

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



UNIVERSITE DE OUARGLA

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie  
Département des Sciences Biologiques



THESE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

**DOCTORAT** ès **SCIENCES**

Spécialité : Sciences Biologiques

Option : Eco-pédologie et Environnement

Par : Messaouda CHARIKH

Thème

**ETUDE DE LA PERMEABILITE DES SOLS DE  
DIFFERENTS PEDOPAYSAGES DANS LA REGION  
DE OUARGLA**

Soutenue Publiquement le: 08/06/2023

Devant le Jury Composé de :

M. DADDIBOUHOUN Mustapha	Pr.	Univ. de Ouargla	Président
Mme SLIMANI Rabia	MCA	Univ. de Ouargla	Directrice de thèse
M. HAMDI-AISSA Baelhadj	Pr.	Univ. de Ouargla	Co-Directeur de thèse
M. BENKHELIFA Mohamed	Pr.	Univ. de Mostaganem	Examineur
M. BOUMARAF Belkacem	MCA	Univ. de Biskra	Examineur
M. BENBRAHIM Fouzi	MCA	ENS de Ouargla	Examineur

Année Universitaire : 2022/2023

## *Dédicace*

*Tout d'abord, Dieu merci qui m'a aidée à réaliser ce modeste travail;*

*A la mémoire de mon frère "Tayeb" qui est toujours présent entre nous.*

*A ma mère : mon ange gardien, ma source de tendresse d'amour et de foi en dieu.*

*A mon père : le phare des mes nuits sombres.*

*A mes chères soeurs Nour EL-Imene, Amira et Ouiam.*

*A Mme Slimani Rabia, mon école de volonté.*

*A M. Hamdi-aïssa Baelhadj qui n'hésite pas de m'aider.*

*A toute ma famille CHARIKH et BISKRI.*

*A toute chère personne dans ma vie.*

*Je dédie ce modeste travail.*

*CHARIKH Messaouda*

# Avant propos

Je tiens tout d'abord à exprimer mes remerciements et toute reconnaissance à l'égard de :

Ma promotrice Mme SLIMANI R. (MCA), non seulement pour l'aide très précieuse qu'elle m'a apporté, mais aussi pour son enthousiasme communicatif, sa patience, ses nombreux conseils et sa totale disponibilité tout au long de mon travail.

Mon Co-promoteur, Monsieur HAMDI-AÏSSA B., professeur à la faculté des Sciences de la Nature et de la Vie à l'Université de Ouargla, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de Co-encadrer ce travail.

Monsieur DADDI BOUHOUN M. (Pr), qui m'a fait l'honneur de présider mon jury.

Aux membres du jury, qui nous ont fait honneur en examinant ce travail, M. BENKHELIFA Mohamed (Pr), M. BOUMARAF Belkacem (MCA) et M. BENBRAHIM Fouzi (MCA).

Je tiens de remercier Dr. ALJARADINE M. (Université de Lunde, Suède et Hamdan Bin Mohammed Smart University) et Dr. BOUKSILA F. (National Research Institute for Rural Engineering, Water and Forestry, Ariana, Tunisia) qui m'ont aidé et orienté.

Je remercie Dr. Bouadjila O. (Université Laarbi Benmhidi, Oum Elbouaghi) pour sa contribution scientifique. C'est lui qui m'a initié au logiciel SPSS.

Merci également à toute l'équipe de laboratoire de recherche en biogéochimie des milieux désertiques.

Je remercie les personnes qui m'ont aidé sur terrain surtout M. Bezziou O.F.

Je tiens de remercier mes amis qui ont m'aidé et encouragé pour réaliser cette thèse, je cite spécialement Slimani Rabia, Hassaine Amina, Senoussi Lilya, Hanafi Radia et Ayat djemaa.

Un grand merci à mes parents et mes sœurs.

Je remercie dans une même pensée toute personne ayant contribué de près ou de loin à ma formation et à la réalisation de ce mémoire, qu'ils trouvent ici l'expression de mon extrême reconnaissance.

