sols selon IUSS Working Group WRB (2015) dans le Zab occidental des Ziban (Biskra).

1.2. RSG des Gypsisols

Ils ont été identifiés le long des deux toposéquences ; les pédons 1, 6, 7 et 8 sont caractérisés par une accumulation de gypse très variable (10-87%) ; elle atteint parfois des taux élevés dépassant 50% dans P6 et P7. Tous les pédons de ce RSG sont également marqués par les aspects de salinité et d'accumulation modérée de calcaire.

Dans ce RSG, les sols gypseux (Gypsisols) occupent 70% des sites étudiés (fig. 18), il est possible de distinguer 4 types de sols gypseux (fig. 17) ; cette subdivision est suggérée en se basant, notamment, sur les taux de gypse et la forme de son accumulation (présence ou d'absence de d'induration) ; aussi, faut-il intégrer d'autres aspects liés au taux de CaCO_3 , la salinité, et l'état de surface des sols tels que la présence de dépôts éoliens. La prise en compte de l'ensemble de ces caractéristiques a permis d'utiliser les qualificatifs principaux et les qualificatifs additionnels ou optionnels pour déterminer le nom du type de sol.

Ces quatre variantes des Haplic Gypsisols sont présentées et décrites ci-après :

- ❖ **Petrocalcic Gypsisols (Protosalic, Yermic)** ; ce type est caractéristique du pédon 3 qui représente les palmeraies de M'lili 1 (photo 15b) situées sur la toposéquence 1; les horizons diagnostics de subsurface qui y sont détectés sont, respectivement le gypsic et le

calcic. La structure massive et compacte dans ce sol est due à la présence d'une croûte gypso-calcaire. Les qualificatifs principaux Calcic et Petrocalcic utilisés pour ce Gypsisol s'excluent mutuellement, d'où il a été estimé que le Petrocalcic lui convient le mieux et son affectation au pédon 3 est fondée sur la présence de la croûte (tableau 11).

Par ailleurs, dans ce site, la présence d'une nappe phréatique plus ou moins proche de la surface (8-10 m) est une spécificité de ce Gypsisol dont l'évolution pourrait également être influencée par cette unité aquifère ; en effet, l'application du qualificatif Protosalic est justifiée par les valeurs de la CE (1:5) qui y sont comprises entre 4 et 8 dS/cm⁻¹. La salinité dans ce pédon, serait intimement liée à la qualité chimique de l'eau de la nappe.

❖ **Haplic Gypsisols (Hypergypsic, Calcaric)** dans les P6 (nord Benthious) et P7 (sud-est Tolga) dont les oasis sont alignées sur la toposéquence 2. Ce type de Gypsisols englobe à la fois le sol manifestant la croûte/encroûtement gypseux (P7) et celui où la croûte gypseuse n'a pas été observée sur terrain (P6). Dans les deux pédons, l'accumulation des carbonates de calcium secondaires ne permet pas d'affirmer la présence d'un horizon calcic au sens de la clé de la (WRB 2015).



S. Belghemmaz (2021)

Photo 13 : Profil 7 montrant un encroûtement gypseux (sud de Tolga)

❖ **Haplic Gypsisols (Hypogypsic, Calcaric)**, il s'agit d'un type de sols gypseux qui représente l'oasis située au sud d'El Hadjeb (Ain El Karma). Les caractéristiques de son pédon (P8) tiennent au fait qu'il renferme uniquement un horizon gypsic et que l'accumulation de gypse n'y est pas élevée (10– 29%) et que celle du calcaire est relativement faible (8-9%) et uniformément répartie le long du profil ; ces deux éléments (CaCO₃ et CaSO₄. 2H₂O) ont été insérés comme qualificatifs supplémentaires pour distinguer ce pédon de P1, P6 et P7. La priorité dans la classification de ce sol va à la distribution du gypse même

si celle-ci se montre peu abondante ; le qualificatif Hypogypsic de la (WRB 2015) l'emporte donc sur le calcaire, notamment de point de vue de la dynamique de ces sels dans le sol.

❖ **Haplic Gypsisols avec un qualificatif supplémentaire 'Arenic'**: ces sols ont été trouvés dans les sites oasiens 9 (El Hadjeb) et 10 (Ain Ben Noui) qui font partie du piémont du Mont de Boughezal. Leur particularité est liée à l'abondance des accumulations éoliennes (photos 8a et 8b) qui caractérisent le pédopaysage de ces unités de sols. En dépit de leurs propriétés diagnostics qui sont visiblement conditionnées par le gypse, les sels solubles et le calcaire, en adoptant la classification WRB (2022), les pédons 9 et 10 ont été rangés par Belghemmaz et al. (2024) dans le RSG des Arenosols. Il a été jugé par ces auteurs que les sables éoliens d'apport récent qui recouvrent des terrains importants dans ces sites, constituent un aspect majeur dans la formation de ces sols. Par conséquent, ces auteurs affirment ne pas reconnaître la présence d'un quelconque horizon de subsurface.

Par ailleurs, Benslama et al. (2021), les sols sableux (particules de sable non consolidées) ayant évolué sous culture de palmiers dattiers pendant 75 ans et ayant bénéficié annuellement d'amendements organiques (fumier) au niveau de la couche superficielle, qui étaient à l'origine des Arenosols (WRB, 2015), mais, la plupart d'entre eux peuvent être classés comme Anthrosols. Cette évolution serait étroitement liée aux pratiques culturelles ; les propriétés des sols auraient profondément changé. Il s'agit ici de changement de RSG dont la l'implication pédogénétique est traitée dans le **titre 7** de ce chapitre.

En outre, de point de vue morphologique, la présence d'une croûte gypseuse et celle de Deb Deb qui traduit souvent une association entre CaCO_3 et $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, ont été, pourtant, signalées dans P1 et P8, mais le taux de sulfate de calcium dans ces deux pédons n'était pas substantiel comme il l'est dans P6 et P7.

La structure massive qui s'est développée dans P1 et dans P8 pourrait être expliquée par l'enrichissement du matériau minéral du sol par dépôt et cristallisation du gypse et du calcaire. Cet aspect structural du sol est identique à celui qui prédomine dans le P7. L'abondance des sols à accumulation plus ou moins notable en gypse dans le Zab occidental, particulièrement dans les oasis de Tolga, El Hadjeb et Lioua, a été également confirmée par Rechachi et al. (2021).

Les caractéristiques morphologiques (couleur) des Gypsisols des Ziban et le taux de leur MO sont presque comparables à ceux du bassin de l'Ebre (Espagne) qui ont été rapportés par Aznar et al. (2013), à l'exception de l'horizon de subsurface du pédon 7 (P7H2) qui présente une couleur de 2,5 Y (tableau 34).

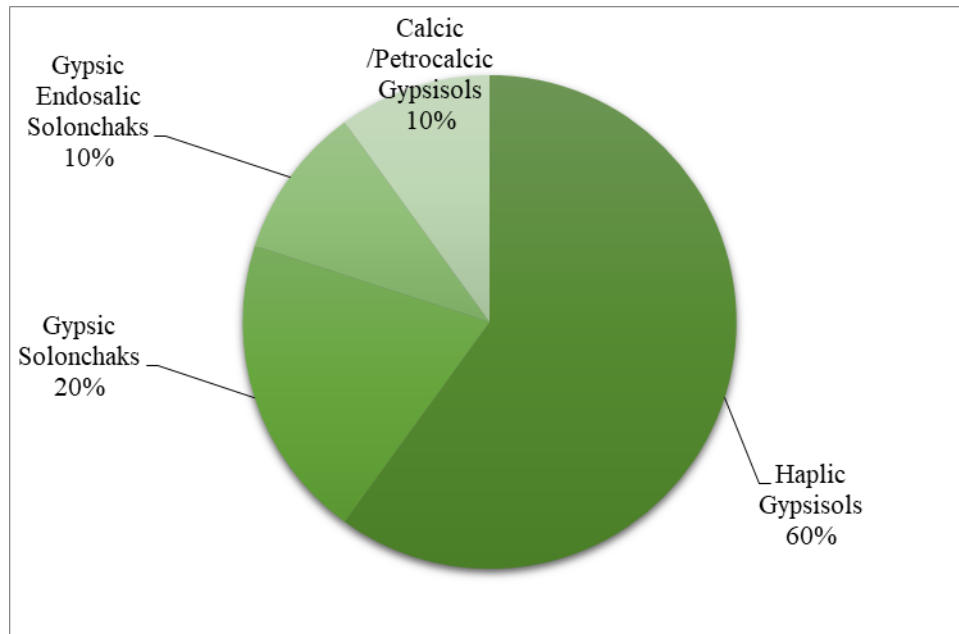


Figure 18 : distribution relative des sols du Zab occidental dans la région des Ziban selon la classification WRB (2015).

Ces auteurs ont indiqué que les horizons des sols étudiés en Espagne, révèlent principalement une couleur 10YR, avec des valeurs entre 6 et 8 et une chroma de 1 à 3 (gris clair et gris brun clair). Cette similitude peut s'expliquer par le fait que toutes les couches du sol de ce profil ont une concentration élevée en gypse et une faible teneur en M.O du sol (0,42 – 0,53 %).

Il est important de noter que les sols gypseux des sites étudiés ont été localisés dans diverses positions du paysage et que l'hydrologie qui caractérise ces différentes positions géomorphologiques favorise l'endoréisme. Canton et al. (1996), Roquero et Arias (1996), Herrero et Boixadera (2002) ont montré que la nature des reliefs, l'effet de pente et le temps de stabilisation du substrat sont les principales causes de cette distribution spatiale des sols à accumulation de gypse.

Par ailleurs, canton et al. (2003), la dynamique du gypse (le lessivage et l'accumulation), à une échelle spatiale réduite (très petites zones), varie en fonction de la pente et de l'épaisseur du sol. Ces auteurs indiquent que même si les conditions environnementales actuelles (matériau parental et climat) sont très appropriées pour la production de Gypsisols, le rôle des deux autres facteurs (le temps et la topographie) limite leur développement à des positions favorables.

Quant aux Gypsisols qui ont été particulièrement identifiés au niveau de la partie sud du piémont de Djebel Boughezal (P9 et P 10), ils sont formés sur un matériau parental composé

essentiellement de sable éolien, de calcaire et de gypse non consolidés et ils sont de texture à dominance de sables. Cette spécificité pédologique des deux pédons a trait au fait que d'une part, il y a été mentionné la présence d'un horizon gypsic au sein des dépôts éoliens, et d'autre part, au fait qu'aucune croûte ni encroûtement gypseux n'y ont été décelés. Cela pourrait s'expliquer par le rôle décisif des facteurs de l'environnement tels que le climat (vent et ETP), le relief, etc. dans l'apport de gypse selon une dynamique éolienne et son accumulation dans ces sols ; mais son mouvement à l'échelle de ces unités de sols dépend des facteurs climatiques, des propriétés intrinsèques des sols (nature du matériau, texture, structure, CE et pH) et du mode de gestion des oasis. Selon la WRB (2015), cet aspect lié à l'abondance de ce type de matériau issu de la translocation, peut conférer aux sols des régions arides et semi-arides une caractéristique 'Arenic' ; à cet effet, ce qualificatif supplémentaire a été ajouté pour nommer les pédons 9 et 10. Le mont de Boughezal constitue une barrière naturelle à l'ensablement et ses pentes sont le réceptacle pour les sables éoliens (photos 8a et 8b).

Il convient de noter que certains pédons de la région d'étude montrent des propriétés relativement analogues, notamment en termes des propriétés diagnostics et critères qui permettent de déterminer la typologie des sols. Par conséquent, dans certains cas, il n'est pas évident de différencier entre un Gypsisol et un Solonchak, du fait que parfois, ces deux RSGs combinent, simultanément, deux aspects, à savoir la salinité et l'accumulation de gypse. Il n'en va pas de même lorsque l'on choisit, au sein d'un même RSG, les qualificatifs principaux, supplémentaires et optionnels. La sélection des qualificatifs permet de passer, sans risque de confusion, d'un type de sols à un autre. Parce que dans la WRB (2015), l'insertion des qualificatifs, sert justement à construire un second niveau de la classification des sols. Enfin, les séquences de sols qui en sont obtenues pour ces deux RSGs reflètent d'une part, les processus pédogénétiques prédominants (salinisation et /ou accumulation de gypse) et d'autre part, les processus dont l'influence au niveau des pédons est jugée secondaire.

2. Classification des sols selon la Soil Taxonomy de l'USDA (2014)

Les horizons diagnostiques identifiés dans la zone d'étude sont : **a)** pour les horizons de surface, seul l'épipédon **ochric** est dominant au niveau de tous les sites des deux toposéquences. **b)** Pour les horizons diagnostics de subsurface, trois types d'horizons ont été détectés : **Gypsic**, **Petrogypsic** et **Salic**. Bien que près de la moitié des échantillons de ces sols contiennent des quantités de CaCO_3 avec des valeurs allant de 9,78 à 24,35%, susceptibles de donner lieu à un horizon calcic, cet horizon diagnostic n'a pas été discerné

dans ces pédons. L'absence de l'horizon diagnostic calcic dans ce pédon n'est pas concordant avec ce qui a été affirmé par Boyadgiev (1973) et Toomanian et al. (2003). Ces auteurs soutiennent la présence possible d'horizons gypsic et calcic ensemble et ce, avec ou sans horizon salic dans les sols des régions arides contenant du matériel pédologique carbonaté. Ainsi, deux ordres de sols ont été identifiés : Les Aridisols et les Entisols (fig. 19).

2.1. Les Aridisols

Ils sont divisés en **Gypsid**s et **Salid**s (fig.19). Ces sous-ordres (SO) reflètent l'abondance relative des accumulations gypseuses et salines. Le SO des Calcids n'a pas été trouvé dans le pédopaysage des 2 toposéquences de la zone d'étude.

❖ Le SO des Gypsid

Les Typic Haplogypsid, comme SG, ont été distingués dans les pédons 2, 3, et 6, qui présentent seulement un horizon gypsic consistant en une accumulation de gypse secondaire sans induration ; le gypse est friable et apparaît sous formes de poudre ou de cristaux. S'agissant du SG des Typic Petrogypsid, le sol développe une croûte de gypse très compacte contrairement à ce qui a été retenu pour le précédent SG ; l'accumulation de gypse secondaire dans l'horizon diagnostic a donné naissance à un horizon petrogypsic. Ce type de sol se trouve dans la toposéquence 2, dans les sites oasiens représentés par P7 et P8.

❖ Le SO des Salid

En plus de l'horizon salic identifié, ces sols se distinguent par une accumulation accrue de sels solubles sur le transect reliant les profils 1, 4 et 5. Ainsi, nous avons identifié le Grand Groupe (GG) des Haplosalid avec deux SG : Typic Haplosalid pour les pédons 1 et 4 et Gypsic Haplosalid pour le pédon 5. Le site d'Oumeche (P5) est le plus bas (81 m) de tous les sites étudiés, et il présente également la salinité du sol la plus élevée (P5H1), avec une CE de 30 dS.m⁻¹.

L'horizon petrogypsic des pédons 7 et 8 présente une structure cimentée avec une continuité sur toute la face du profil. On pense que cet horizon doit sa formation à la suite de la dissolution du sulfate de calcium lors de la remontée de la nappe phréatique. La cristallisation et les dépôts de gypse se produisent pendant la saison sèche ; il s'ensuit que le niveau de la nappe phréatique subit une baisse et les sels se déposent dans les parties supérieures du sol.

Le mouvement de dislocation du gypse pourrait également se produire dans les environnements agricoles où les terres sont irriguées. Cette hypothèse est soutenue par

l'explication fournie par Pouget (1968) pour l'origine des sols à croûte de gypse qui ont été décrits en Tunisie.

Cependant, Nesson (1978) rapporte qu'au moins 80 sources importantes d'émergence d'eau existaient dans la région du Zab occidental au début du 19^{ème} siècle, notamment dans l'oasis de Tolga et ses environs. Cet auteur souligne que des nappes phréatiques (eaux souterraines phréatiques) étaient actives à cette époque, y compris la nappe des calcaires avec un faciès sulfaté-calcique et les aquifères phréatiques (eaux souterraines peu profondes) avec un faciès chimique sulfaté mixte. Les horizons petrogypses se trouvent généralement dans des environnements arides ou semi-arides où les sels solubles, tels que le gypse, ne sont pas éliminés par un lessivage en profondeur (SSS, 2014).

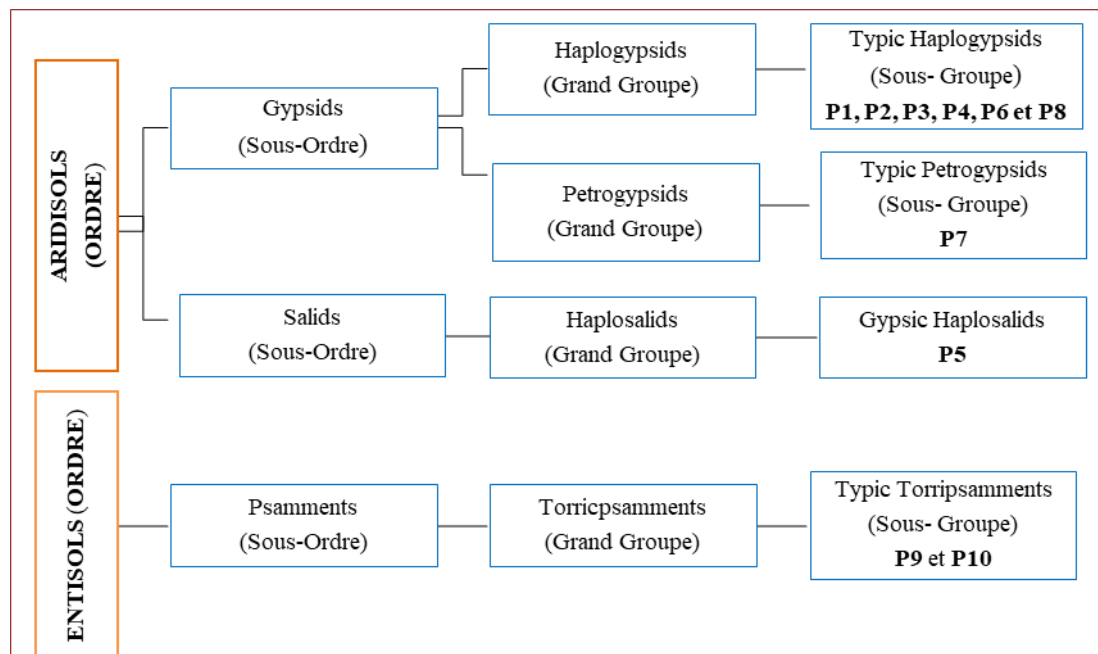


Figure 19: Typologie des sols selon la Soil Txonomy (2014) dans le Zab occidental des Ziban (Biskra).

Selon Halitim (1988), le processus de formation des horizons gypsic et petrogypsic dans cette région, consisterait en l'intrusion de l'accumulation de gypse dans le matériau du sol d'origine pour former les croûtes de la nappe gypseuse. La précipitation du gypse dans les macropores et la production des aspects pédologiques caractéristiques des sols gypseux, semblent résulter de la dissolution du gypse dans les horizons de surface et du mouvement continu des ions Ca^{2+} et SO_4^{2-} dans l'eau de percolation du sol. Selon Halitim (1988), Hashemi et al. (2013), et Pashaei et Manafi (2021), ce mécanisme qui est souvent à la base de l'apparition d'aspects spécifiques des sols gypseux.