# الملخص

## دراسة نفاذية التربة في مختلف المناظر الطبيعية للتربة في منطقة ورقلة

يشهد النظام البيئي الواحاتي في ورقلة تهديدا للموارد المائية و الترابية و لضمان استمرارية هذه الموارد لابد من الإلمام بخصائص المنطقة من تضاريس و مظاهر طبيعية للتربة و خصائص هيدروديناميكية للتربة، و على الرغم من أن نفاذية التربة تعبر عامل هيدروديناميكي مهم لتقييم الرشح، التصميمات الخاصة بالإنشاءات، صرف المياه و مدى عرضة المياه الجوفية للتلوث إلا أنها لم تكن موضع اهتمام العدد الكبير من الدراسات في ورقلة لذلك يهدف هذا العمل إلى تحديد نفاذية تربة المناظر الطبيعية المختلفة في منطقة ورقلة و إنشاء خريطة النفاذية من أجل الحفاظ على الموارد الترابية و المائية في المنطقة.

من أجل تحديد الاستراتيجية المثلى للبحث تم البدء بتحديد حدود المناظر الطبيعية للتربة في المنطقة تبعها إجراء قياسات النفاذية في الموقع، مما جعل تقييم تنوع النفاذية وفقاً للمناظر الطبيعية للتربة الحالية ممكناً.

تبدي منطقة ورقلة تنوعاً للمناظر الطبيعية للتربة حيث نجد الحمادة على الجانب الغربي والمنحدر في كل أنحاء المنطقة في حين يتمركز العرق على الجانب الشرقي و يتداخل الرق مع المظاهر السابقة أما الشط والسبخة فيمثلان مظهر السطح الأكثر انخفاضاً في المنطقة بينما تتواجد ضفاف الوديان شمال المنطقة.

التحليل الفيزيائية و الكيميائية للتربة أظهرت أن تربة ورقلة رملية (97,86%)، تتراوح درجة ملوحتها بين غير مالحة إلى شديدة الملوحة ، مع درجة حموضة من معتدلة إلى قاعدية معتدلة، كما تتميز برطوبة منخفضة و كونها تتراوح بين تربة غير كلسية إلى كلسية. متوسط نفاذيتها المقدر 4.43 م/يوم يجعل منها أترربة شبه نفوذة و هذا ما يمنحها قدرة تصريف جيدة ويسهل نقل الملوثات إلى المياه الجوفية. أظهر اختبار ANOVA اختلافاً في متوسطات نفاذية التربة بين المناظر الطبيعية للتربة وهو وفقاً لاختبار Tukey غير دال احصائياً باستثناء الفرق في المتوسطات بين تربة العرق و كل من تربة الشط و السبخة و المنحدر.

النمذجة الإحصائية و البيدولوجية القائمة على استغلال البيانات المتعلقة بالتربة و الناتجة عن المعاينة المكانية سمحت بالحصول على معادلات تجريبية للنفاذية تعطي نتائج متوافقة مع خريطة النفاذية. هذا النهج هو أداة قيمة لدراسة التباين الفضائي لغطاء التربة.

**الكلمات المفتاحية:** التربة القاحلة ، النفاذية ، المنظر الطبيعي للتربة، رسم الخرائط ، العلاقة ، ورقلة

# Abstract

## STUDY OF SOIL PERMEABILITY IN DIFFERENT SOIL LANDSCAPES IN THE OUARGLA REGION

The hydro-edaphic environment of arid ecosystems in Ouargla is endangered. To the sustainability of this fragile ecosystem, detailed knowledge of geomorphology, surface characteristics, vegetation, and hydrodynamic characteristics of the soil is required. Soil permeability is an important hydrodynamic parameter for the assessment of infiltration, structure design, drainage, and groundwater vulnerability, but it is little studied in Ouargla. In order to protect the hydro-edaphic resources of the area, the work presented aims to identify the permeability of soils in relation to the various soil landscapes in the region of Ouargla and to create a map of permeability.

In order to determine the best prospecting approach, the region's soil landscapes were first delineated. The Porchet approach is then used to measure permeability in situ, allowing for the evaluation of permeability variations in relation to the soil landscapes already present.