Les Typic Haplogypsid occupent la plus grande partie de l'espace oasien de la région d'étude (fig.19) ; leurs caractéristiques sont relativement identiques à ceux qui se développent dans les palmeraies de la Jafara (sud de Libye) que Elaalem et al. (2021) ont décrits ; les aspects communs aux sols des Ziban et de la Jafara tiennent essentiellement à la teneur considérable en gypse et dans le fait que leurs horizons diagnostics se limitent à l'ochric et le gypsic.

Quant aux Petrogypsid des Ziban (P7), ils sont comparables à ceux apparaissant dans la partie centrale du nord de Libye, seulement en termes de leur morphologie et de la présence des horizons ochric et petrogypsic. Mais, leurs textures sont légèrement différentes ; Elaalem et al. (2021) ont mis en évidence l'absence de la fraction des sables dans les sols observés.

2.2. Les Entisols

Dans la ST, le matériau parental est le facteur le plus important dans l'identification des sous-ordres des Entisols formés à partir de matériaux fluviaux ou sableux (par exemple, les Fluvents et les Psamments) (Bockheim et al., 2014).

Dans les zones semi-arides et arides de Libye, Elaalem et al. (2021) ont observé que les Entisols et les Aridisols sont, de loin, les types de sols qui occupent les plus vastes étendues et qu'en général, la majorité des sols de ce pays sont faiblement développés ou pas du tout développés. Les Xerofluvents et les Torrifluvents sont les sous-groupes qui y ont été trouvés selon Ben Mohamed (2013) cité par Elaalem et al. (2021) ; ces types d'Entisols diffèrent de ceux étudiés dans les Ziban, en particulier, de point de vue de l'origine du matériau pédologique. Ceux de Libye sont formés d'alluvions anciennes d'origine fluviale.

Concernant les Entisols des Ziban, on a pu faire ressortir un seul SG, c'est celui des Psamments. Compte tenu du régime hydrique qui prévaut dans la région d'étude, il a été possible de classer les pédons 9 et 10, respectivement, dans le GG des Torripsamments et dans le SG des TypicTorripsamments. Ces sols sont dominés par l'accumulation de sable d'origine éolienne sur une profondeur dépassant 100 cm à partir de la surface et occupent la partie supérieure du paysage, plus précisément sur le piémont du mont de Boughezal.

En plus qu'ils sont formés de dépôts éoliens, ces Torripsamments contiennent des taux de CaCO_3 modérés et des taux de gypse visiblement importants ; ce fait s'accorde avec les caractéristiques évoquées par Soil Survey Manual (2017) pour de tels sols.

Nordt et al. (2011) soulignent que des sols similaires ont été trouvés en Arabie Saoudite avec moins de 100 mm de précipitations et un $\text{pH} > 8,5$. Selon Samira et al. (2013), les TypicTorripsamments observés dans le sud du Koweït sont identiques aux Typic Haplocalcids. Cependant, il est essentiel de noter qu'aucune caractéristique des Typic

Haplocalcids de la région sud du Koweït, ne correspond à celles des Typic Torripsamments décrits dans la région des Ziban. La couleur de l'horizon de surface est 7/4 7,5 YR (P9H1) et 8/3 7,5 YR (P10H1) ; ils sont composés de sable, de gypse et même de CaCO_3 et de quartz. La plupart de la végétation naturelle est composée de plantes halophytes et xérophytes.

Nooraie (2010) dans l'étude réalisée dans le désert de Loot, a rapporté une relation étroite entre la position géomorphologique et la genèse et l'évolution du sol. Il a souligné que les Entisols non développés ont été formés sur des surfaces de piémonts récents et instables. Ceci s'accorde avec les Entisols qu'on a identifiés dans les pédons 9 et 10 qui sont respectivement localisés dans Ain Ben Noui et El Hadjeb. D'autre part, le relief plat des terrains du sud de l'Iran sur lesquels se sont formés les horizons salic, gypsic, petrosalic, et pétrogypsic, correspond à la même forme de paysage des Ziban qui a permis de déterminer les horizons gypsic/pétrogypsic et salic dans cette région (tableau 34).

Le calcaire présent dans de nombreux endroits de la zone d'étude aurait subi un processus de gypsification. Ce processus peut expliquer l'apparition des croûtes gypso-calcaires connues localement sous le nom de « Deb Deb ». Compte tenu des principaux aspects révélés par les Gypsic Haplosalids rencontrés dans le pédon 5 de cette étude, nous pouvons affirmer que ce type de sols est presque identique à celui identifié par Abdelfattah et Shahid (2007) dans le contexte de la zone aride d'Abu Dhabi (UEA).

3. Caractéristiques morphologiques et diagnostics des sols du Zab occidental de la région des Ziban selon la WRB (2015) et la Soil Taxonomy de l'USDA (2014)

Les caractéristiques diagnostics (morphologiques et analytiques) ayant permis d'identifier les différents épipédons et les horizons diagnostics de subsurface, ont été synthétisés et présentés dans le tableau 34.

Eu égard des caractéristiques pédologiques et environnementales des Ziban, la recherche d'horizons diagnostics des sols, selon les critères des deux systèmes de classification, dépendra dans un premier lieu d'une détermination suffisante des propriétés intrinsèques des sols (pH, salinité, structure, texture, gypse, calcaire et M.O). Ensuite, il est indispensable d'inclure l'effet du climat (précipitation, température et ETP, et les vents), l'occupation des sols et l'activité anthropique (mode de gestion).

L'identification des horizons diagnostics dans des sols affectés par la présence d'accumulations salines (carbonates, gypse et sels plus solubles que le gypse) nécessite selon Eswaran (2008) une certaine humidité ; ce qui permettra le déplacement des sels par translocation ou selon un mouvement approprié.

Tableau 34 : Synthèse des caractéristiques morphologiques et diagnostics des épipédons de surface et des horizons de subsurface dans le Zab occidental de la région des Ziban (Biskra).

Pédons	Horizons diagnostics et autres aspects, propriétés et matériaux de sol		
	Soil Taxonomy USDA (2014)	IUSS Working Group WRB (2015)	Couleur du sol (sec) ; Charte de Munsell (2014)
P1	Epipédon ochric, gypsic (By) au niveau de P1H2	gypsic (gy) au niveau de (P1H2) ; Protocalcic ; Protosalic dans P1H1 et P1H2 ($CE > 4 \text{ dS.m}^{-1}$)	7/4 7.5YR (H1) 7/3 7.5YR (H2)
P2	Epipédon ochric, gypsic(Cy) entre 30–120 cm; P2H2 et P2 H3	salic (sz) à partir de 30- 60 cm. gypsic (gy) entre 0 et 120 cm. Endosalic	7/4 7.5YR (H1) 6/1 10YR (H2)
P3	Epipédon ochric, gypsic (Cy); (30-60 cm ; P3H2)	gypsic (gy) se développant à partir de 30 cm ; calcic (cc) dans P3H2.	7/3 10YR (H1) 8/1 10YR (H2)
P4	Epipédon ochric, gypsic (By) dans le sous-sol (30– 60 cm; P4H2)	salic (sz) dans P4H2 ; gypsic (0-60 cm) ; présence modérée en CaCO_3 (0-60 cm).	6/3 7.5 YR (H1) 7/3 10YR (H2)
P5	Horizon salic (Az) commençant à partir de la surface (0–30 cm; P5H1).	salic (sz) dans 0-30 cm ; gypsic (gy) à partir de 0- 120 cm ; Hypersalic (jz)	6/3 7.5YR (H1) 7/4 7.5YR (H2)
P6	ochric epipedon, gypsic (By) and (Cy) entre 30– 120 cm (P6H2 et P6 H3)	gypsic (gy) à partir de 0-30 cm ; Hypergypsic (jg) à partir de 30- 60 jusqu'à 120 cm ; yermic (ye) en surface.	7/2 7.5YR (H1) 8/2 7.5YR (H2)
P7	Epipédon ochric, petrogypsic (Cyy)	petrogypsic (pg) à partir de la surface usqu'à 120 cm ; Hypergypsic (jg) entre 0-120 cm ; Protosalic dans P7H1 ($CE > 4 \text{ dS.m}^{-1}$)	8/2 10YR (H1) 8/1 2.5YR (H2)
P8	gypsic (Cy); horizon cimenté mais ne satisfait pas les critères du de l'horizon petrogypsic (gypse<40%)	gypsic (gy) ; Hypogypsic dans 30-60 cm.	8/2 10YR (H1) 7/3 10YR (H2)
P9	Epipédon ochric prédominance de matériel	Légère différenciation entre les couches de sols; texture sableuse	7/4 7.5YR (H1) 7/3 7.5YR (H2)
P10	minéral (particulièrement sable) et absence d'horizons de sols distincts issus de la pédogénèse.	Sable grossier (texture grossière), profond, légère pente, pente douce; sol sans différenciation perceptible du profil.	8/3 7.5YR (H1) 7/3 10YR (H2)

Explications : les normes de Soil Survey Staff (2014) pour la Soil Taxonomy ont été appliquées pour désigner les horizons diagnostics (HD). Les HD de la WRB sont introduits conformément aux recommandations de l'IUSS (2015). Les symboles en gras sont utilisés en suivant les règles édictées par USDA (2014) et à WRB (2015).

Or, dans les sites oasiens étudiés, la dynamique des sels (au sens large) est soumise soit, à l'apport d'eau par irrigation et / ou par l'effet de la nappe d'eau peu profonde.

A cause de l'aridité du climat, ce processus d'accumulation de sels est, semble-t-il, un des faits majeurs qui se poursuivent actuellement dans les sols des Ziban. Cependant, Eswaran (2008) suppose que de nombreuses caractéristiques utilisées pour déterminer les horizons diagnostics, peuvent avoir une origine ancienne.

Parmi les horizons superficiels ou épipédons, l'horizon le plus couramment répandu, est l'horizon ochric ; Roquero (1979) a signalé une large présence de cet épipédon dans les sols méditerranéens et a argué que cela est dû au faible taux de MO dans ces sols. La sécheresse climatique, la mise en culture, pâturage et l'érosion qui s'est produite, auraient fortement impacté la partie superficielle de ces sols.

4. Comparaison de la typologie des sols dans la Soil Taxonomy (2014) et WRB (2015)

Les Calcisols et les Gypsisols peuvent être rencontrés dans la même zone climatique. Il convient de souligner que si un horizon gypsic ou petrogypsic permet de diagnostiquer les Gypsisols, l'accumulation de gypse peut également être observée dans d'autres RSG (Driessem et al., 2001). Un horizon calcic formé au-dessus de l'horizon gypsic ou petrogypsic a été mis en évidence dans de nombreux sites étudiés au Koweït (Samira et al., 2013). Toutefois, au regard des critères et propriétés diagnostics de la SoilTaxonomy (2014) pour la reconnaissance des Aridisols montrant des accumulations de calcaire et du gypse, le sous-ordre des Calcids n'a pas été mis en évidence dans la zone d'étude, mais, pour celui des Gypsids, seuls les GG des Haplogypsids et les Petrogypsids ont été déterminés. En effet, le SO des Gypsids qui ont été identifiés dans le Zab occidental, se distinguent, particulièrement, par l'absence d'un horizon calcic se positionnant au-dessus de l'horizon gypsic ou petrogypsic. En outre, Martínez-Montoya et al. (2012) ont révélé la présence de Typic Haplogypsids dans la région de San Luis Potosí (Mexico) ; tandis que Moret-Fernandez et al. (2021) et Navarro-Perea et al. (2023) évoquent la présence des Typic Haplogypsids et les Typic Haplosalids dans le climat semi-aride du nord-est de l'Espagne.

Les sols gypseux qui ont été décrits au nord-est d'Espagne ont une faible teneur en M.O (1,94 %), un pH de 7,84 et une texture sablo-limoneuse ; ils sont presque analogues aux Typic Haplogypsids observés dans le Zab occidental (P1, P2, P3, P4, P6 et P8). Par contre, les caractéristiques des Gypsic Haplosalids, représentés par le pédon P5, qui ont été trouvés dans

la région d'étude des Ziban, diffèrent de celles qui ont été rapportées par Moret-Fernandez et al. (2021) pour le même type de sol localisé au nord-est de l'Espagne, notamment de point de vue valeurs du pH. Le Gypsic Haplosolids des Ziban se distingue par un pH alcalin oscillant entre 8,1 et 8,4.

Les Torripsamments sont similaires aux Arenosols de par le matériel parental, l'absence de développement de profil et la texture qui est dominée par les sables. Ils sont présents dans cette région avec des caractéristiques presque similaires à celles décrites par ST (1999 et 2014). Ces sols se distinguent par le fait qu'ils sont souvent situés au sommet du paysage et qu'ils sont le réceptacle de dépôts de sable éolien. Sur les 120 cm supérieurs de ces sols, les pédons 9 et 10 ne manifestent aucun horizon diagnostique de subsurface. Ils ont été identifiés à Zelfana (Ghardaia) par Benslama et al. (2020).

Toomanian et al. (2003) ont utilisé les systèmes de classification de la ST et de la WRB pour classer les sols gypseux du nord-ouest d'Isfahan (Iran) ; ces auteurs ont affirmé que le système ST paraît moins performant par rapport au système de la WRB et ce, particulièrement, dans la description détaillée des divers aspects des sols gypseux et de leur classification. Cependant, selon Sarshogh (2010) et Rasooli et al. (2021), qui ont étudié les sols de la région de Babaheidar dans l'ouest de l'Iran, le système ST (Soil Survey Staff, 2010) pourrait mieux décrire les caractéristiques des sols peu profonds dans les régions semi-arides par rapport au système WRB (2015).

Cet essai de comparaison des résultats de la classification des sols en adoptant les deux systèmes (ST, 2014) et (WRB, 2015), pour le cas des sols du Zab occidental, a été intéressant parce qu'il a permis de juger de l'opportunité de les utiliser ensemble afin de vérifier si des corrélations peuvent être trouvées entre les types de sols de cette région. En effet, il a été remarqué que la détermination de la typologie des sols selon la WRB (2015) a eu plus de pertinence par rapport à la ST ; les règles de cette classification ont aidé à expliciter les principales propriétés des sols et à nommer les sols tout en incluant les aspects qui sont remarquables et dont on ne saurait exclure le rôle dans leur pédogenèse.

4.1. Classification des sols à accumulations salines

Parmi les cas où l'on estime que la classification des sols selon la ST ne permet pas, même à des niveaux relativement inférieurs (GG et SG), d'intégrer certains aspects présents dans la région des Ziban qui peuvent être aussi importants que ceux rentrant dans la détermination des caractéristiques et horizons diagnostics, il y a le pédon5.



S. Belghemmaz (2021)

Photo 14 : Profil 5 hypersalé (Oumache)

Ce pédon (fig. 20) a été identifié par la WRB (2015) comme un Gypsic Solonchaks (Hypersalic). Dans ce type de sols, il est intéressant de noter qu'outre l'horizon salic qui fait de lui un Solonchaks authentique, il montre également un horizon gypsic. La présence de sels solubles en excès dans ce pédon est traduite par la valeur de la CE (30 dS.m^{-1}) mérite d'être ajoutée comme spécificateur. Cependant, dans la ST, même si l'on admet que la classification de ce pédon (P5) dans les Gypsic Haplosalids, est nettement corrélée à celle produite par la WRB pour ce sol, notamment de point de vue de l'ordre d'importance des horizons diagnostics (salic et gypsic) qui y apparaissent et de leur influence simultanée sur le fonctionnement du sol de cette unité, l'aspect salinité n'y a pas été ressorti par le système de la ST en tant que fait éminemment important.

Les profils P2 et P4 ont été décrits et classifiés par la ST, simplement, en tant que Typic Haplogypsid, alors que leurs propriétés et leur évolution sont fondamentalement empreintes de l'effet de la dynamique des sels solubles ; il est, par conséquent, suggéré de retenir la classification qui leur a été proposée par la WRB, parce qu'elle est la mieux appropriée. En effet, que ce soit pour P2 ou pour P4, le gypse en tant que constituant du matériau pédologique de ces sols, n'a pas été négligé ; cet aspect s'impose en tant que qualificateur principal et se positionne de façon étroite à côté du RSG des Solonchaks ; les noms de ces sols s'écrivent selon les séquences suivantes :

- i) Gypsic Solonchaks (Endosalic, Calcaric) pour P2 ;
- ii) Gypsic Solonchaks (Calcaric) pour P4.

4.2. Classification des sols gypseux

Pour la classification des sols riche en gypse, un bon nombre d'exemples de pédons peut révéler la bonne compatibilité de l'un ou de l'autre des deux systèmes pour classer ce type de sols dans la région d'étude. On retient que selon la ST, deux GG ont été définis : **i)** les Haplogypsis représentés par P1, P2, P3, P4, P6, P8 ; et **ii)** les Petrogypsis (P7). Les critères diagnostics employés par la ST ont eu l'avantage de permettre de distinguer entre les pédons où le matériau de sol contenant le gypse montre des niveaux d'induration de moindre ampleur avec ou sans croûtes gypseuse ou gypso-calcaire, de celui qui développe un horizon petrogypsic (Cyy) dans le pédon7 (tableau 34) avec un encroûtement gypseux commençant à partir de la surface du sol et où les taux de gypse sont compris entre 85 et 87%.

Par contre, la classification des sols gypseux de la région d'étude selon la WRB (2015) a permis d'avoir un large spectre de Gypsisols ; cette diversité regroupe :

i) *Les Haplic Gypsisols avec un qualificatif supplémentaire Hypogypsic (wg)* intervenant juste après le RSG ; ces sols (P1 et P8) sont marqués par de faibles taux de gypse ($\leq 25\%$) sur les 100 cm à partir de la surface du profil.

ii) *Les Haplic Gypsisols avec un sous-qualificatif Hypergypsic (jg)* placé après le RSG (P6 et P7) ; les taux de gypse sont très élevés et dépassent 50 % dans ces pédons. On remarque qu'en dépit que P7 manifeste un horizon petrogypsic qui, sur le plan agronomique, constitue une contrainte pédologique sérieuse pour les cultures oasiennes, il a été rangé dans la même catégorie de sols que P6. Mais, en plus des propriétés principales qui leur sont communes, ces deux pédons (6 et 7) peuvent paraître légèrement différentes, notamment à cause des qualificatifs supplémentaires ou optionnels qui leur ont été affectés dans leurs séquences respectives. Il advient que P7 soit plus disposé à être impacté par la salinité ($CE \geq 4$) dans son niveau supérieur que P6 ; il reçoit ainsi le qualificatif Protosalic (qz).

iii) *Catégorie des Haplic Gypsisols* qui sont dominés par la présence d'un matériau pédogénétique riche en sable et d'autres éléments d'apports éoliens. Le sous-qualificatif Arenic a été utilisé pour distinguer ce type de sols gypseux de ceux présentés précédemment. Au sein de ces deux Gypsisols qui font partie du même pédopaysage mais situés dans des endroits éloignés par rapport au piémont sud du mont de Boughezel, on peut préciser que leur fonctionnement peut être interprété différemment. Etant localisé à El Hadjeb, le pédon 9 semble avoir une plus forte expression du processus de salinisation dans l'horizon 60-120 cm ; le sous-qualificatif optionnel (Endosalic) avec un spécificateur lié à la profondeur lui a

été attribué pour le différentier de P10 représentant la partie nord des palmeraies de Ain Ben Noui.

iv) *Petrocalcic Gypsisols* : ce quatrième type de Gypsisols a été identifié dans la toposéquence 1, plus précisément dans le site oasien de M'lili 1 (P3) ; il est considéré comme l'unique sol gypseux à contenir un horizon diagnostique de subsurface de type calcic. Le sol est légèrement salé en profondeur.



S. Belghemmaz (2021)

Photo 15: (a) Profil 3 du site M'lili 1 (nappe à 8-10 m de profondeur) ; (b) : Profil avec croûte en « Deb Deb » (accumulation gypso-calcaire)

L'utilisation des deux systèmes de classification pour la détermination de la typologie des sols dans la région des Ziban a permis de mettre en lumière les multiples aspects de ces sols dont les principaux sont liés à la présence de sels solubles, à l'abondance relative de gypse, notamment, sous forme de croûtes et /ou encroûtements et aux dépôts éoliens.

Aux termes de ces confrontations, il a été possible de vérifier que des convergences peuvent être soulignées, entre les deux systèmes de classification, particulièrement, dans l'identification des sols à accumulations gypseuses et les sols présentant des manifestations

salines. Des divergences fondamentales ont pu être constatées entre ces deux systèmes et ce précisément au sein des pédons qui développent à la fois un horizon salic et un autre gypsic.

Car, souvent les sols gypseux de la région d'étude contiennent des concentrations non négligeables en sels solubles ; en Libye par exemple, les sols gypseux sont, dans la plupart du temps, associés à la salinité et occupant les dépressions de beaucoup d'endroits tels que les oasis de Ghadames, Daraj, Jafara, etc., sont, d'après Elaalem et al. (2021), classés dans le plus haut niveau hiérarchique (SO des Gypsids) de la SoilTaxonomy (2014) de l'USDA.

Dans ce cas, c'est-à-dire pour les sols combinant d'autres aspects comme la salinité, la WRB (2014), est la classification qui donne le plus de précision sur la diversité typologique des sols des Ziban ; les noms des sols qui en découlent pourraient renseigner sur les processus de formation des sols qui y sont présents et du degré d'interférence de chacun dans leur l'évolution.

Sinon, notre étude partage la même conclusion que celle qui a été dégagée par Adel Zayed et al. (2023) en ce qui concerne la complémentarité des deux systèmes surtout lorsqu'ils sont utilisés ensemble. On ajoute que pour le cas des sols des régions arides des Ziban, l'utilisation conjointe de la ST (2104) et de la WRB (2015) a permis d'obtenir un large éventail d'informations sur leurs caractéristiques ainsi que sur leur typologie et sur leur distribution à travers les deux toposéquences.

5. Expression universelle de la salinité des sols : intérêt de l'approche de conversion et ses limites

La salinité du sol est universellement exprimée par la CE mesurée sur un extrait de pâte saturée (CEps) ; elle est considérée comme le meilleur indicateur de la réponse des plantes à la salinité, c'est pourquoi, elle est recommandée comme la technique de référence pour l'évaluation de la salinité du sol (Herrero& Pérez-Coveta, 2005). Toutefois, cette approche de mesure de la salinité du sol est très coûteuse et reste techniquement une opération complexe et qui nécessite également beaucoup de temps pour sa réalisation. En outre, Malheureusement, les extraits de pâte saturée sont difficiles à réaliser, prennent du temps et nécessitent une expertise pour déterminer le point de saturation approprié (Kargas et al., 2018 ; Hossain et al., 2020). Par conséquent, sa reproductibilité paraît peu évidente.

Plusieurs études ont été consacrées à la prédiction ou à la conversion de la CE du sol à partir des différents extraits dilués tels que 1:1, 1:2.5, et 1:5.

Parmi les rapports dilués mentionnés ci-dessus, le rapport 1:5 est la méthode préférée pour déterminer les propriétés du sol en Australie et en Chine (Rayment et Lyons, 2011). Le

rapport 1:5 dissout de plus grandes quantités de solutés que l'extrait de pâte à saturation, notamment pour les sels peu solubles (Reitemeier, 1946) in (Yangbo et al., 2012).

En effet, la relation entre la CE_{ps} et la CE de différents extraits d'eau du sol est influencée par la texture du sol et la présence de sels et de gypse dans le sol (United States Salinity Laboratory, 1954) in Kargas et al. (2022). En outre, les différences observées entre les divers modèles sont probablement dues au temps et à la méthode d'équilibrage (He et al., 2013).

Cependant, le facteur de conversion (FC) des valeurs de CE provenant de différents rapports à la CE_{ps} dans une région donnée, ne peut pas servir dans la détermination de FC d'une autre région dont les caractéristiques de sol sont différentes, à cause des erreurs significatives qui peuvent se produire dans la prédiction de la CE_{ps} (Kargas et al., 2022).

Plusieurs travaux ayant pour objectif de proposer des équations de prédiction de la CE_{ps} à partir différents rapports d'extraits dilués, ont été effectués par Slavich et Petterson(1993) ; Sonmez et al.(2008) ; Khorsandi Yazdi (2011) ; Aboukila et Norton(2017) ainsi que beaucoup d'autres auteurs. En Algérie, Bakhti et al. (2024) ont étudié la relation entre CE_{ps} et les valeurs de la CE mesurée selon les rapports 1/2.5) et 1/5 ; les d'échantillons de sol ont été prélevés dans la palmeraie de Sidi Yahia (Oued Righ). Il a été constaté par ces auteurs que la salinité du sol décroît à mesure que le rapport de l'extrait dilué augmente.

5.1. Salinité du sol obtenue par transformation de la $CE_{1:5}$ en CE_{ps}

La méthode qui a été choisie pour procéder à la conversion des valeurs de la salinité qui ont été obtenues sur un extrait dilué 1 :5 ($CE_{1:5}$) est celle de Khorsandiet Yazdi (2011). Il s'agit d'une équation qui tient compte de la texture du sol et de sa teneur en gypse.

$$CE_{ps} = 5,60 \times CE_{1:5} - 4,37$$

Selon l'échelle de salinité de l'extrait de pâte saturéede Dahnke and Whitney (1988), on note qu'environ 60% des échantillons ont une CE_{ps} qui est au-delà de 16 dS.m^{-1} , alors que ceux qui sont fortement salés ($8.1\text{-}16.0 \text{ dS.m}^{-1}$), ils représentent 1/3 du total des échantillons. Les sols modérément salés sont représentés seulement par P8H3 et P10H3 (tableau 35).

On constate que le groupe d'échantillons manifestant une hypersalinité ($CE_{ps} > 16 \text{ dS.m}^{-1}$) représente presque les 2/3 des échantillons étudiés ; dans la région d'Oued Righ, Bakhti et al. (2024) ont eu un résultat de plus de 90 % des échantillons avec une CE_{ps} qui dépasse 16 dS.m^{-1} .

Tableau 35 : Résultats de la conversion des valeurs de la $CE_{1:5}$ en CE_{ps}

Profil de sol	Horizon/Prof. (cm)	$CE_{1:5}$ ($dS.m^{-1}$)	CE_{ps} ($dS.m^{-1}$)
P 1	H1 (0-30)	5,35	25,6
	H2 (30-60)	10,15	52,5
P 2	H1 (0-30)	2,55	9,9
	H2 (30-60)	22,15	119,7
	H3 (60 -120)	19,5	104,8
P3	H1 (0-30)	4,34	19,9
	H2 (30-60)	8,74	44,6
P4	H1 (0-30)	4,00	18,1
	H2 (30-60)	17,3	92,4
P5	H1 (0-30)	30	163,6
	H2 (30-60)	12,64	66,4
	H3 (60 -120)	7,23	36,1
P6	H1 (0-30)	4,47	20,7
	H2 (30-60)	3,11	13,1
	H3 (60 -120)	2,49	9
P7	H1 (0-30)	8,89	45,4
	H2 (30-60)	3,10	13
	H3 (60 -120)	2,58	10,1
P8	H1 (0-30)	2,58	10,1
	H2 (30-60)	2,25	8,3
	H3 (60 -120)	2,08	7,3
P9	H1 (0-30)	4,44	20,5
	H2 (30-60)	2,28	8,4
	H3 (60 -120)	15,39	79,7
P 10	H1 (0-30)	5,33	25,5
	H2 (30-60)	2,39	9
	H3 (60 -120)	2,19	7,9

L'examen de ces résultats de la conversion de la salinité de l'extrait dilué 1 :5 vers la salinité de l'extrait de pâte saturée, selon le modèle de Khorsandi and Yazdi (2011) a donné lieu à des valeurs surestimées de la salinité du milieu pédologique des agroécosystèmes des Ziban.

Selon ces auteurs, la concentration en gypse a un impact plus important que la texture sur la précision des modèles de prédiction de la $CE_{(ps)}$.

La modèle de prédiction qui a été appliqué a été amélioré puis recommandé, notamment, après l'avoir testé sur des sols avec et sans gypse dans la région de Yazd (Iran).

5.2. Conséquences de la conversion de la $CE_{1:5}$ vers une $CE_{(ps)}$ sur la typologie des sols

La conversion de la salinité obtenue par l'extrait dilué CE (1 :5) en CE (ps) a donné lieu à un changement majeur dans la typologie de sols qui est déterminée avec une salinité 1 :5. Ainsi, cette typologie est très limitée en termes de diversité ; les 9/10 des pédons appartiennent au RSG des Solonchaks, à l'exception du pédon 8 qui est resté dans le RSG des Gypsisols (tableau 36).

Suite à la conversion de la $CE_{(1:5)}$ en $CE_{(ps)}$, on peut, alors, distinguer trois catégories de pédons qui sont décrites ci-après.

5.2.1. Pédons avec changement substantiel, c.-à-d., avec changement de RSG

On discutera tout d'abord des pédons 1, 3, 6, 7, 8, 9 et 10 qui étaient des Gypsisols avant transformation de la $CE_{(1:5)}$ et dont la classification, en adoptant la $CE_{(ps)}$, a subi un revirement total dans leur typologie. Alors qu'en vérité, ces sols ne sont pas naturellement appelés à devenir des Solonchaks.

En effet, malgré que certains sols renferment des taux considérablement élevés en gypse (P6 et P7), ils ont été rangés dans les Solonchaks et ce, tout simplement, parce qu'ils justifient de la présence de l'horizon diagnostic salic dans leur niveau supérieur. Les valeurs de la $CE_{(ps)}$ y sont respectivement 20,7 et 45,9 dS.m⁻¹.

De ce fait, leur classification dans les Gypsic Solonchaks (Hypersalic, Yermic/Aridic), après conversion de la $CE_{(ps)}$, s'avère non appropriée même si techniquement, l'ajout du qualificatif principal "Gypsic", peut faire allusion à la présence de gypse secondaire, donc, à la présence d'un horizon gypsic entre 0 et 100 cm du profil, il paraît que cela ne suffit pas pour nommer ces sols et surtout en les assignant dans les Solonchaks.

Aussi, faudrait-il préciser que les caractéristiques pédologiques (forme de l'accumulation gypseuse, la texture, et l'état de surface, les dépôts éoliens, leur degré de salinité, etc.),

attestent de la différence que P6 et P7 (tableau 11) peuvent avoir, par rapport, aux critères et caractéristiques diagnostics requis par les Solonchaks.

Tableau 36 : Typologie des sols des Ziban selon la WRB (2015) après transformation des valeurs de la $CE_{(1:5)}$ en $CE_{(ps)}$

Profils	Unités typologiques de sols selon WRB (2015) avec $CE_{(1:5)}$	Unités typologiques de sols selon WRB (2015) avec $CE_{(ps)}$
1	Haplic Gypsisols (Hypogypsic, Protocalcic, Protosalic, Yermic)	Gypsic Solonchaks (Hypersalic, Protocalcic, Yermic)
2	Gypsic Solonchaks (Calcaric)	Gypsic Solonchaks (Hypersalic, Calcaric)
3	Petrocalcic Gypsisols (Endosalic, Yermic)	Petrocalcic Gypsic Solonchaks (Hypersalic, Yermic)
4	Gypsic Solonchaks (Calcaric)	Gypsic Solonchaks (Hypersalic, Calcaric)
5	Gypsic Solonchaks (Hypersalic)	Gypsic Solonchaks (Hypersalic)
6	Haplic Gypsisols (Hypergypsic, Protosalic, Yermic)	Gypsic Solonchaks (Hypersalic, Yermic)
		Haplic Gypsisols (Hypergypsic, Episalic, Yermic)*
7	Haplic Gypsisols (Hypergypsic, Calcaric)	Gypsic Solonchaks (Hypersalic, Yermic/Aridic)
		Haplic Gypsisols (Hypergypsic, Episalic, Yermic)*
8	Haplic Gypsisols (Hypogypsic, Protocalcic, Yermic)	Haplic Gypsisols (Hypogypsic, Protosalic, Protocalcic, Yermic)
9	Haplic Gypsisols (Arenic, Endosalic, Hypogypsic, Protocalcic)	Gypsic Solonchaks (Arenic, Hypersalic, Protocalcic)
	Haplic Gypsisols (Arenic, Protocalcic, Protosalic)	Gypsic Solonchaks (Arenic, Protocalcic, Protosalic)
10		

* : Les classifications proposées pour P6 et P7 parce qu'elles paraissent suffisamment compatibles aux caractéristiques de ces pédons.

De cette manière, la classification qui leur convient sort complètement du RSG des Solonchaks parce que leurs principaux aspects sont corrélés avec ceux des Gypsisols. Ce RSG leur correspond le mieux et la prévalence de gypse dans ces pédons est susceptible d'avoir un

degré d'influence assez important sur leur fonctionnement, alors que leur salinité n'y aura d'influence remarquable qu'au niveau supérieur de ce pédons. Par conséquent, la classification de ces sols peut s'écrire comme suit : Haplic Gypsisols (Hypergyptic, Episalic, Yermic).

Par ailleurs, le pédon 3 qui était un Petrocalcic Gypsisols (Endosalic, Yermic) est devenu un Petrocalcic Gypsic Solonchaks (Hypersalic, Yermic). La signification pédologique du changement de RSG pourrait être liée à la valeur de la CE ($44,6 \text{ dS.m}^{-1}$) et à la présence de la nappe relativement proche de la surface dans le site oasien M'lili 1 (tableau 11). Le qualificatif principal Petrocalcic est éloigné du nom de RSG, parce que l'accumulation gypseuse est aussi un aspect prédominant dans ce site.

5.2.2. Pédons sans modification de RSG et avec ou sans changement de qualificatifs

Il y a des pédons qui n'ont pas changé ni de RSG ni de qualificatifs (principaux) ni de sous-qualificatifs, ceux-là forment la deuxième catégorie ; la troisième porte sur les pédons qui sont restés dans le RSG "initial", mais sans qu'ils conservent leurs qualificatifs.

On a d'une part, les pédons 2, 4, 8 qui étaient des Solonchaks et leur classification après avoir converti leur salinité en $CE_{(ps)}$, a subi un changement mineur au niveau du sous-qualificatif "Hypersalic" qui est en rapport avec le degré élevé de leur salinité. Toutefois, on note que P5 est le seul sol à avoir conservé sa classification dans les Gypsic Solonchaks (Hypersalic). D'autre part, P8 qui était un Haplic Gypsisols (Hypogypsic, Protocalcic, Yermic), n'a sensiblement pas changé sauf qu'après conversion de la $CE_{(1:5)}$, le sous-qualificatif optionnel "Protosalic" lui a été ajouté.

6. Hypothèses sur les processus pédogénétiques des sols de la région d'étude

Ces hypothèses seront émises à partir des descriptions qui ont été données par différents auteurs sur les principales caractéristiques des sols des régions arides, d'une manière générale, et les réflexions qui ont été émises en ce qui concerne les facteurs de leur formation.

Il en est ressorti que les sols affectés par la présence de sels tels que le calcaire, le gypse ou les sels plus solubles que le gypse, sont les sols dont on dispose d'assez de connaissances, dans le monde, notamment sur leurs propriétés, la typologie ainsi que sur leurs problèmes et les aménagements qui leur sont recommandés. En revanche, celles dont on dispose actuellement sur les sols de la région des Ziban, sont à la fois fragmentaires et non actualisées.

Par conséquent, les données qui ont été acquises dans cette thèse, et celles rassemblées à partir de différents travaux, permettent d'affirmer que les facteurs qui ont été décrits (relief, climat, matériau parental, végétation naturelle et usages des sols, etc.) se combinent de diverses manières pour donner lieu à différents processus dominants. Il y a parmi ces processus ceux qui sont parfois restreints à l'échelle spatiale, et ceux qui présentent une large extension.

6.1. Cas des sols riches en gypse

Ces sols se développent toujours à partir de roches évaporitiques contenant du gypse ou de l'anhydrite et se forment par dissolution et redistribution de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ dans le paysage (Baize & Girard 2009) cités par Biedermann et al. (2014). En climat aride, le gypse peut se retrouver en fortes proportions, jusqu'à 80% du solum, et apparaît sous des formes très variées allant de fins cristaux à des encroûtements ou croûtes massives (sols qualifiés alors de pétrogypses).

L'accumulation gypseuse qui s'est formée dans l'horizon proche de la surface de la quasitotalité des pédons de la région d'étude, ne saurait résulter du processus de lixiviation tel que cela peut, a contrario, se produire sous d'autres conditions pédoclimatiques. Selon RPF (2008), cette accumulation issue de la lixiviation peut être observée dans les "sierozems" ou certains solums à encroûtements gypseux des régions plus humides.

L'origine du gypse en quantité importante dans les sols est en relation avec la présence de roches sédimentaires gypseuses (RPF, 2008). Le gypse étant dissous, il est transporté en solutions dans les eaux souterraines et de surface et se répartit à travers les couvertures pédologiques. Cette hypothèse pourrait concerner la plupart des sites oasiens où le gypse apparaît dans les sols sous forme de croûte et/ou d'encroûtement. C'est selon cette modalité que Otto Spaargaren (2008) et Sposito et al. (2008) ont argumenté l'accumulation du gypse secondaire surtout dans les niveaux supérieurs des sols pour donner naissance à des horizons gypsic ou petrogypsic.

La pédogénèse dans les sols du Zab occidental, semble présenter des aspects analogues avec les manifestations de gypse qui ont été décrites par Pouget (1968) et rapportées par les experts pédologues du RPF (2008), dans les sols gypseux du sud de Tunisie.

Par ailleurs, dans les sites d'El Hadjeb et Ain Ben Noui (P9 et P10), qui font partie du piémont du mont de Boughezal, la présence de quantités notables en gypse dans ces pédons aurait résulté d'une part, des eaux d'irrigation chargées en Ca^{2+} et SO_4^{2-} et d'autre part, de l'apport éolien de cet élément sous forme solide.

L'encroûtement de surface soumis à l'action d'une nappe phréatique "actuelle" se consolide et forme une croûte de nappe. La pré-existence d'un horizon plus limoneux et gypseux favorise cette évolution (Pouget, 1968).

Le gypse est lessivé de la couche supérieure du sol durant les mois d'hiver humides. Le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) se déshydrate pendant les étés chauds et secs des régions arides, se transformant en un hémihydrate ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$) sous forme poudreuse et lâche, qui se retransforme ensuite en gypse au cours de l'hiver humide. Les cristaux de gypse ainsi créés peuvent se regrouper pour former des couches compactes ou des croûtes superficielles pouvant atteindre plusieurs dizaines de centimètres d'épaisseur (Asmamaw Ketema Gizaw, 2024).

6.2. Cas des sols salés renfermant le calcaire et le gypse

La distribution du carbonate de calcium et du gypse dans un même profil de sol a été étudiée par plusieurs auteurs dont Boyadgiev (1974) ; Herrero et Boixadera (2002) ; Florea et Al-Joumaa (1998) et Abdelfattah (2007) ; il a été remarqué que lorsque le taux de gypse augmente, celui du calcaire diminue et inversement.