The diversity of pedolandsapes in Ouargla is evident according to the map, which illustrates the presence of the plateau to the west, the Erg to the east, the glacis meeting throughout the perimeter, and the Reg alternating with the other pedo-landsapes. The Chott and Sebkhia constitute the lowest soil landscape at 103 m altitude, with the beds of wadis in the north.

Physicochemical analyzes show that the soils of Ouargla are sandy (97,86%), not very clayey, and not salty to extremely salty, neutral to moderately alkaline, not very humid, and non-calcareous to calcareous. They are semi-permeable with 4.43 m/d, which gives them good drainage capacity and facilitates the transfer of pollutants to groundwater. A difference in the mean permeability of the soils from one pedolandscape to another is noticed, but only the difference in mean between the soils of Erg, Chott and Sabkha and those of Glacis is statistically significant according to the ANOVA and Tukey test.

Finally, statistical and pedological modeling based on the exploitation of soil data from a space survey made it possible to obtain empirical permeability equations giving results consistent with the permeability map. This approach is a valuable tool for studying the spatial variability of soil cover.

**Keywords:** arid soil, permeability, pedolandsapes, cartography, relation, Ouargla



# Résumé

## ETUDE DE LA PERMEABILITE DES SOLS DE DIFFERENTS PEDOPAYSAGES DANS LA REGION DE OUARGLA

Le milieu hydro-édaphique des écosystèmes arides de Ouargla est menacé. Pour assurer sa durabilité, une connaissance fine de la géomorphologie, des caractéristiques de surface et des caractéristiques hydrodynamiques du sol est nécessaire. La perméabilité du sol est un paramètre hydrodynamique important pour l'évaluation de l'infiltration, la conception de la structure, le drainage et la vulnérabilité des eaux souterraines, mais elle est peu étudiée à Ouargla. L'objectif des travaux présentés est de déterminer la perméabilité des sols vis-à-vis des différents pédopaysages dans la région de Ouargla et l'élaboration de la carte de la perméabilité en vue d'en préserver des ressources hydro-édaphiques de la région.

On a procédé en premier lieu à une délimitation des pédopaysages de la région afin de définir une stratégie de prospection optimale. En suite, les mesures de la perméabilité sont exécutées *in situ* suivant la méthode de Porchet ce qui a permis d'évaluer la variabilité de la perméabilité selon les pédopaysages existants.

La diversité pédopaysagique de la région de Ouargla suivant la carte illustre la présence du plateau à l'ouest, l'Erg à l'est, les glacis se rencontrent dans tout le périmètre et le Reg s'alterne avec les autres pédopaysages, le Chott et Sebkhia constituent le pédopaysages le plus bas à 103 m d'altitude avec les lits d'oueds au Nord.

Les analyses physicochimiques montrent que les sols de Ouargla sont sableux (97,86%), non salés à extrêmement salés, neutres à moyennement alcalins, peu humides et non calcaire à calcaires. Ils sont semi-perméables avec une perméabilité moyenne de 4,43 m/j, ce qui leur confère une bonne capacité de drainage et facilite le transfert des polluants vers les nappes phréatiques. L'ANOVA montre une différence des moyennes de la perméabilité des sols entre les pédopaysage qui est statistiquement significative entre les sols d'Erg, de Chott et Sebkhia et du Glacis selon le test de Tukey.

Enfin, une modélisation statistique et pédologique basée sur l'exploitation des données pédologiques issues d'une prospection spatiale a permis d'obtenir des équations empiriques de la perméabilité donnant des résultats concordantes avec la carte de perméabilité. Cette approche constitue un outil précieux pour l'étude de la variabilité spatiale de la couverture pédologique.