L'étude microscopique en zone aride de l'Algérie faite par Halitim et Robert (1987), montre un envahissement de l'accumulation calcaire par le gypse avec une désintégration et une dilution au niveau de calcaire. Ce phénomène a été attribué par ces auteurs à la pression de cristallisation du gypse qui détruit les individualisations calcaires par suite de l'arrivée continue des solutions sulfato- calciques, et leurs précipitations à ce niveau.

L'accumulation simultanée des sels de CaCO_3 et de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, dans la majorité des pédons de la région du Zab occidental, excepté P7 (sud de Tolga) qui est exclusivement dominé par l'encroûtement gypseux, peut être liée à des dynamiques qui sont tributaires du comportement chimique de ces deux sels et de l'effet du climat. Le climat et la solubilité de ces éléments sont les facteurs essentiels des processus ayant permis leurs accumulations respectives dans ces sols. En effet, Wigley (1973) et Casby-Horton et al. (2015) estiment que lors de l'évaporation d'une solution contenant Ca^{2+} , CO_3^{2-} et SO_4^{2-} , le CaCO_3 précipite jusqu'à ce que la saturation en gypse soit atteinte. Ensuite, le carbonate de calcium et le gypse précipitent simultanément, et la composition de la solution reste inchangée. La co-précipitation du gypse et de la calcite est inévitable, notamment, si une solution est évaporée jusqu'à ce qu'à l'assèchement de celle-ci, et ce malgré que le précipité initial soit un minéral unique.

En raison de la migration des eaux souterraines salines vers le haut, le gypse et la calcite sont des minéraux moins solubles (calcite), le minéral le moins soluble (calcite) précipite en

premier, puis la précipitation simultanée des deux minéraux se produit. Le gypse étant plus soluble, il peut se déplacer sur une plus grande distance dans la solution du sol et se précipite près de la surface du sol ou à l'intérieur du profil.

La séquence inverse (mode descendant) peut également se produire (FAO, 1990 ; Mermut, 2005) et est attribuée à la lixiviation. Cependant, il semble que dans des conditions arides, la lixiviation ne se produise pas sauf dans certaines dépressions fermées.

La dissolution et la précipitation de la calcite (CaCO_3), dans les sols de la région d'étude peut être un processus caractéristique de tous les pédons, même ceux qui n'en contiennent que des taux faibles ou infimes tels que les pédons P5, P6, P7 et P8. Ce processus pédogénétique est qualifié par Otto Spaargaren (2008), de fondamental et commun aux sols calcaires. Cet auteur précise que ce processus se produit par la décalcification partielle ou totale de l'horizon de surface et la reprécipitation de la calcite dans un horizon d'accumulation en profondeur. L'érosion ou les activités des animaux fouisseurs peuvent conduire à une homogénéisation des carbonates dans le profil, de sorte à réintroduire la calcite dans l'horizon de surface.

Dans les endroits qui se situent à faible altitude et ne présentant pas d'exutoire tels que le l'une des dépressions situées au sud des oasis de Tolga (Bordj Ben Azouz) et les oasis de Lioua qui sont sillonnées par l'Oued Djedi, les eaux provenant soit des crues, soit de d'eau d'irrigation qui est livrée en excès, s'évaporent à l'intérieur de ces oasis et des reliefs fermés qui font partie de ce paysage ; l'accumulation des sels dissous augmente dans ces sites. De la même manière, les sels auraient pu s'accumuler dans l'oasis d'Oumache (P5) ; la salinisation secondaire a pris de l'ampleur dans ce site. D'après FAO (2001), le dépôts des sels dans les zones situés dans le bas fond du paysage, a été décrit comme suit : **i)** tout d'abord, CaCO_3 et MgCO_3 précipitent sous forme de calcite, d'aragonite ou de dolomite ; **ii)** et à mesure que la solution se concentre, le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) se sépare (par dépôt); **iii)** et plus tard encore, lorsque le lac ou la dépression deviennent presque secs, l'halite (NaCl) et d'autres sels très solubles, se déposent à leur tour.

7. Essai d'application des concepts de "Soil genoforms" et Soil phenoforms"

Bien que le concept original des phénotypes soit basé sur les différences physiques du sol, certaines différences chimiques du sol causées par la gestion au sein d'un génotype peuvent affecter la fonction du sol (McBratney et al., 2014). Certaines d'entre elles induisent également d'importantes différences physiques, par exemple l'utilisation continue d'eau d'irrigation à forte concentration de Na^+ entraînant une défloculation et une modification de la

structure, ou l'ajout, à long terme, de compost ou de fumier entraînant des concentrations plus élevées de M.O et une modification de la structure du sol (Rossiter et Bouma, 2018).

Ces phénomènes seraient inclus dans le concept original de phénoforme, puisque les effets physiques seraient évidents. Cependant, certaines différences chimiques apportées par la gestion n'affectent pas les propriétés physiques mais affectent la fonction du sol, par exemple la pollution par les métaux lourds ou la saturation en phosphore due à la fertilisation. Ces changements sont inclus dans le concept de phénoforme.

Concernant les UTS ou pédons de la typologie de 1991, de la région d'étude au niveau desquels on va essayer de déterminer les changements des propriétés dynamiques des sols (structure, salinité, MO, et pH), suite à la mise en exploitation, on a pu distinguer les types de sols suivants :

Pour les **Gypsisols**, il y a :

- ❖ Les Haplic Gypsisols (Hypergyptic) représentés par P3-91 et P9-91.
- ❖ Les Calcic/Petrocalcic Gypsisols (Hypergyptic) dans les pédons 1-91, 2-91 et 8- 91 ;

Pour les **Solonchaks**, on a :

- ❖ Les Gypsic Solonchaks (Hypergyptic) dans P6-91;
- ❖ Gypsic Solonchaks (Episalic, Yermic) dans P7-91 ;
- ❖ Petrocalcic Solonchaks (Gypsiric) dans P4-91 ;
- ❖ Calcic Gypsic Solonchaks (Hypersalic) dans P11-91.

Il faut noter que sur le plan spatial, c'est-à-dire, position géographique des profils étudiés en 1991 et ceux de l'étude de 2021, certains profils, même s'ils n'ont pas les mêmes coordonnées, ils s'inscrivent au moins au sein de la même UTS. La comparaison des types de sols est effectuée avec une salinité déterminée par l'extrait dilué (CE 1:5) une salinité de pâte saturée (CE_{ps}) obtenue selon l'approche de conversion.

a) Cas de P11-91 : Calcic Gypsic Solonchaks (Hypersalic) comparé avec P5-21. Gypsic Solonchaks (Hypersalic) ; le résultat est un 'soil phenoform' au niveau de P5-21, les changements qui auraient affecté l'UTS représentée par P11-91 consistent en la disparition d'un des qualificatifs principaux qui est lié à la présence de carbonates secondaires (absence de l'horizon diagnostic **calcic**) ; dans le reste, le sol est affecté par la salinité avec un horizon diagnostic gypsic [Gypsic Solonchaks (Hypersalic)]. La CE_{ps} se situe entre 30 et 60 dS.m⁻¹.

b) Cas de P8-91 : il s'avère également que P8-91 a subi un changement ; il était Petrocalcic Gypsisols (Hypergyptic) il est spatialement proche de P7-21 et se trouve dans la même UTS que 1-91 et 2-91, il devient après transformation de la CE 1:5 un Gypsic Solonchaks (Hypersalic, Yermic/Aridic). Mais, en réalité, vu ses caractéristiques pédologiques actuelles, il est possible de le classer dans Haplic Gypsisols (Hypergyptic, Episalic, Yermic), au lieu de le ranger dans les Solonchaks. L'évolution qui aurait marqué ce pédon (P8-91) correspond à la caractéristique de salinité qui apparaît au niveau de l'horizon superficiel, d'où le sous-qualificatif 'Episalic'. L'horizon diagnostic calcic qui a été détecté entre 0-90 cm en 1991, n'est pas décelable en 2021. En conséquence, P7-21 peut être assimilé à un 'Soil phenoform' dont les propriétés auraient résultées de l'anthropisation.

Dans un autre contexte, Fernandez (2007) a constaté que deux 'Soil phenoforms' s'étaient développés à partir d'un Cambisol ; l'utilisation distincte des terres (prairie et sol cultivé, amendé et labouré chaque année sur 0-30 cm) pendant 100 ans, a produit deux phénotypes de sol, différant principalement par l'incorporation de la M.O et l'agrégation du sol. L'agrégation du sol, attribuée en partie à une végétation et à un enracinement différents, mais plus particulièrement à une activité des vers de terre nettement différente.

Dans un contexte pédoclimatique similaire à celui de la région des Ziban, plus précisément, dans les oasis de Zelfana (Ghardaia), Benslama et al. (2020) ont précisé qu'un Arenosol s'est transformé, après une longue période d'utilisation agricole, en Anthrosols. A notre avis, cette évolution pédogénétique est à un degré avancé d'anthropisation. L'implication de ce changement réside dans le changement de RSG. L'Anthrosol correspond, donc, au nouveau type de sol, c-à-d, au 'Soil genoform', mais pas au 'Soil phenoform'.

Le monitoring des sols de cette partie occidentale des Ziban est donc nécessaire pour pouvoir mettre en évidence l'impact des pratiques de gestion (irrigation, fertilisation, amendement organique, etc.) de ces oasis sur leurs caractéristiques, leur pédogenèse, la typologie, et notamment sur le développement de deux principaux phénomènes :

- i)** la salinisation secondaire ;
- ii)** et l'accumulation des eaux d'irrigation dans les zones de dépressions.

La viabilité des écosystèmes oasiens peut être un enjeu important si de telles menaces venaient s'exacerber aux termes d'une mise en culture sans précédent des sols.

Conclusion générale

La caractérisation des sols de la région des Ziban, l'identification de leur typologie et le monitoring des changements qui pourraient se produire suite à leur mise en culture, soit au niveau des différents types des sols, des processus de pédogenèse, soit de point de vue de leur gestion et les risques de leur dégradation, étaient des aspects qui ont été développés dans cette thèse.

Le diagnostic établi en 1991 sur l'état des sols dans la région de Ain Ben Noui, El Hadjeb et les secteurs environnants, a permis remarquer qu'après avoir actualisé la typologie de ces sols pour avoir une visibilité assez cohérente sur celle-ci, notamment en comparant aux nouveaux standards d'identification des sols qui ont été émis par la classification WRB (2015).

Après cette mise à jour, il a été constaté que les **Gypsisols** (Calcic Gypsisols et Haplic Gypsisols (Hypergypsic)) sont abondants en occupant les 2/3 des 12 UCS dont les résultats sont présentés dans ce travail. Ces sols étaient en général non cultivés sauf dans les profils des UTS 3 et 5 qui avaient été implantés au sein des palmeraies. Le profil de ces sols est type A-CCs ; le taux de gypse arrive jusqu'à 90% et le CaCO_3 se concentre presque en surface du sol pour le premier type des Gypsisols et en profondeur pour le second type. Tandis que la salure de ces sols est modérée dans les Calcic Gypsisols et très accentuée dans les niveaux moyens des profils des Haplic Gypsisols (Hypergypsic). La structure dans ces deux de sols gypseux, est particulière en surface et massive dans les horizons de profondeur.

Les Solonchaks qui ont été rencontrés dans cette partie des Ziban (UTS 4, 6 et 11), ne représentent que le tiers des 12 UCS ; ils ont été subdivisés en 3 variantes : **i)** des Solonchaks qui avec un profil de type A-CSa (P11) où la salure est excessivement élevée avec une répartition quasiment uniforme le long du profil rencontré; les valeurs de la CE se situent, respectivement, entre 31 et 37 dS.m^{-1} , dans l'horizon A et dans les horizons de profondeur. Les quantités de CaCO_3 y sont indéniables et se sont traduites par la présence de l'horizon calcic. En plus de la salinité et des carbonates, le gypse avec des taux atteignant 79 %, envahit toutes les couches du sol et confère à ces Solonchaks une propriété importante à leur fonctionnement. **ii)** Des Solonchaks combinant entre 2 aspects (P6) : la salinité et le gypse qui pourraient dominer l'évolution de ces sols. Le profil est de type A-CCs ; la salinité est élevée en surface (31 dS.m^{-1}) et en subsurface (11 dS.m^{-1}). Le CaCO_3 est présent en des quantités faibles. Les combinaisons des horizons dans les profils étudiés sont, en général, de type A-C-R ; cette séquence est valable pour la plupart des profils à l'exception de P6 (sud-est

de l'ITDAS) et P11 (nord Oumache) dont les séquences d'horizons sont différentes et apparaissent comme suit : A-Cg-R et A-Csa-R.

iii) Le troisième type de profil (P4) est celui qui correspond à des Solonchaks avec un profil présentant des tâches de pseudo-gley (A-Cg) qui traduisent des conditions d'hydromorphie circonscrites à une échelle locale (sud-est d'El Hadjeb). Ce profil qui combine entre trois aspects : la salinité, le gypse et le calcaire, aussi bien que le processus d'hydromorphie et même d'alcalinisation (pH : 8- 8,3), comme éléments pouvant avoir une influence certaine sur son évolution. La salinité est élevée dans ce profil et elle oscille entre 10,73 et 22,62 dS.m⁻¹. Dans ce type de Solonchaks, la présence simultanée des horizons diagnostics calcic, gypsic et salic en plus des processus d'hydromorphie et d'alcalinisation, qui s'y développent, est révélatrice de conditions pédologiques particulièrement défavorables à la mise en culture.

Au volet de la caractérisation des sols qui a eu lieu en 2021, dans cette partie des Ziban, les résultats ont montré que la réaction du sol est généralement alcaline et est prononcée dans les pédons 5 et 7 avec des valeurs comprises entre 8 et 8,56. La salinité de l'extrait 1 :5 des sols est variable dans les deux toposéquences ; le degré de salinité des oasis est élevé dans les sites d'El Hadjeb et est extrêmement fort dans le P5 (30 dS.m⁻¹) correspondant à l'oasis d'Oumache. Les sols à faible salinité sont généralement localisés dans les sites à très faible teneur en CaCO₃ associés à des dépôts de gypse sous forme de croûte. Il faut noter que les oasis à faible salinité sont généralement des sites à très faible teneur en CaCO₃ associés à des dépôts de gypse sous forme de croûte. Il a été constaté que le problème de salinisation affecte les agroécosystèmes situés dans les zones de dépressions (P3, P4 et P5) qui sont moins favorables au drainage.

Le faciès chimique de la solution des sols est hyper-chloruré calcique et hyper-sulfaté calcique. Le faciès chloruré sulfaté ($0,5 < \frac{Cl}{SO_4} < 1$) caractérise à la fois les Solonchaks (P2, P4 et P5) et les Gypsisols (P1, P3, P9 et P10). Le faciès chimique de type sulfaté chloruré ($1 < \frac{Cl}{SO_4} < 5$) est caractéristique des pédons 1, 2, 4, 5 et 7 qui représentent les Solonchaks (P2, P4 et P5) et les Gypsisols avec encroûtement gypseux (P7H1). La texture des sols est dominée par la fraction sableuse ; les taux des limons et argiles sont réduits et ne dépassent pas 30%. La MO est très faible dans tous les sites étudiés et reste en deçà de 2%.

La détermination de la typologie des sols, en 2021, dans les 10 sites d'agroécosystèmes du Zab occidental, selon les deux systèmes de classifications, WRB (2015) et Soil Taxonomy (2014), a mis en évidence la présence de deux principaux RSGs : Les Gypsisols et les

Solonchaks. Le RSG des Solonchaks a été identifié sur la toposéquence 1, dans 3 sites qui font partie du bassin versant de l'oued Djedi. Les types de ce RSG sont : Gypsic Solonchaks (Calcaric) représenté par P2 et P4 et le Gypsic Solonchaks (Hypersalic) dans P5 (site d'Oumache).

Par contre, les sols du deuxième RSG (Les Haplic Gypsisols) occupent 70% des sites étudiés ; en fonction des qualificatifs qui décrivent l'accumulation de gypse secondaire, deux catégories ont été définies : Haplic Gypsisols (Hypogypsic) dans P8 situé à Ain El Kerma, Haplic Gypsisols (Hypergypsic) dans P6 et P7). Le qualificatif Arenic a été appliqué à ces Gypsisols pour désigner les sols formés sur le piémont du mont de Boughezal sur un matériau pédologique riche en dépôts éoliens.

La comparaison des typologies obtenues dans les deux systèmes de classification a montré que les Gypsids sont bien corrélés avec le RSG des Gypsisols et les Salids avec les Solonchaks. Par ailleurs, il a été remarqué que dans la WRB (2015), les P6 et P7 prennent le même sous qualificatif 'Hypergypsic' qui renseigne uniquement sur le taux important de gypse. Par contre, pour la Soil Taxonomy (2014), un critère diagnostic de taille a été introduit pour différencier entre les pédons 6 et 7 de par la morphologie du gypse; dans P7, il y a eu développement d'un horizon petrogypsic dû à la présence d'une croûte de gypse compacte, tandis que dans P6 même si le taux de gypse est élevé, l'aspect friable de ce matériau permet seulement de déceler un horizon gypsic.

Si dans la Soil Taxonomy (2014), 60% des sites oasiens (P1, P2, P3, P4, P6 et P8), sont considérés comme des Haplogypsids, il y a, au sein de ces sols, ceux qui sont considérés par la WRB (2015), comme des Solonchaks (P2 et P4). Ce même système a eu également le mérite d'avoir inclus, au sein de ce lot (60%), des Gypsisols (P1, P3, P6 et P8) qui développent des aspects 'mineurs' tels que la salinité et la présence de CaCO_3 mais, sans qu'il y ait à satisfaire, respectivement, les critères des horizons salic et calcic.

Les sols d'apports éoliens (P9 et P10) ont été classés différemment dans les deux systèmes ; pourtant, ils renferment des taux de gypse visiblement importants. Ces sols correspondent aux Entisols (Typic Torripasamments) dans la Soil Taxonomy (2014), mais dans la WRB (2015), ils sont plutôt assimilés à des Gypsisols et le sous-qualificatif qui est lié à l'accumulation éolienne 'Arenic' a été mis dans un premier ordre avant tout autre qualificatif (Protosalic, Protocalcic, Endosalic, Hypogypsic). Les deux systèmes de classification des sols sont jugés adéquats pour la détermination de la typologie des sols des agroécosystèmes oasiens. Bien qu'il soit évident que la WRB montre plus de compatibilité aux sols de cette région aride, parce qu'elle fournit d'amples détails sur les processus qui peuvent affecter le fonctionnement

des sols, mais, ces deux systèmes doivent être appliqués de manière conjointe pour identifier avec plus de précision la pédodiversité dans cette région des Ziban.

La conversion de la salinité ($CE\ 1:5$) vers la salinité de l'extrait de pâte saturée ($CE_{(ps)}$) a eu une grande incidence sur la diversité typologique des sols dans la région d'étude. Il a été noté que 60% des pédons ont subi un changement majeur dans leur classification ; ces sols étaient identifiés en tant que Gypsisols, après transformation de la salinité, ils deviennent des Solonchaks, parce qu'ils ont justifié de la présence de l'horizon salic. Il a été également conclu que pour le reste des pédons (P2, P4 et P8) qui représentent le RSG des Solonchaks, ils ont subi un changement mineur au niveau du sous-qualificatif. Il n'y a que P5 qui est conservé sa classification en tant que Gypsic Solonchaks (Hypersalic). La surestimation de la salinité des sols du Zab occidental par le modèle de prédiction conduit à envisager la proposition d'une méthode de prédiction qui tiendrait compte des caractéristiques pédologiques particulières des sols des Ziban.

Le monitoring des changements d'usages et les changements affectant les propriétés et même la typologie des sols, aux termes des dynamiques que les agroécosystèmes avaient connues subis au cours des 30 dernières années, ont globalement révélé les résultats suivants :

- Concernant le problème de dégradation des sols de ces agroécosystèmes, il a été conclu que la salinisation secondaire est le principal processus qui prédomine dans les oasis de Tolga et ses environs ; ce problème touche également les oasis d'Ourlal 2 (P2-21) et de M'lili 2 (P4-21). La forte anthropisation de ces milieux est la cause de l'accroissement de ce problème. En effet, l'absence de réseau de drainage dans la majorité des palmeraies ou son dysfonctionnement, l'excès d'eau d'irrigation, sa qualité ainsi que l'augmentation des surfaces cultivées au fil de ces trois décennies, ont mis en péril beaucoup de ces agroécosystèmes.
- La dynamique des sables est aussi un phénomène qui touche plusieurs sites dont les oasis situées sur le flanc sud de Djebel Boughezel. Les particules des dépôts éoliens (P9-21 et P10 -21) sont de diverses natures, mais, elles contiennent du gypse.
- La dynamique du gypse ainsi que celle du calcaire et des sels plus solubles que le gypse sont régies d'une part, par les eaux de la nappe proche de la surface (Oumache et M'lili), et d'autre part, par les eaux d'irrigation. Le phénomène d'évapotranspiration déjà élevé dans les oasis des Ziban, surtout en été, contribue à cette dynamique en favorisant la remontée des sels et leur précipitation à différents niveaux des profils.
- Les cartes d'estimation du changement d'indice de végétation (Landsat 5, 1991 et Landsat 8, 2021) montrent que le changement d'usage des sols est apparent ; un déclin de la

végétation due essentiellement à la régression des jardins de palmiers dattiers dans le sud de Tolga et dans les sites de M'lili et Oumache. Le manque d'eau, le vieillissement des vergers ou l'accroissement de la salinité des sols seraient la cause du dépérissement des oasis dans ces endroits. Dans d'autres secteurs, l'indice de végétation qui a été révélé par l'image Landsat 8 et celle estimant le changement entre 1991 et 2021, indiquent que de nouveaux espaces oasiens ont été créés, plus précisément à El Hadjeb, à l'est de M'lili, nord Tolga et le sud de Lichana.

En perspective,

La diversité des sols a été influencée par l'évolution des conditions environnementales résultant du changement climatique et également de l'activité humaine. Le Monitoring de ces agroécosystèmes a permis de constater que la salinisation est un phénomène qui peut encore évoluer compte tenu de la surexploitation de ces milieux ; l'érosion éolienne est également une menace à prendre en compte. De ce fait, les recommandations suivantes peuvent être proposées pour éviter les conséquences de ces deux problèmes sur les plans environnemental, économique et sociétal :

- La durabilité de ces agroécosystèmes repose sur la nécessité d'améliorer, voire de modifier, les pratiques spécifiques de gestion des sols (irrigation, drainage, cultures sous-étages), en vue d'assurer la sécurité alimentaire à long terme dans la région des Ziban.
- Il est également essentiel de passer progressivement à des techniques agroécologiques afin de maintenir la capacité de production de ces systèmes séculaires.
- Il est conseillé aux agriculteurs de mettre en œuvre des méthodes d'agriculture de conservation, notamment en utilisant moins d'intrants, en adoptant une gestion efficace de l'eau, en augmentant les protections contre l'érosion éolienne et en cultivant des plantes de couverture du sol pour réduire l'évaporation.
- L'application des concepts de 'Soil genoforms and Soil phenforms' peut aider à déterminer les types de changements affectant les sols et à apprécier leur impact sur les propriétés dynamiques du sol et sur les fonctions de celui-ci, notamment, dans le contexte des écosystèmes fragiles, très dynamiques et anthropisés comme ceux des Ziban.
- Afin de mieux évaluer le risque de salinisation et ses répercussions sur la durabilité de l'écosystème oasien dans cette région, nous prévoyons d'améliorer l'approche de monitoring actuelle avec une analyse géostatistique et des séries temporelles, et d'inclure d'autres sites oasiens.

Références bibliographiques

1. Abdelfattah, M.A., and S.A. Shahid. (2007) "A comparative characterization and classification of soils in Abu Dhabi Coastal Area in relation to arid and semi-arid conditions using USDA and FAO soil classification systems". *Arid Land Research Management*. 21(3):245– 271. Available at: DOI: 10.1080/15324980701426314
2. Abdelhafid, Y., Rechachi, M.Z. and Halitim, A. (2019) "Caractérisation géochimique des eaux d'irrigation de la palmeraie d'Oumache (oasis des Ziban, sud-est de l'Algérie) [Geochemical characterization of the irrigation water of Oumache's palm grove (Ziban oasis, South-eastern Algeria)]," *Revue des sciences de l'eau*, 32 (1), pp. 69–81. Available at: <https://doi.org/10.7202/1059881ar>.
3. 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 / Journal of Water Science*, 32(1), 69–81. <https://doi.org/10.7202/1059881ar>
4. Abdesselam, S. (1991) Contribution à l'étude des sols à accumulations gypseuses de la région de Ain-Benoui (Biskra). Essai sur la micromorphologie des sols [Contribution to the study of gypsumaccumulated soils in the Ain Ben Noui region (Biskra). Essay on soil micromorphology]. B.Agr. Thesis. Batna: Univ. of Batna.
5. Abdesselam, S. and Timechbache, M.L. (2016) "Sur la nature et l'origine de la croute gypseuse dite «deb deb» dans les palmerais de l'ouest des Ziban [On the nature and origin of the "deb deb" gypsum crust in the western Ziban palm groves]," *Algerian Journal of Arid Environment*, 6 (1), pp. 87–95.
6. Adel M. A. Zayed, Mamdouh, K. Abdel Ghaffar, Faiza S. Ali, Esmail H. Ewida (2023). A pedological study attempting to combine Soil Taxonomy and WRB classification systems *Journal of Water And Land*
7. G. M. Afrasinei, "Study of land degradation and desertification dynamics in north Africa areas using remote sensing techniques," PhD Thesis, Univ. of Cagliari, 2016, 187 p.
8. Afrasinei, G.M. et al. (2017a) "Assessment of remote sensing-based classification methods for change detection of salt-affected areas (Biskra area, Algeria)," *Journal of Applied Remote Sensing*, 11(1), 016025. Available at: <https://doi.org/10.1117/1.JRS.11.016025>.
9. Afrasinei, G.M. et al. (2017b) "Classification methods for detecting and evaluating changes in desertification-related features in arid and semiarid environments," *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 2(1), 14. Available at: <https://doi.org/10.1007/s41207-017-0021-1>.
10. G. M. Afrasinei et al., "Classification Methods for Detecting and Evaluating Changes in Desertification-Related Features in Arid and Semi-arid Environments," *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*—Springer, vol. 21, 2017.
11. G. M. Afrasinei, M. T. Melis, C. Buttau, J. M. Bradd, C. Arras, and G. Ghiglieri, "Assessment of remote sensing-based classification methods for change detection of salt-affected areas (Biskra area, Algeria)," *Journal of Applied Remote Sensing*, vol. 11, no. 1, p. 16025, 2017.
12. Afrasinei, G.M. et al. (2018) "Spatiotemporal and spectral analysis of sand encroachment dynamics in southern Tunisia," *European Journal of Remote Sensing*, 51(1), pp. 352–374. Available at: <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1439343>.
13. Aidaoui, S. 1994. Ressource en eau et aménagement hydro-agricole dans la région de Biskra (Ziban), Algérie. Thèse Doct. Université Nancy 2. Available at: <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01776612> (Accessed: 24-04-2018).

14. ANAT-2003 – Agence Nationale d'Aménagement du Territoire (2003) *Schéma directeur des ressources en eau dans la wilaya de Biskra*. Rapport de Synthèse, ANAT, Biskra, Algérie, 100 p.
15. Andrade Foronda, D.; Colinet, G. 2023. ‘‘Prediction of Soil Salinity/Sodicity and Salt-Affected Soil Classes from Soluble Salt Ions Using Machine Learning Algorithms’’. *Soil Syst.* 2023, 7, 47. Available at : <https://doi.org/10.3390/soilsystems7020047>
16. Askri, B., et Bouhlila, R. 2010. Evolution de la salinité dans une oasis moderne de la Tunisie. *Etude et Gestion des Sols*, Volume 17, 3-4, 197-212.
17. Aubert G. 1962. « Les sols de la zone aride: étude de leur formation, de leurs caractères, de leur utilisation et de leur conservation ». In : Les problèmes de la zone aride, colloque Unesco (1960): 127-150
18. Aubert, G. 1976. Les sols sodiques en Afrique du Nord. *Annuaire de l'I.N.A El Harrach*, Alger Vol VI, n°1, pp: 185-196
19. Aubert, G. 1983. Observations sur les caractéristiques, la dénomination et la classification des sols salés ou salsodiques. *Cah. ORSTOM.Vf., Ser. Pédol.*, vol. XX, (1), 73-78.
20. Ayers, R.S., Wescott, DW. 1985. La qualité de l'eau en agriculture. *Bulletin FAO d'irrigation et de drainage*, n° 29, Édit. FAO, Rome, 174 p.
21. Azizi, P. et al. 2011. ‘‘Morphological, physico-chemical and clay mineralogy investigation on gypsiferous soils in Southern of Tehran, Iran,’’*Middle-East Journal of Scientific Research*, 7 (2), pp. 153–161. Available at: [http://idosi.org/mejsr/mejsr7\(2\)11/5.pdf](http://idosi.org/mejsr/mejsr7(2)11/5.pdf)
22. Aznar, J.M., Poch, R.M. and Badía, D. 2013. ‘‘Soil catena along gypseous woodland in the middle Ebro Basin: Soil properties and micromorphology relationships,’’*Spanish Journal of Soil Science*, 3(1), pp.28–44. Available at: <https://doi.org/10.3232/SJSS.2013.V3.N1.01>.
23. Baize D. 1988. - Guide des analyses courantes en Pédologie. *Édit. INRA*, 172 p.
24. Baize, D. 2021. Naissance et évolution des sols. La pédogenèse expliquée simplement. Versailles : Éditions Quae, 160 p. 9782759232642. hal-03612268
25. Bakhti, D., Oustani, M., Halilat, M. T., Zemour, H., Khadoumi, A., & Belhouadjeb, F. A. (2024). Correlation between electrical conductivity in saturated paste extracts and different diluted extracts (1/2.5, 1/5) of coarse-textured soils from the Djamâa Palm Grove in the Oued Righ Valley (North Saharan-Algerian). *Journal of Agriculture and Applied Biology*, 5(1): 18 - 34. doi: 10.11594/jaab.05.01.02
26. Barakat, H.N. Arid lands: Challenges and hopes. In *Earth System: History and Natural Variability-Vol. III*; EOLSS publishers/UNESCO: Oxford, UK, 2000
27. Başaran M, Uzun O, Kaplan S, Görmez F, Erpul G (2017) Tillage-induced wind erosion in semi-arid fallow lands of Central Anatolia Turkey. *Soil and Water Research* 12: 144-151. Link: <https://bit.ly/3xTfdXy>
28. Bashour, I. and Sayegh, A. (2007) *Methods of analysis for soils of arid and semi-arid regions*. Rome: FAO. Available at: <https://msibsri4313.wordpress.com/wp-content/uploads/2013/11/methods-of-soil-analysis-for-arid-semiarid-regions.pdf>
29. Belghemmaz, S. (1991) Contribution à l'étude des sols à accumulations gypseuses de la région de Ain Ben Noui (BISKRA). Essai sur la minéralogie des sols. Thèse Ing., INES Agro., 84 p.
30. Belghemmaz, S. et al. (2018) ‘‘Assesment of land degradation related to groundwater irrigation of oasis environments. Case study: The Ziban (Biskra), Algeria,’’*EMCEI 2017. Advances in Environmental Science from the Euro-Mediterranean and Surrounding Regions. Technology & Innovation. Proceedings of Euro-Mediterranean Conference for Environmental Integration (EMCEI-1)*, Sousse, Tunisia 22–25 Nov 2017. Cham: Springer, pp. 1289–1290. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-319-70548-4_378.
31. Belghemmaz S., Fenni M., Chomontowski Chrystian, Louadj Y., Gabriela, A.M., Degui, N. 2024a. Typology characterisation and monitoring of arid soils in an agroecosystem environment: Case of Ziban oasis, Algeria. *Journal of Water and Land Development*. 2024, No. 61 (IV–VI): 213–226. DOI: 10.24425/jwld.2024.150275

32. Belghemmaz, S., Fenni, M., Louadj, Y., Gabriela, A.M., Degui, N., Soualili, N.E. (2024b). Soil Monitoring and Pedological Typology of Oasis Agroecosystems in the Ziban Region (Algeria). In: Ksibi, M., *et al.* Recent Advances in Environmental Science from the Euro-Mediterranean and Surrounding Regions (4th Edition). EMCEI 2022. Advances in Science, Technology & Innovation. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-51904-8_144
33. Benhamida S, Fedal M., (2008). Inventaire des points d'eau et enquêté sur les débits extraits de la wilaya de Biskra. Agence Nationale Des Ressources Hydrauliques. Direction régionale Sud-Ouargla.
34. Bensaid, R. 1999. "Les sols à accumulation gypso-calcaires de la région de Ain Ben Noui (Biskra) Annales de l'Institut National Agronomique El Harrach, 20(1–2), pp. 1–8.
35. Benslama A., Khanchoul K., Benbrahim F., Boubehziz S., Chikhi F. and Navarro-Pedreño J., Monitoring the Variations of Soil Salinity in a Palm Grove in Southern Algeria. *Sustainability* **2020**, 12, 6117; doi:10.3390/su12156117
36. Benzouiche, S. and Chehat, F. (2010) "La conduite du palmier dattier dans les palmeraies des Ziban. (Algérie) Quelques éléments d'analyse. European Journal of Scientific Research, 42 (4), pp. 644–660. Available at: https://www.doc-developpement-durable.org/file/Culture/Arbres-Fruitiers/FICHES_ARBRES/Palmier-dattier/La%20Conduite%20du%20Palmier%20Dattier%20Dans%20les%20Palmeraies_Algerie.pdf.
37. Benzouiche, S.E. 2017. "L'agriculture biologique, un outil de développement de la filière dattes dans la région des Ziban en Algérie, Cahiers Agricultures, 26(3), 35008. Available at: <https://doi.org/10.1051/cagri/2017025>.
38. Bessaoud, O. et al. 2019. Rapport de synthèse sur l'agriculture en Algérie. CIHEAM-IAMM, ffhal-02137632ff. Available at: <https://hal.science/hal-02137632/document>
39. S. Blaire. "1. An Introduction to Arid Soils and Their Biology". The Biology of Arid Soils, edited by Blaire Steven, Berlin, Boston: De Gruyter, 2017, pp. 1-14. <https://doi.org/10.1515/9783110419047-001>
40. Blanco-Canqui H, Lal R (2009) Crop residue removal impacts on soil productivity and environmental quality. *Critical reviews in Plant Science* 28: 139-163. Link: <https://bit.ly/3iSRiDB>
41. Bockheim, J.G. et al. (2014) "Soil-forming factors and Soil Taxonomy," *Geoderma*, 226–227, pp. 231–237. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.02.016>.
42. J. Boulaine (1975). Géographie des sols. Presse Univ. de France, 1ère édi., 23p.
43. Boudibi S. (2021). Modeling the Impact of Irrigation Water Quality on Soil Salinization in an Arid Region, Case of Biskra. Thèse Doct. Univ. Mohamed Kheider, Biskra, 135 p.
44. Boumessenegh A. (2007) : Les inondations dans la ville de Biskra : Causes et Impacts. Magister de l'université Hadj Lakhdar de Batna. 202 p.
45. Bouma, J., Droogers, P., 1999. Comparing different methods for estimating the soil moisture supply capacity of a soil series subjected to different types of management. *Geoderma* 92 (3–4), 185–197. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(99\)00027-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(99)00027-0)
46. Boumaraf, B. 2013. Caractéristiques et fonctionnement des sols dans la Vallée d'Oued Righ, Sahara Nord Oriental, Algérie. Thèse Doctorat Univ. Reims, 108 p.
47. Bouziane M. T. et Labadi A. (2009). Les Eaux Profondes de la Région de Biskra (Algérie) *European Journal of Scientific Research*, ISSN 1450-216X Vol.25 No.4 (2009), pp.526-537
48. Boyadgiev, T.G. and Verhey, W.H. (1996) "Contribution to a utilitarian classification of gypsum in soils," *Geoderma*, 74, pp.321–338. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(96\)00074-2](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(96)00074-2).
49. Brady, Nyle C., The nature and properties of soils, 13th edition. Columbus: Pearson, 1984. Macmillan Publishing Company: S591.B79 1964 631.4 83-19545, ISBN 0-02-313340-6 (Hardcover Edition) ISBN 0-02-946030-1 (International Edition), 780 p.
50. Broll, G., Brauckmann, H.-J., Overesch, M., Junge, B., Erber, C., Milbert, G., Baize, D., Nachtergaele, F., 2006. Topsoil characterization—recommendations for revision and expansion of the FAO-Draft (1998) with emphasis on humus forms and biological features. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 169 (3), 453–461.

51. Bronick CJ, Lal R. Soil structure and management: a review. *Geoderma* 2005, 124:3–22
52. S.W. Buol and H. Eswaran (1999) Oxisols. *Advances in Agronomy*, Volume 68, 151–195, 0065-2113. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60845-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60845-7)
53. Canton Y. et al. (1996) “Relationships between pedogenesis stages and hydro-pedological properties on gypsiferous mudstone in the Tabernas desert (SE Spain),” in *Proceedings of the International Symposium on soil with gypsum*, Lleida, Catalonia, Spain 15–21 Sep 1996.
54. Canton Y., A. Sole A., Benet R. Lazaro. Soil–geomorphology relations in gypsiferous materials of the Tabernas Desert (Almeria, SE Spain)/ *Geoderma* 115 (2003) 193–222
55. Casby-Horton S., Herrero J., Rolong N. A., Chapter Four - Gypsum Soils—Their Morphology, Classification, Function, and Landscapes, Editor(s): Donald L. Sparks, *Advances in Agronomy*, Academic Press, Volume 130, 2015, Pages 231–290, ISSN 0065-2113, ISBN 9780128021378, <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2014.10.002>
56. Chaabane S. et Benreda Z. (1997): inventaires des sols salés d’Algérie. ANRH Pédologie. 22p.
57. Chebbah M. (2007). Lithostratigraphie, Sédimentologie et Modèles de Bassins des dépôts néogènes de la région de Biskra, de part et d’autre de l’Accident Sud Atlasique. Zibans, Algérie. Thèse Doct. d’état, (option : géologie). Univ. Mentouri - Constantine. 475 p.
58. Cherlet, M. et al. (eds.) (2018) *World atlas of desertification*. 3rd edn. Luxembourg: Publications Office of the European Union. Available at: <https://doi.org/10.2760/9205>.
59. Cheverry CL et Robert M-1998 - la dégradation des sols irrigués et de la ressource en eau : une menace pour l’avenir de l’agriculture et pour l’environnement des pays au sud de la Méditerranée : Etude et Gestion des sols, 5, 4, 1998-pages 217–226.
60. Chi, M.C.; Wang, Z.C. Characterizing salt affected soils of Songnen Plain using saturated paste and 1:5 soil to water extraction methods. *Arid Land Res. Manag.* **2010**, *24*, 1–11.
61. Coque R., 1964.- A propos des croûtes gypseuses de la Tunisie méridionale In: *Annales de Géographie*. 1964, T. 73, n° 395 : 82–86.
62. Cornu S, Montagne D, Bogner C and Montanarella L (2020) Editorial: Soil Evolution and Sustainability. *Front. Environ. Sci.* 8:23. doi: 10.3389/fenvs.2020.00023
63. Côte M. 2002. Des oasis aux zones de mise en valeur : l’étonnant renouveau de l’agriculture saharienne. *Méditerranée* 99 (3): 5–14.
64. Creswell R. and Franklin W. Martin. 1998. *Dry Land Farming: Crops & Techniques for Arid Regions*. ECHO general technical document, 23p. <https://www.echocommunity.org/en/resources/74dba772-e5b9-4f7e-a5ab-2556187306a5>
65. H. Curgis Monger (2006). Arid Soils. Chapitre in Rattan Lal « *Encyclopedia of Soil Science* », pp 131–134.
66. Daoud, Y., Halitim A. 1994. Irrigation et salinisation au Sahara algérien. *Sécheresse*, (3), 151–160.
67. Dellal, A., & Halitim, A. (1992). Activités microbiologiques en conditions salines : cas de quelques sols salés de la région de Relizane (Algérie). *Cahiers Agricultures*, 1(5), 335–340.
68. Dregne, H.E. (1983). Soil and Soil Formation in Arid Regions. In: Webb, R.H., Wilshire, H.G. (eds) *Environmental Effects of Off-Road Vehicles*. Springer Series on Environmental Management. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-5454-6_2
69. Driessen, P., Deckers, J., Spaargaren, O., Nachtergaele, F. (2001). Lecture notes on the major soils of the world. *World Soil Resources Reports*, collection 0532-0488, FAO, 300 p. ISBN 92-5-104637-9. Available at : <http://www.fao.org/3/a-y1899e.pdf>
70. Direction des services agricoles de la wilaya de Biskra (2018) *Rapport Final sur le Secteur Agricole*. DSA, Biskra, Algérie, 62 p.
71. Dubost, D. (1986) “Nouvelles perspectives agricoles du Sahara algérien. *Revue de l’Occident musulman et de la Méditerranée*, n°41–42, Désert et montagne au Maghreb, pp. 339–356. Available at: <https://doi.org/10.3406/remmm.1986.2466>.
72. Dubost, D. 1986. Utilisation des eaux chaudes au Bas Sahara. *Bul. Agro. Sah.* (5). ; 7–33.
73. Dubost, D. 1991. *Ecologie, Aménagement et développement agricole des oasis algériennes*. Thèse Doctorat, Univ. Tours, France, 319 p.

74. Dubost D., 2002-.Ecologie, Aménagement et Développement Agricole des Oasis Algérienne. Ed C.R.S.T.R.A. 423 p.
75. Dubost, D. and Larbi-Youcef, Y. (1998) "Mutations agricoles dans les oasis algériennes: l'exemple des Ziban. Science et changements planétaires / Sécheresse, 9, pp. 103–110. Available at : https://www.jle.com/fr/revues/sec/e-docs/mutations_agricoles_dans_les_oasis_algeriennes_lexemple_des_ziban_272879/article.phtml (Accessed: 1998).
76. Durand JH., 1949- Formation de la croûte gypseuse du Souf (Sahara). Compte rendu Sommaire des sciences de la société géologique de France, 13. pp, 303-305.
77. Durand JH., 1983- Les sols irrigables. Études pédologiques. Edit imprimerie Boudin, Paris, 339p.
78. Ewing SA, Sutter B, Owen J, et al. A threshold in soil formation at Earth's arid-hyperarid transition. *Geochim Cosmochim Acta* 2006, 70:5293–322.
79. Faci M. et Benzouiche S.E (2021) Contribution to monitoring the influence of air temperature on some phenological stages of the date palm (cultivar 'Deglet Nour') in Biskra. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 20 (4), 248-256.
DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2021.02.004>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1658077X21000199>
80. Fanning, D.S.; Fanning, M.C.B. *Soil: Morphology, Genesis and Classification*; John Wiley & Sons: New York, NY, USA, 1989; p. 416, ISBN 978-0-471-89248-9.
81. FAO (2001). *Lecture notes on the major Soils of the world*, World Soil report N 94, Rome, 2001, 307 p.
82. FAO; IFAD; UNICEF; WFP; WHO. *The State of Food Security and Nutrition in the World 2019 Safe guarding against Economic Slowdowns and Downturns*; FAO: Rome, Italy, 2019. DOI: <https://doi.org/10.4060/CA5162EN>; ISBN: 978-92-5-131570-5 ; ISSN: 2663-8061
83. Feng G, Sharratt B (2005) Sensitivity analysis of soil and PM10 loss in WEPS using the LHS-OAT method. *Transactions of the ASAE* 48: 1409-1420. Link: <https://bit.ly/3AO4rUl>.
84. Fernandez, C., Labanowski, J., Cambier, P., Jongmans, A.G., van Oort, F., 2007. Fate of airborne metal pollution in soils as related to agricultural management. 1. Zn and Pb distributions in soil profiles. *European Journal of Soil Science* 58, 547– 559
85. Fernández-Cirelli, A. et al. (2009) "Environmental effects of irrigation in arid and semiarid regions. Review," *Chilean Journal of Agricultural Research*, 69 (Suppl. 1), pp27–40. Available at: <https://www.scielo.cl/pdf/chiljar/v69s1/AT04.pdf> (Accessed: December 2009).
86. Finstad, K., Pfeiffer M. and Amundson, R. (2014) "Hyperarid soils and the Soil Taxonomy," *Soil Science Society of America Journal*, 78(6), pp. 1845–1851. Available at: <https://doi.org/10.2136/sssaj2014.06.0247>.
87. Fitzpatrick, E.A. *Soils, Their Formation, Classification and Distribution*; Longman Inc.: New York, NY, USA, 1983; ISBN 978-0-582-30116-0.
88. Florea, N., & Al-Joumaa, K. (1998). Genesis and classification of gypsiferous soils of the Middle Euphrates Floodplain, Syria. *Geoderma*, 87, 67-85.
89. D. Foth Henry, "Fundamentals of Soil Science," 8th Edition, Michigan State University, John Wiley & Sons, New York, 1990.
90. Fridland V.M., 1974. - V.M. Fridland Structure of the soil mantle. *Geoderma*, 12 (1974), pp. 35-42, 10.1016/0016-7061(74)90036-6
91. Gaur Mahesh K. and Squires Victor R. Geographic Extent and Characteristics of the World's Arid Zones and Their Peoples. Chapter 1 in M.K. Gaur, V.R. Squires (eds.), *Climate Variability Impacts on Land Use and Livelihoods in Drylands*, DOI 10.1007/978-3-319-56681-8_1, pp 1-19
92. Golla B. (2021) Agricultural production system in arid and semi-arid regions. *J Agric Sc Food Technol* 7(2): 234-244. DOI: <https://dx.doi.org/10.17352/2455-815X.000113>
93. Gizaw Asmamaw Ketema (2024). A Comprehensive Review on Gypsisols: Characteristics, Genesis, and Environmental Implications. *Civil and Environmental Research* www.iiste.org ISSN 2224-5790 (Paper) ISSN 2225-0514 (Online) Vol.16, No.1. DOI: 10.7176/CER/16-1-01

94. Gouskov N., 1964.- Notice explicative de la carte géologique de Biskra au 1/200000. Publ. Service géol., Algérie, 13 p.
95. Guo, L.B. and Gifford, R.M. (2002) Soil Carbon Stocks and Land Use Change—A Meta Analysis. *Global Change Biology*, 8, 345-360.
96. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1354-1013.2002.00486.x>
97. Grunwald, S. Future of Soil Science. In *The Future of Soil Science*; Hartemink, A., Ed.; IUSS International Union of Soil Sciences: Wageningen, The Netherlands, 2006; pp. 51–53, ISBN 90-71556-16-6.
98. Hadj Kouider M., Eddine Nezli, I. and Belhadj H.-A.(2017)“The use of spectral responses of surface in the discrimination of soils surface by remote sensing,”*Energy Procedia*, 119,pp. 622–631. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.088>
99. Hadj Miloud S., Djili K., and Benidir M. (2018). Fuzzy Logic Expert System for Classifying Solonchaks of Algeria. *Hindawi Applied and Environmental Soil Science Volume 2018*, Article ID 8741567, 11 pages <https://doi.org/10.1155/2018/8741567>
100. Hadj Miloud S. Seasonal Evolution Study of Soil Salinity under Mediterranean Condition Al-Qadisiyah Journal For Agriculture Sciences (QJAS) ISSN : 2618-1479 Vol.13, Issue. 1 ,(2023), pp. 71-86 <https://jouagr.qu.edu.iq/>
101. Halitim, A. (1988) *Sols des régions arides d’Algérie*, Alger: OPU.
102. Halitim, A. and Robert, M. (1987)“Interaction du gypse avec les autres constituants du sol, analyse microscopique de sols gypseux en zone aride (Algérie) et études expérimentations in N. Fedoroff et al. (eds.) *Soil micro morphology. Actes de la VIIe Réunion Internationale de Micromorphologie Des Sols*, Paris, Jun 1985. Paris: AFES, pp. 179–186.
103. Hannachi, N. et al. (2015)“Effects of cultivation on chemical and biochemical properties of dryland soils from southern Tunisia,”*Agriculture, Ecosystems & Environment*, 199, 249–260. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2014.09.009>.
104. Haouchine A. (2010) *Hydrogéologie en zone semi-aride et aride: region de Biskra*. Thèse Doct., Alger: USTHB.
105. Hartani T., Douaoui A et Kuper M- 2009- Economie d’eau en système irrigués au Maghreb. Actes du Quatrième atelier régional du projet Sirma, Mostaganem, Algérie, 2628 Mai 2008. Cirad, Montpellier, France, Colloque-cédérom.
106. Hartemink, A.E. (2015) “The use of soil classification in journal papers between 1975 and 2014,”*Geoderma Regional*, 5, pp. 127–139. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2015.05.002>.
107. Hashemi, S. S., Baghernejad, M. and Khademi, H. (2011)“Micromorphology of gypsum crystals in Southern Iranian soils under different moisture regimes,”*Journal of Agricultural Science and Technology*, 13 pp. 273–288.
108. Hatira, A., Baccar, L., Grira M., Gallali T. 2007. Analyse de sensibilité du Système oasien et mesures de sauvegarde de l’oasis de Métouia (Tunisie). *Revue des sciences de l’eau / Journal of Water Science*, vol. 20, (1), 59-69.
109. He, Y., DeSutter, T., Hopkins, D., Jia, X., & Wysocki, D. A. (2013). Predicting EC_e of the saturated paste extract from value of EC_{1/5}. *Canadian Journal of Soil Science*, 93, 585–594. doi:10.4141/CJSS2012-080
110. Herrero, J. and Boixadera, J. (2002) “Gypsic soils,” in *Encyclopedia of soil science*, pp. 635–639.
111. IUSS Working Group WRB (2022) World reference base for soil resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edn. Vienna, Austria: IUSS: https://www.isric.org/sites/default/files/WRB_fourth_edition_2022-12-18.pdf (Accessed: 1st published: 22 July 2022. Update: 18 December 2022).
112. Herrero, J., & Pérez-Coveta, O. (2005). Soil salinity changes over 24 years in a Mediterranean irrigated district. *Geoderma*, 125(3-4), 287-308.
113. Herrero J., and Boixadera J. 2006. Gypsum Formation in Gypsic Soils. Chapitre in *Book Encyclopedia of Soil Science*, 2nd Edition, pp 796-798.
114. Hiouani F. et Bensaid R. 2009. Effet de la salinité sur la rétention en eau des sols gypseux de la région de Ain Benoui (Biskra). *Courrier du Savoir – N°09*, Mars 2009, 85-89.

115. Huang M.-T. and P.-M. Zhai Desertification dynamics in China's drylands under climate change / *Advances in Climate Change Research* 14 (2023) 429e436
116. Idder, T., Idder, A., Tankari Dan-Badjo, A., Benzida, A., Merabet, S., Negais, H., Serraye A. 2014. Les oasis du Sahara algérien, entre excédents hydriques et salinité. L'exemple de l'oasis de Ouargla. *Revue de Science de l'eau / Journal of Water Science*, 27, (2), 155-164.
117. Juan F. Martínez-Montoya, Juan Herrero-Isern, Jorge Aceves-de Alba, Jorge Palacio-Núñez, Víctor M. Ruiz-Vera, and Genaro Olmos-Oropeza Approximation of the surface of gypseous soils in San Luis Potosí, Mexico *Cien. Inv. Agr.* 39(3):545-556. 2012 www.rcia.uc.cl Soil Management
118. Karakas S, Dikilitas M, Tırdamaz R. 2020. Phytoremediation of salt-affected soils using halophytes. In: *Handbook of Halophytes: from molecules to ecosystems towards Biosaline agriculture*, 1–18.
119. Kargas, G., Chatzigiakoumis, I., Kollias, A., Spiliotis, D., Massas, I., & Kerkides, P. 2018. Soil salinity assessment using saturated paste and mass soil: water 1:1 and 1:5 ratios extracts. *Water*, 10, 1589.
120. Kargas, G.; Londra, P.; Sotirakoglou, K. The Effect of Soil Texture on the Conversion Factor of 1:5 Soil/Water Extract Electrical Conductivity (EC1:5) to Soil Saturated Paste Extract Electrical Conductivity (ECe). *Water* 2022, 14, 642. <https://doi.org/10.3390/w14040642>
121. Karakouzian, M. et al. 1996. "Measurements of soluble salt contents of soils from arid and semi-arid regions," *Geotechnical Testing Journal*, 19(4), pp. 364–372.
122. Karanja Ng'ang'a S, Van Wijk MT, Rufino MC, Giller KE. 2016. Adaptation of agriculture to climate change in semi-arid Borena Ethiopia. *Regional Environmental Change* 16: 2317-2330. Link: <https://bit.ly/3g9ycHc>
123. Kebibeche, D., Daoudi A2. 2014. Dynamique des systèmes de production agricoles dans la commune d'El--- Ghrous, Wilaya de Biskra. Actes – Proceedings du Séminaire sur la gouvernance des eaux souterraines au Maghreb, Biskra, 8-11.
124. Keesstra, S.D. et al. (2016) "The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations sustainable development goals," *Soil*, 2, pp. 112–128. Available at: <https://doi.org/10.5194/soil-2-111-2016>.
125. Kessah, A. 1995. Société et espaces oasiens dans le sud Tunisien : Mutations, Aménagement et perspectives de développement. Faculté des Lettres, Manouba, Tunis, 14-35.
126. Kopittke, P.M., Menzies, N.W., Wang, P., McKenna, B.A., Lombi, E., 2019. Soil and the intensification of agriculture for global food security. *Environ. Int.* 132, 105078 Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105078>
127. Khorsandi F. & Fateme Alaei Yazdi. 2011. Estimation of Saturated Paste Extracts' Electrical Conductivity from 1:5 Soil/Water Suspension and Gypsum, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 42:3, 315-321, DOI: 10.1080/00103624.2011.538885
128. Koutroulis, A.G., 2019. Dryland changes under different levels of global warming. *Sci. Total Environ.* 655, 482- 511. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.215>
129. Kumar, P. Santra and M. Shamsuddin (2009). Variability in Arid Soil Characteristics in Trends in Arid Zone Research in India (Eds. Amal Kar, B.K. Garg, M.P. Singh and S. Kathju), Central Arid Zone Research Institute, Jodhpur, 78-112 pp.
130. Lamqadem, A. A., Afrasinei, G.M. and Saber, H. (2019) "Analysis of Landsat-derived multitemporal vegetation cover to understand drivers of oasis agroecosystems change," *Journal of Applied Remote Sensing*, 13(1), 014517. Available at: <https://doi.org/10.1117/1.JRS.13.014517>.
131. Largeau V. (1881). Les déserts de l'Erg. 2^{ème} éd. Paris, 361 p ;
132. Li XY, Gong JD, Wei XH (2000) In-situ rain water harvesting and gravel mulch combination for corn production in the dry semi-arid region of China. *Journal Arid Environments* 46: 371-382. Link: <https://bit.ly/3AIZfRy>
133. Li, C., Fu, B., Wang, S., et al., 2021. Drivers and impacts of changes in China's drylands. *Nat. Rev. Earth Environ.* 2 (12), 858-873.

134. Lian, X., Piao, S., Chen, A., et al., 2021. Multifaceted characteristics of dryland aridity changes in a warming world. *Nat. Rev. Earth Environ.* 2, 232-250.
135. Lorenz, K., Lal, R. And Ehlers, K. (2019) "Soil organic carbon stock as an indicator for monitoring land and soil degradation in relation to United Nations' sustainable development goals," *Land Degradation and Development*, 30, pp. 824–838. Available at: <https://doi.org/10.1002/ldr.3270>.
136. H.M. Lövenstein, P.R. Berliner, H. van Keulen Runoff agroforestry in arid lands ; *Forest Ecology and Management* Volume 45, Issues 1–4, 30 November 1991, Pages 59-70 ; [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(91\)90206-B](https://doi.org/10.1016/0378-1127(91)90206-B)
137. Loyer J.Y, Gonzalez B.J.L, Job J.O., 1989. Les principaux faciès salins et leur expression dans les sols des régions chaudes. *Actas del seminario Mapimi*, 348-362.
138. Loyer J.-Y., Gonzalez Barrios J.L., Job J. O. 1992. Les principaux faciès salins et leur expression dans les sols des régions chaudes. In : Delhoume Jean-Pierre (ed.), Maury M.E. Ed. *Etude des relations eau-sol-végétation dans une zone aride du Nord du Mexique orientée vers l'utilisation rationnelle de ces ressources pour l'élevage bovin extensif*. Xalapa : Instituto de Ecologia, p. 347-362. *Seminario Mapimi : Séminaire Mapimi, Durango (MEX), 1989/10/23-29*. ISBN 968-7213-29-9
139. Mahesh K. Gaur and Victor R. Squires Geographic Extent and Characteristics of the World's Arid Zones and Their Peoples. Chapter 1 in M.K. Gaur, V.R. Squires (eds.), 2018, *Climate Variability Impacts on Land Use and Livelihoods in Drylands*, DOI 10.1007/978-3-319-56681-8_1, pp 1-19
140. Marlet S., I. Mekki et A. Zairi (2010). Quelles perspectives pour un développement durable des oasis du Nefzaoua ? Actes de l'atelier Sirma « Gestion des ressources naturelles et développement durable des systèmes oasiens du Nefzaoua », 25-27 février 2009, Douz, Tunisie. MARLET S. et I. MEKKI (éd.), CIRAD, Montpellier, France, 4 p.
141. Mermut, A. R., & Khademi, H. (2005). Gypsum formation in gypsic soils. *LAL, R.(ed.): Encyclopedia of soil science, druga izdaja. CRC*, 800-804.
142. Miagnien R. (1969). *Manuel de prospection pédologique*, ORSTOM, Paris, 131 p.
143. Mathieu C, et Pieltain F. *Analyse chimique des sols: méthodes choisies*. " Soil chemical analysis : selected methods" Ed Tec et Doc. Lavoisier; 2003, 386 p.
144. Mathieu C. Le sol, l'épiderme vivant de notre planète, *Planet Terre* - ISSN 2552-9250, <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/sol-epiderme-vivant.xml>. 06/11/2020
145. McBratney, A., Field, D.J., Koch, A., 2014. The dimensions of soil security. *Geoderma* 213, 203–213. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.013>.
146. McCauley, A., Jones, C. and Olson-Rutz, K. (2017) "Soil pH and organic matter," *Nutrient Management Module*, 8. Available at: https://store.msuextension.org/publications/A_gand_Natural_Resources/4449-8.pdf
147. Meouak M., *Les Ziban entre Aurès et Sahara. Une géographie historique de Biskra et de ses oasis du Moyen Âge à la fin de l'époque moderne*, Helsinki, Academia Scientiarum Fennica, 2017, 510 pages, annexes, cartes, index
148. Mesfin S, Taye G, Desta Y, Sibhatu B, Muruts H, et al. (2018) Short-term effects of bench terraces on selected soil physical and chemical properties: landscape improvement for hillside farming in semi-arid areas of northern Ethiopia. *Environmental Earth Sciences* 77: 399. Link: <https://bit.ly/3iQzMqf>
149. Mihi, A., Tarai, N. And Chenchouni, H. (2017) "Can palm date plantations and oasisification be used as a proxy to fight sustainably against desertification and sand encroachment in hot drylands?," *Ecological Indicators* 105, pp. 365–375. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.11.027>.
150. Mihi, A., Tarai, N. And Chenchouni, H. (2019). Monitoring Dynamics of Date Palm Plantations from 1984 to 2013 Using Landsat Time-Series in Sahara Desert Oases of Algeria. H. Chapter in M. El-Askary et al. (eds.), *Advances in Remote Sensing and Geo Informatics Applications*,

Advances in Science, Technology & Innovation, pp 225-228. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01440-7_52

151. Mohamed E, Belal AA, Ali RR, Saleh A, Hendawy EA (2019) Land degradation. In *The soils of Egypt*. Springer Cham 159-174. Link: <https://bit.ly/37RHCTw>
152. Moreno-Jiménez, E .et al.(2019)“Aridity and reduced soil micronutrient availability in global drylands,” *Nature Sustainability*, 2(5), pp. 371–377. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0262-x>.
153. Moreno-Jiménez, E.et al. (2022)“Aridity and geochemical drivers of soil micronutrient and contaminant availability in European drylands,”*European Journal of Soil Science*,73, e13163, pp. 1–12. Available at: <https://doi.org/10.1111/ejss.13163>.
154. Moret-Fernandez, D. et al. (2021)“Livestock grazing effect on the hydraulic properties of gypseous soils in a Mediterranean region,” *Catena*, 207, 105697.Available at: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105697>.
155. Mortimore, M. et al. (2009) *Dryland opportunities: A new paradigm for people, ecosystems and development*. Gland, Switzerland: IUCN, London, UK IIED, Nairobi, Kenya: UNDP/DDC.
156. Mortimore M, Anderson S, Cotula L, Davies J, Facer K, et al. 2009. *Dryland Opportunities: A new paradigm for people ecosystems and development*. International Union for Conservation of Nature (IUCN). Link: <https://bit.ly/3maEZUU>
157. Mostefaoui T. Besaid R. Saker M. L. 2013. Localization and Delimitation of the Arid Soils by Remote Sensing and In-Situ Measurements in an Arid Area: Case of Oued Djedi Watershed, Biskra, Algeria. *World Applied Sciences Journal* 24 (3): 370-382.
158. Mostephaoui T. et Bensaid R. 2014. Caractérisation des sols gypseux dans les zones arides par télédétection. Cas du sousbassin versant d’oued Djedi-Biskra. *Lebanese Science Journal*, Vol. 15, No. 1, 2014, 99-115.
159. Munns, R. and Tester, M. (2008)“Mechanisms of salinity tolerance,”*Annual Review of Plant Biology*, 59, pp. 651–681. Available at: <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911>.
160. Munsell Color Chart; Color Matching from Munsell Color Company (2014).
161. Naorem, A.et al. (2023) Soil constraints in an arid environment – Challenges, prospects, and implications,”*Agronomy*, 13, 220. Available at: <https://doi.org/10.3390/agronomy13010220>.
162. Navarro-Perea, M. et al. (2022) “Plant-soil interactions in response to grazing intensity in a semi-arid ecosystem from NE Spain,”*Arid Land Research and Management*, 37(2),pp. 184–196. Available at: <https://doi.org/10.1080/15324982.2022.2119901>.
163. Nedjimi,B. (2012)“Seasonal variation in productivity, water relations and ion contents of *Atriplex halimus* spp. *Schweinfurthii* grown in Chott Zehrez wetland, Algeria,”*Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 11(1), pp. 43–49. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.JSSAS.2011.08.002>.
164. Nordt, L.C.et al.(2011)“Classification of soils (Entisols),”in M.E.Sumner(ed.)*Handbook of soil sciences: Properties and processes*. Boca Raton, FL:CRC Press,pp. 33.49–33.62.
165. H. T., Nyuma and H., Chur, 2022. A Review on Challenges and Opportunities in Management of Soils of Arid and Semi-Arid Regions of Kenya. *East African Journal of Environment and Natural Resources*. Volume 5, issue 1, 2022 Article DOI: <https://doi.org/10.37284/eajenr.5.1.840>
166. Omar,S.A.S. and Shahid, S.A. (2013)“Reconnaissance soil survey for the State of Kuwait,”in S.A.Shahid et al.(eds.) *Developments in soil classification, land use planning and policy implications: Innovative thinking of soil inventory for land use planning and management of land resources*. Dordrecht: Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5332-7_3.
167. J. R. Otukey and T. Blaschke, “Land cover change assessment using decision trees, support vector machines and maximum likelihood classification algorithms,” *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 12, Supple, no. 0, pp. S27–S31, 2010.
168. Pashaei L. and Manafi, Sh. (2021) “Characterization of gypsiferous soils in the north of Urmia, Iran,”*Desert*, 26 (1), pp. 1–15. Available at: <https://doi.org/10.22059/jdesert.2019.279895.1006714>.

169. Pouget, M. (1968) "Contribution à l'étude des croûtes et encroûtements gypseux de nappe dans le Sud-Tunisien. Cahiers – ORSTOM. Ser. Pédologie, 6 (3–4).
170. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/cahiers/PTP/18536.PDF
171. Pouget, M. (1980) "Les relations sol- végétation dans les steppes sud Algéroises Travaux et documents de l'ORSTOM, 116. Paris: Service des Publications ORSTOM. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers07/00344.pdf
172. Prăvălie, R. 2016. "Drylands extent and environmental issues. A global approach," *Earth-Science Reviews*, 161, pp. 259–278. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.003>.
173. S.H. Qader, J. Dash, P.M. Atkinson. Forecasting wheat and barley crop production in arid and semi-arid regions using remotely sensed primary productivity and crop phenology: A case study in Iraq ; *Science of The Total Environment Volumes* 613–614, 1 February 2018, Pages 250-262. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.057>
174. Qader, S.H.; Dash, J.; Alegana, V.A.; Khwarahm, N.R.; Tatem, A.J.; Atkinson, P.M. The Role of Earth Observation in Achieving Sustainable Agricultural Production in Arid and Semi-Arid Regions of the World. *Remote Sens.* 2021, 13, 3382. <https://doi.org/10.3390/rs13173382>
175. Ramdane, M. (2001) "Agro-pedological studies in Algeria," in P.Z. druli et al. (eds.) *Soil resources of Southern and Eastern Mediterranean countries. Options Méditerranéennes: Série B. Etudes et Recherches*, 34. Bari: CIHEAM, pp. 91–100.
176. Rasooli, N. et al. (2021). Capability of Soil Taxonomy (2014) compared to updated WRB (2015) in describing Lut Desert soils. *DESERT* 2021, 26 (2): 219-235. Available at: DOI: 10.22059/jdesert.2021.318248.1006804
177. Rathore VS, Tanwar SPS, Yadav OP (2019) Integrated Farming System: Key to sustainability in arid and semi-arid regions. ICAR. Link: <https://bit.ly/2VVLmR4>
178. Rayment, G.E.; Lyons, D.J. *Soil Chemical Analysis Methods-Australia*; CSIRO Publishing: Collingwood, Australia, 2011
179. Rechachi, M. Z. (2017). Impact de la qualité des eaux d'irrigation sur la salinisation des sols en régions arides et semi arides : cas de la région du Ziban. Thèse Doct. Univ. Med Kheider, Biskra , 364 p.
180. Rechachi, M. Z. et al. (2021) "Impact of the use of irrigation water on soil salinization: case of the palm grove of Bordj Benazouz BBA-Biskra (Ziban oasis, south-eastern Algeria)," *PONTE International Journal of Sciences and Research*, 77(1/1), pp. 1–22. Available at: <https://doi.org/10.21506/j.ponte.2021.1.1>.
181. Reitemeier, R.F. 1946. Effect of moisture content on the dissolved and exchangeable ions of soils of arid regions. *Soil Sci.* 61:195–214. doi:10.1097/00010694-194603000-0000
182. Rengasamy, P. (2002) "Transient salinity and subsoil constraints to dryland farming Australian sodic soils: an overview," *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 42, pp. 351–361. Available at: <https://doi.org/10.1071/EA01111>.
183. Robin P. White and Janet Nackoney (2003). *Drylands, People, and Ecosystem Goods and Services: A Web-Based Geospatial Analysis*, 43 p.
184. Rodríguez-Rastrero, M.; Ortega-Martos, A.; Cicuéndez, V. Soil and Land Cover Interrelationships: An Analysis Based on the Jenny's Equation. *Soil Syst.* 2023, 7, 31. <https://doi.org/10.3390/soilsystems7020031>
185. J. Rogan, J. Franklin, and D. A. Roberts, "A comparison of methods for monitoring multitemporal vegetation change using Thematic Mapper imagery," *Remote Sensing of Environment*, vol. 80, no. 1, pp. 143–156, 2002.
186. D. G. Rossiter. Are soil phenoforms the new normal? Soil classification and soil mapping in the Anthropocene ; *Soil Security Volume* 5, December 2021, ISSN 2667-0062, <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2021.100017>
187. D. G. Rossiter, J. Bouma, A new look at soil phenoforms – Definition, identification, mapping, *Geoderma*, Volume 314, 2018, Pages 113-121, ISSN 0016-7061, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.002>.

188. Roquero, E.G.-C. and Perez Arias, J. (1996) "Influence of slope degree and orientation on geomorphological and pedological differences on gypsiferous soils from Miocene formations in central Spain," in Proceedings of the International Symposium on soil with gypsum. Lleida, Catalonia, Spain. File:///C:/Users/lenovo/Downloads/SymposiumSoilsGypsumProc.pdf
189. Ruellan 2010 des sols et des hommes, ISBN : 978-2-7099-1690-5
190. L. F. C. Ruiz, L. A. Guasselli, and A. T. Caten, "Object based analysis and decision tree for the classification of submetrical spatial resolution images captured by UAV [Árvore de decisão e análise baseada em objetos na classificação de imagens com resolução espacial submétrica adquiridas por vant]," Boletim de Ciencias Geodesicas, vol. 23, no. 2, pp. 252–267, 2017.
191. Salehi, M.H. (2018) "Challenges of Soil Taxonomy and WRB in classifying soils: Some examples from Iranian soils," Bulletin of Geography. Physical Geography Series, 14, pp. 63–70. Available at: <http://dx.doi.org/10.2478/bgeo-2018-0005>.
192. Samira A. S. Omar and Shabbir A. Shahid. 2013. Chapter 3. Reconnaissance Soil Survey for the State of Kuwait in S.A. Shahid et al. (eds.), Developments in Soil Classification, Land Use Planning 85 and Policy Implications: Innovative Thinking of Soil Inventory for Land Use Planning and Management of Land Resources, DOI 10.1007/978-94-007- 5332-7_3.
193. Seaton FM, Barrett G, Burden A, et al. Soil health cluster analysis based on national monitoring of soil indicators. Eur J Soil Sci. 2020;1–16. <https://doi.org/10.1111/ejss.12958>
194. Sedrati N. 2011. Origines Et Caracteristiques physico-chimiques des eaux de la Wilaya de Biskra-sud est Algérien. Thèse Doctorat ès Sciences en hydrogéologie, univ. Badji Mokhtar Annaba, 252 p.
195. Shabbir A. Shahid, Mohammad Zaman, and Lee Heng (2018) Chapter 3: Salinity and Sodicity Adaptation and Mitigation Options in In book: Guideline for Salinity Assessment, Mitigation and Adaptation Using Nuclear and Related Techniques. Available at: DOI: 10.1007/978-3-319-96190-3_3
196. X.Z. Shi, D.S. Yu, S.X. Xu, E.D. Warner, H.J. Wang, W.X. Sun, Y.C. Zhao, Z.T. Gong, Cross-reference for relating Genetic Soil Classification of China with WRB at different scales, Geoderma, Volume 155, Issues 3–4, 2010, Pages 344-350, ISSN 0016-7061, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.12.017>.
197. Singare P. B., Meshram N. A and Kausadikar H. K. (2022). Calcareous Soil and Their Management – A Review Vol. 3 Issue-4, pp 1-6. www.justagriculture.in
198. Skujins J. Genesis and Classification of Arid Region Soils. In: Semiarid Lands and Deserts, Soil Resource and Reclamation. CRC Press, 1991, 33.
199. Simonneau, P., and Aubert G. (1963). L'utilisation Des Eaux Salées Au Sahara. Ann. Agron., ORSTOM, 14 (5), 859-872.
200. P. G. Slavich and G. H. Petterson. Estimating the Electrical Conductivity of Saturated Paste Extracts from 1:5 Soil: Water Suspensions and Texture. Aust. J. Soil Res., 1993, 31, 73-81
201. Snoussi S.A, Halitim A., 1998 Valorisation des eaux salines pour la nutrition minérale des plantes cultivées : cas de la tomate et du haricot. EGS. 5, 4, 289 – 298.
202. Soil Survey Staff (SSS). 2014. "Soil survey field and laboratory methods manual," Soil Survey Investigations Report, 51, Version 2.0. US Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
203. Soil Survey Staff. 2014. Keys to Soil Taxonomy. 12th Ed. USDA-Nat. Resource Conservation Service. Washington DC, USA.
204. Soil Survey Manual 2017 United States Department of Agriculture Handbook No. 18, 638 pages.
205. Sonmez, S., D. Buyuktas, F. Okturen, and S. Citak. 2008. Assessment of different soil to water ratios (1:1, 1:2.5, 1:5) in soil salinity studies. Geoderma 144:361–369. doi:10.1016/j.geoderma.2007.12.005
206. Spaargaren, O.C. (2008). World Reference Base for Soil Resources - ITS Principles of Classification and Potential for Correlation.

207. Sposito, G., Chesworth, W., Evans, L., Chesworth, W., Spaargaren, O., Spaargaren, O. (2008). Gypsisols. In: Chesworth, W. (eds) *Encyclopedia of Soil Science*. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3995-9_258
208. B. Steven. An Introduction to Arid Soils and Their Biology, Chapter 1 in *The Biology of Arid Soils* De Gruyter (Ed.), 2017, pp 1 -13. DOI 10.1515/9783110419047-001
209. Taalab A. S., Ageeb G.W. Siam H. S. and Mahmoud S. A. (2019). Some Characteristics of Calcareous soils. A review. *Middle East Journal of Agriculture Research*, 8 (1) : 96-105.
210. Toomanian N., Jalaliann, A. and Eghbal, M. K. (2003) "Application of the WRB (FAO) and US Taxonomy Systems to Gypsiferous Soils in North west Isfahan, Iran," *Journal of Agricultural Science and Technology*, 5, pp. 51–66. Available at: <http://jast.modares.ac.ir/article-23-10104-en.html> (Accessed: January 2003).
211. Toutain G. (1977). *Eléments d'agronomie saharienne de la recherche au développement*. Cellule des zones arides. INRA, France, 271 p.
212. Tugel, A. J., Herrick, J. E., Brown, J. R., Mausbach, M. J., Puckett, W., & Hipple, K. (2005). Soil change, soil survey, and natural resources decision making. *Soil Science Society of America Journal*, 69, 738–747. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.0163>
213. USDA (1999) *Soil taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. 2nd edn. Washington, D.C.: United States Department of Agriculture. <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-06/Soil%20Taxonomy.pdf>
214. USDA (2014) *Keys to soil taxonomy*. 12th edn. Washington, D.C.: United States Department of Agriculture. Available at: https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/usys/ias/grassland-sciences-dam/documents/Education/Grasslandsysteme/2014_USDA_Keys_to_Soil_Taxonomy.pdf.
215. Velayutham M., T. Bhattacharyya T., Pal D. K., 2017. Classification Systems: Indian. Chap.in 'Encyclopedia of Soil Science', 3rd Edition, pp 398-401. DOI: 10.1081/E-ESS3-120053879
216. Willy H. Verheye (2009). *Soils of Arid and Semi-Arid Areas*. EOLSS Publications, -Land Use, Land Cover and Soil Sciences - Volume VII: Soils and Soil Sciences - 2, Volume 7, pp 67-95.
217. Vieillefon, J. (1979) "Contribution à l'amélioration de l'étude analytique des sols gypseux. Cahiers ORSTOM, Sér. Pedologie, 17(3), pp. 195–223.
218. Visconti, F. And Paz de, J. (2012) "Soil, water and crop management for agricultural profitability and natural resources protection in salt-threatened irrigated lands," in M. Kumar (ed.) *Problems, perspectives and challenges of agricultural water management*. IntechOpen. Available at: <https://doi.org/10.5772/29720>.
219. Walker, T. W., & Syers, J. K. (1976). The fate of phosphorus during pedogenesis. *Geoderma*, 15(1), 1–19. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(76\)90066-5](https://doi.org/10.1016/0016-7061(76)90066-5)
220. Wigley, T.M.L., 1973, Chemical evolution of the system calcite-gypsum-water: *Can. Journal Earth Sci.*, v. 10, p. 306-315. <https://doi.org/10.1139/e73-027>
221. Woldearegay K., Tamene L., Mekonnen K., Kizito F., Bossio D. (2018). Fostering food security and climate resilience through integrated landscape restoration practices and rainwater harvesting/management in arid and semi-arid areas of Ethiopia. In *Rainwater-Smart Agriculture in Arid and Semi-Arid Areas*. Springer Cham 35-57. Link: <https://bit.ly/2W2AVvb>
222. Yaalon, D.H. (1995) "Soils we classify: Essay review of recent publications on Soil Taxonomy," *Catena*, 24, pp. 233–241. [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(95\)00036-1](https://doi.org/10.1016/0341-8162(95)00036-1).
223. Youssef F, Saskia V, Karssenberg D, Erpul G (2010). The spatial variation in wind-blown sediment transport in small scales in Karapinar-Turkey. *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi* 25: 80-88. Link: <https://bit.ly/3xOXhgF>
224. Zayed, A.M.A. et al. (2023) "A pedological study attempting to combine Soil Taxonomy and WRB classification systems," *Journal of Water and Land Development*, 57, pp. 197–203. Available at: <https://doi.org/10.24425/jwld.2023.145350>.

ANNEXES

Annexe 1

Tableau: Estimation de l'ETP (mm) en utilisant la méthode de Thornthwaite;

Période: 2000- 2018; source: Boudibi (2021)

Months	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mai	Jun.	Jul.	Aug.	Sept.	Oct.	Nov	Dec.
T °C	8.7	13.3	17.53	21.6	26.5	31.2	35	34	29.1	24.1	16.9	12.6
P (mm)	14.6	5.5	14	15.7	11.7	3.3	0.7	2.4	15.2	14.86	11.8	8.8
ETP (mm)	9	16.5	39	69.5	127	189.7	257.9	228	137.1	82.4	29.9	14.2

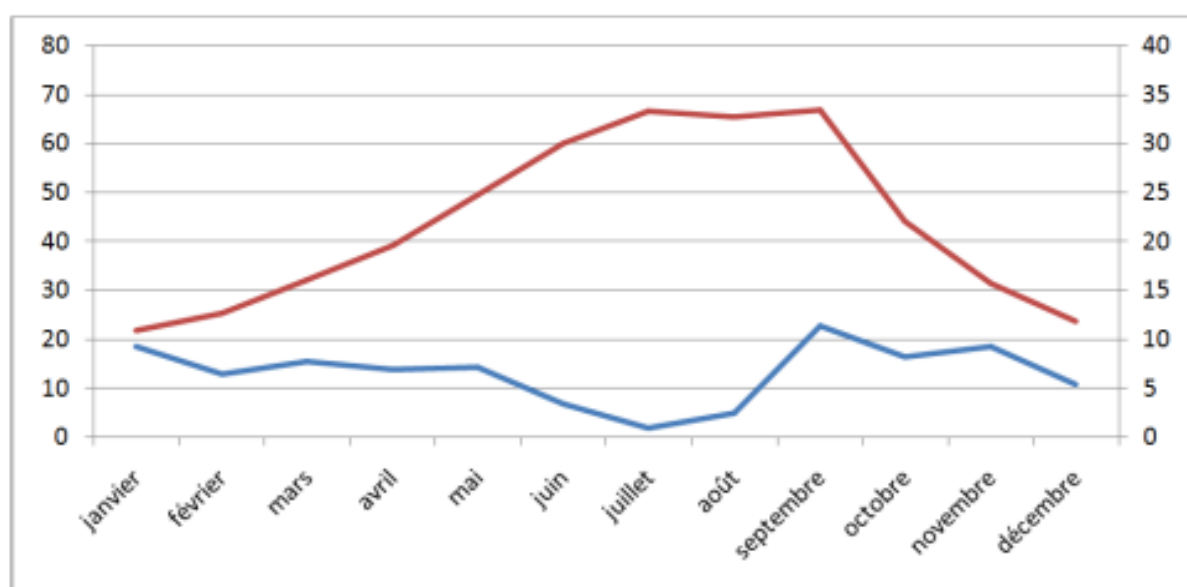


Figure 1 : Diagramme Ombrothermique de Gaussen et Bagnouls de la région de Biskra (période 1967-2012) ; source : Rechachi (2017)

Annexe 2

Tableau: Composition ionique de la solution du sol des sols du Zab occidental la région des Ziban

Ech.	Les anions et cations (meq/l)										
	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na	Ca	K	Mg	$\frac{Cl}{SO_4}$	$\frac{(Ca + Mg)}{(Na + K)}$	$\frac{Na}{Mg}$	$\frac{Ca}{Mg}$
P1H1	4	26	34,56	53,40	88,00	2,77	3,090	0,75	1,62	17,28	28,47
P1H2	2,75	41	24,38	107,03	114,45	3,88	22,033	1,68	1,23	4,86	5,19
P2H1	2	2	21,84	35,52	105,63	1,13	19,422	0,09	3,41	1,83	5,44
P2H2	3,25	141	50,40	178,54	176,19	5,07	49,575	2,80	1,23	3,60	3,55
P3H1	3,5	14	32,30	35,52	43,90	1,54	17,881	0,43	1,67	1,99	2,46
P3H2	3,5	34	46,16	53,40	114,45	1,93	34,471	0,74	2,69	1,55	3,32
P4H1	3,5	14	34,85	35,52	79,18	0,63	19,166	0,40	2,72	1,85	4,13
P4H2	3,25	10,5	9,68	10,49	43,90	0,28	6,274	1,09	4,66	1,67	7,00
P5H1	7	126	101,30	393,08	149,73	4,83	46,816	1,24	0,49	8,40	3,20
P5H2	5,5	62	61,14	107,03	96,82	3,66	48,136	1,01	1,31	2,22	2,01
P5H3	4,25	32	33,68	71,28	79,18	2,68	31,799	0,95	1,50	2,24	2,49
P6H1	5	17	37,67	35,52	70,36	1,36	31,150	0,45	2,75	1,14	2,26
P6H2	6	8	40,79	10,49	52,72	0,72	24,050	0,20	6,85	0,44	2,19
P6H3	4,5	2,5	25,23	5,13	43,90	0,37	13,623	0,10	10,46	0,38	3,22
P7H1	6	43	36,83	56,97	96,82	3,31	46,212	1,17	2,37	1,23	2,10
P7H2	4,5	5	16,75	10,49	70,36	0,50	18,642	0,30	8,10	0,56	3,77
P7H3	2,75	5	15,90	5,13	61,54	0,20	15,477	0,31	14,46	0,33	3,98
P8H1	2	4	20,48	6,92	43,90	0,39	12,188	0,20	7,68	0,57	3,60
P8H2	1	1,5	16,46	3,34	114,45	0,30	9,065	0,09	33,89	0,37	12,63
P8H3	3	1,5	17,31	1,91	61,54	0,04	8,259	0,09	35,70	0,23	7,45
P9H1	1,5	18	23,53	19,43	114,45	0,74	15,809	0,76	6,46	1,23	7,24
P9H2	1,25	2,5	21,84	5,13	43,90	1,43	9,918	0,11	8,21	0,52	4,43
P9H3	1,25	3	19,86	3,34	43,90	1,32	9,589	0,15	11,47	0,35	4,58
P10H1	1,25	22	30,89	23,01	88,00	0,48	21,618	0,71	4,67	1,06	4,07
P10H2	1,5	2,5	26,36	3,34	79,18	1,15	10,570	0,09	19,99	0,32	7,49
P10H3	2	3	27,21	2,63	61,54	1,15	10,730	0,11	19,15	0,24	5,74

Ech. : échantillon

Annexe 3

Tableau : Soil Materials with Gypsum (Soil Survey Manual, 2017)

Coarse textured	Sands (coarse sand, sand, fine sand, very fine sand); loamy sands (loamy coarse sand, loamy sand, loamy fine sand, loamy very fine sand)
Loamy soil materials	
Moderately coarse textured	Coarse sandy loam, sandy loam, fine sandy loam
Medium textured	Very fine sandy loam, loam, silt loam, silt
Moderately fine textured	Clay loam, sandy clay loam, silty clay loam
Clayey soil materials	
Fine textured	Sandy clay, silty clay, clay
* Note: These are not the sandy, loamy, and clayey family particle-size classes defined in <i>Soil Taxonomy</i> .	

Annexe 4 : Caractéristiques analytiques et morphologiques des sols (1991)

UCS 2

Description du profil :

N° du profil : 02

Physiographie : Glacis

Topographie : ondulé, pente *variable* de 2-6%

Matériau parental : sablo-argileux

Drainage : normal

Végétation naturelle

Classification : USDA (1975) : Petrogypsic Gypsiorthids, FAO (1973) : GypsicXerosols,

FAO Modifié : Gypsisols hydromorphic typical

Horizon A : 0-30 cm

Brun très pâle 10 YR 8/3) sec, jaune brunâtre (10 YR 6/6) humide, particulière, peu collant et peu plastique, tendre, effervescence moyenne, peu nombreuse racines fines, transition abrupte et régulière.

Horizon C1 cs : 30-92 cm

Brun très pâle (10 YR 8/3) sec, jaune (10 YR 7/6) humide, massif, peu collant et peu plastique, peu dur, assez nombreux pores très fins à fins continus, effervescence moyenne, transition abrupte et régulière.

Horizon C2 cs : 92-182 cm et +

Blanc (10 YR 8/2) sec, brun très pâle (10 YR 8/3) humide, massif, non collant et non plastique, dur, effervescence moyenne.

Tableau : Résultats analytiques du profil n°2

Prof. Cm	pH eau 1 :2,5	CE mmho/cm	Gypse (%)	CaCO ₃ (%)	C. org. (%)	Sels Solubles (méq/l)					
						Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻
0-30	.	8,41	25.55	16.32	0.11	21.5	20.5	53.47	3.07	3.25	1.89
30-92	7.6	7.88	86	0.94	0.23	21.6	20.25	43.91	3.33	3.00	1.68
92-182	7.6	6.09	89.65	3.41	0.15	19.5	11.66	32.17	0.51	2.87	1.34

Tableau: Résultats physico-chimiques du profil n°2

Horizon	Prof. (cm)	C. org (%)	M.O	Cations échangeables (méq/100 g)				CEC méq	Granulométrie (%)				
				Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺		<2μ	2- 20μ	20- 50μ	50- 200μ	200- 2000μ
A	0-30	0,11	0,20	65,05	3,11	1,34	0,24	4,34	13,76		3,69	21,4	68,65
C1cs	30- 92	0,23	0,40	186,66	2,91	1,13	0,25	4,34	30,64 (+)		29,21	26,53	05,07
C2cs	92- 182	0,15	0,26	186,77	2,64	0,70	0,04	9,23	10,43 (+)		31,11	22,33	00,13

* : cations extraits (dosés) par l'Acétate de NH₄

** : pourcentage de sol lessivé

(+) : Fractions argile et limon fin

UCS 7

Description du profil

Numéro du profil : 07

Physiographie : Glacis

Topographie : ondulé, pente *variable* de 2-6%

Matériau parental : sablo-argileux

Drainage : imparfait

Classification : USDA (1975) : Typic Gypsiorthids,

FAO (1973) : Gypsic Xérosols, FAO Modifiée : Gypsisols hydromorphic saline

Horizon A : 0-15 cm

Brun très pâle (10 YR 8/4) sec, jaune brunâtre (10 YR 6/6) humide, sable limoneux, particulaire, non collant et non plastique, tendre, forte effervescence, peu nombreuses racines fines à très fines, transition abrupte et régulière.

Horizon C1cs : 15-35 cm

Brun très pâle (10 YR 8/4) sec, jaune brunâtre (10 YR 6/6) humide, sable limoneux, massif, peu collant et peu plastique, très friable, forte effervescence, très peu nombreuses racines très fines, transition distincte et régulière.

Horizon C2cs : 35-51 cm

Braun très pâle (10 YR 8/3) sec, jaune brunâtre (10 YR 6/6) humide, limon sableux, massif, non collant et non plastique, ferme, peu nombreux pores très fins à moyens discontinus vésiculaires, présence d'un niveau dur, forte effervescence moyenne, très peu nombreuses racines très fines, transition abrupte et régulière.

Horizon C3cs : 51-91 cm

Blanc (10 YR 8/3) sec, jaune brunâtre (10 YR 6/6) humide, limon sableux, massif, non collant et peu plastique, friable, peu nombreux pores très fins discontinus vésiculaires, forte effervescence, très peu nombreuses racines très fines, transition abrupte et régulière.

Horizon C3cs : 91-126 cm

Blanc (10 YR 8/2) sec, brun très pâle (10 YR 7/4) humide, non structuré, peu collant et peu plastique, friable, présence d'un niveau dur de 2 à 4 cm d'épaisseur, effervescence moyenne.

Tableau: Résultats analytiques du profil n°7

Prof. Cm	pH eau 1 :2, 5	CE mmho /cm	Gypse (%)	CaCO ₃ (%)	Sels Solubles (méq/l)					
					Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻
0-15	7,9	7,17	24,57	11,01	21	16,16	43,91	2,82	1,75	1,26
15-35	7,8	15,45	32,27	12,15	30	26,33	95,21	3,07	2,87	4,48
35-51	7,6	17,56	48,52	07,97	34	39,08	104,34	2,30	1,62	6,18
51-91	7,6	5,44	21,29	14,81	26,4	20,66	27,39	0,77	1,37	1,03
91-126	7,5	3,11	74,51	15,00	16	09,16	07,39	0,25	1,37	0,10

Tableau : Résultats physico-chimiques du profil n°7

Horizon	Prof. (cm)	C. org (%)	M.O (%)	Cations échangeables (méq/100 g)				CEC méq	Granulométrie (%)				
				Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺		<2μ	2-20μ	20-50μ	50-200μ	200-2000μ
A	0-15	0,07	0,13	77,51	3,70	1,61	0,23	6,52	01,45	1,72	9,41	38,35	43,24
C1cs	15-35	0,07	0,13	86,99	3,31	8,15	0,23	5,97	09,00	10,77	7,89	43,51	39,34
C2cs	35-51	0,15	0,26	161,33	2,30	11,6	0,14	10,86	04,17	14,95	12,43	37,67	26,59
C3cs	51-91	0,19	0,33	64,52	3,30	0,14	0,03	8,15	08,70	10,03	01,58	45,83	29,38
C4cs	91-126	0,15	0,26	174,46	3,49	1,05	0,05	10,32	06,74	41,34	03,25	25,05	05,84

* : cations extraits (dosés) par l'Acétate de NH₄

** : pourcentage de sol lessivé

(+) : Fractions argile et limon fin

UCS 9

Description du profil

Numéro du profil : 09

Date de description : 18/06/1991

Physiographie : Glacis

Topographie : pente de 2-6 %

Matériau parental : sablo-argileux

Drainage : normal

Végétation :

Autres : paysage ondulé à microdunes

Classification: USDA (1975) : Typic gypsiorthids,

FAO (1973) :Gypsicxérosols, FAO modifiée : Gypsisols Hydromorphic Typical

Horizon A : 0-60 cm

Braun très pâle (10 YR 8/4) sec, brun jaunâtre (10 YR 7/4) humide, sable limoneux, particulaire et meuble, non collant et non plastique, tendre, peu nombreux pores moyens continus et *vésiculaires*, forte effervescence à l'HCl, peu nombreuses racines moyennes, transition graduelle et régulière.

Horizon A2 cs : 60-90 cm

Brun très pâle, (10 YR 8/3) sec, jaune brunâtre (10 YR 7/4) humide, sable limoneux, structure peu particulaire, présence d'un niveau de quelques cm de couleur grise (10 YR7/4), peu collant et non plastique, tendre, effervescence d'intensité moyenne à forte effervescence à l'HCl, peu nombreux pores fins à larges continus et vésiculaires, très peu nombreuses racines très fines, transition graduelle et régulière.

Horizon C1 cs : 90- 146 cm

Brun très pâle, (10 YR 8/3) sec, jaune brunâtre pâle (10 YR 7/4) humide, sable limoneux, structure massive, non collant, non plastique et tendre, peu nombreux pores très fins à larges continus sphériques et vésiculaires, effervescence d'intensité moyenne à l'HCl, peu nombreuses racines fines à grosses, transition distincte à graduelle et régulière.

Horizon C2 cs : 146- 176 cm

Blanc (10 YR 5/2) sec, brun très pâle (10 YR 7/4) humide, massif, sable limoneux, structure massive, peu collant, non plastique et très dur, tendre, peu nombreux pores très fins à très fins discontinus, forte effervescence à l'HCl, peu nombreuses racines fines à moyennes.

Tableau. Résultats analytiques du profil n°9

Prof. cm	pH eau 1 :2, 5	CE mmho /cm	Gypse (%)	CaCO ₃ (%)	C.or g. (%)	Sels Solubles (méq/l)					
						Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ -	Cl ⁻
0-60	8.1	5.62	33.86	13.67	0.27	25.5	28.16	22.17	2.56	3.50	0.37
60-90	8,1	5.07	43.62	0.68	0.35	19.0	21.5	16.52	1.28	3.37	0.63
90-146	8.0	14.06	29.44	14.43	0.19	83.0	30,10	72.17	1.28	2.75	4.0
146-176	7.4	3.05	47.25	11.39	0.19	4.5	18.33	3.91	0.77	3.25	0.04

Caractéristiques synthétiques du profil 9

Les sols de cette unité présentent un profil de type A-Ccs, profond se caractérisant par une charge en sable jusqu'à 90 cm. Tous les horizons sont de couleur presque brun très pâle, sauf en profondeur où il devient blanc. La structure est particulière dans les horizons supérieurs ; elle devient massive dans les horizons de profondeur. Le pH est alcalin dans la plupart des horizons sauf en profondeur où il devient légèrement alcalin.

Le taux de calcaire est moyen et ne dépasse pas 14.43% et sa distribution n'est pas uniforme. Il est très faible dans la couche de sub-surface. Le taux de gypse sont élevés et se situent entre 29.44 et 47.25%. Le profil est salé dans les premiers niveaux et devient très salé dans l'horizon 90-146 cm avec une CE de l'ordre de 14.06 dS.cm⁻¹ ; l'accumulation de sels solubles est faible (CE= 3.05 dS.cm⁻¹) dans l'horizon de profondeur.

Le bilan ionique montre que l'horizon contenant le plus de sels solubles montre une prévalence pour les cations Ca²⁺ et Mg²⁺ devantant ainsi le Na⁺ ; pour les ions, il s'avère que c'est les carbonates qui prédominent et les Cl⁻ ne sont très faibles et restent <4 méq.l⁻¹. Cependant, les concentrations les plus élevées en Ca²⁺, Mg²⁺ et Na⁺ sont enregistrées dans le niveau 90-146 cm, où la salinité est manifestement grande.

UCS 12

Description du profil :

N° du profil : 12

Physiographie : Glacis

Topographie : ondulé, pente *variable* de 2-6%

Matériau parental : sablo-argileux

Drainage : pauvre

Végétation naturelle

Classification : USDA (1975) : TypicGypsiorthids,
 FAO (1973) :GypsicXerosols, FAO Modifié : Gypsisols hydromorphic saline

Horizon A : 0-15 cm

Brun très pâle 10 YR 8/4) sec, jaune brunâtre (10 YR 7/6) humide, peu collant et peu plastique, très friable et *tendre*, assez nombreuses racines fines à moyennes, transition abrupte et régulière.

Horizon C1 cs : 15-81 cm

Brun très pâle (10 YR 8/4) sec, jaune (10 YR 7/6) humide, limon fin à très fin, massif, non collant et non plastique, friable, transition abrupte et régulière.

Horizon C2 cs : 81-114 cm et +

Blanc (10 YR 8/2) sec, brun très pâle (10 YR 7/3) humide, limon, massif, peu collant et non plastique, très friable, forte effervescence.

Tableau Résultats analytiques du profil n°12

Prof. Cm	pH eau 1 :2, 5	CE mmho/cm	Gypse (%)	CaCO ₃ (%)	Sels Solubles (méq/l)					
					Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻
0-15	7,6	27,63	76,17	0,51	46	199,58	136,52	24,87	2,37	14,07
15-81	7,7	10,51	86,49	1,09	22	31,91	50,86	02,30	1,87	4,55
81-114+	7,5	10,27	91,69	2,00	28	29,25	49,13	01,79	1,75	3,31

Tableau : Résultats physico-chimiques du profil n°12

Horizon	Prof. (cm)	C. org (%)	M.O	Cations échangeables (méq/100 g)				CEC méq	Granulométrie (%)				
				Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺		<2μ	2-20μ	20-50μ	50-200μ	200-2000μ
A	0-15	0,46	0,80	160,16	-	14,65	0,19	9,23	09,86	22,78	26,89	16,02	01,75
C1cs	15-81	0,46	0,80	186,34	2,74	8,61	0,44	8,69	04,88	39,74	41,45	17,75	00,79
C2cs	81-114+	0,93	0,54	174,2	3,04	1,95	0,09	8,69	14,44	2,88	43,68	39,98	00,01

* : cations extraits (dosés) par l'Acétate de NH₄

** : pourcentage de sol lessivé

(+) : Fractions argile et limon fin