**Mots clés:** Sol aride, perméabilité, pédopaysages, cartographie, relation, Ouargla.

# Table des matières

Avant-propos .....	I
Résumé .....	III
Abstract .....	IV
الملخص .....	V
Table des matières .....	VI
Liste des abréviations .....	IX
Liste des tableaux .....	IX
Liste des figures .....	X
Liste des photos .....	XI
Liste des annexes .....	XI
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I: PRESENTATION DU SITE D'ETUDE .....	5
I.1. CADRE GEOGRAPHIQUE .....	6
I.2. CADRE CLIMATIQUE .....	7
I.2.1. Les principaux paramètres climatiques .....	8
I.2.1.1. Température.....	8
I.2.1.2. Pluviométrie .....	9
I.2.1.3. Humidité de l'air.....	9
I.2.1.4. Vent .....	9
I.2.1.5. Insolation.....	9
I.2.1.6. Evaporation .....	10
I.2.1.7. Evapotranspiration potentielle .....	10
I.2.2. Classification bioclimatique.....	10
I.2.2.1. Diagramme ombrothermique de GAUSSEN.....	10
I.2.2.2. Climagramme d'EMBERGER .....	11
I.2.2.3. Indice d'aridité de DE MARTONNE .....	11
I.3. CONTEXTE GEOLOGIQUE.....	12
I.3.1. Cadre stratigraphique .....	12
I.3.2. Tectonique.....	13
I.4. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE .....	14
I.4.1. Nappe du Continental Intercalaire (CI) .....	14
I.4.2. Nappe du Complexe Terminal (CT) .....	15
I.4.3. Nappe phréatique .....	15
CHAPITRE II: DESCRIPTIONS DES PEDOPAYSAGES.....	17
II.1. LES PAYSAGES DE LA CUVETTE DE OUARGLA.....	18
II.1.1. La Hamada .....	18



II.1.2. Les glacis .....	19
II.1.3. Les Regs .....	19
II.1.4. Les Ergs .....	20
II.1.5. Les Sebkhas et les Chotts .....	20
II.1.6. Les Oueds .....	21
II.2. LES SOLS DE LA CUVETTE DE OUARGLA .....	22
II.2.1. LITHOSOL.....	22
II.2.2. REGOSOL .....	22
II.2.3. SALISOL.....	23
CHAPITRE III : DESCRIPTIONS DES METHODES MISES EN ŒUVRE .....	24
III.1. DÉLIMITATION DES PÉDOPAYSAGES.....	25
III.2. DESCRIPTION MACROMORPHOLOGIQUE DU SOL .....	25
III.3. METHODES D'APPROCHE DE TERRAIN.....	25
III.3.1. Choix des sites et campagne du prélèvement.....	25
III.3.2. Mesure de la perméabilité .....	27
III.3.2.1. Montage expérimental <i>in situ</i> .....	27
III.3.2.2. Le protocole expérimental .....	28
III.3.3. Prélèvement des échantillons .....	28
III.4. LES ANALYSES PHYSIQUES ET CHIMIQUES DES SOLS.....	29
III.5. CARTOGRAPHIE DES PÉDOPAYSAGES ET DES CARACTERISTIQUES DES SOLS ...	30
III.6. ETUDE STATISTIQUE .....	31
CHAPITRE IV : CARACTERISATION DES SOLS DE OUARGLA .....	32
IV.1. PROSPECTION PEDOLOGIQUE .....	33
IV.1.1. Identification des horizons de la tranchée .....	33
IV.1.2. Description de des solums .....	36
IV.1.3. Organisation de la couche pédologique.....	38
IV.2. CARTOGRAPHIE DE QUELQUES PARAMETRES DES SOLS .....	39
IV.2.1. Teneur en sable .....	39
IV.2.2. Teneur en limon et argile .....	41
IV.2.3. pH .....	43
IV.2.4. Conductivité électrique .....	44
IV.2.5. Calcaire total .....	46
IV.2.6. Humidité.....	48
CHAPITRE V: PERMEABILITE DES SOLS DE DEFERENTS PEDOPAYSAGES.....	51
V.1. CARTOGRAPHIE DES PEDOPAYSAGES .....	52
V.1.1. Plateau .....	53
V.1.2. Glacis.....	54
V.1.3. Reg.....	55

V.1.4. Erg .....	56
V.1.5. Chott et Sebkha.....	56
V.1.6. Lits d'Oueds .....	57
V.2. PERMEABILITE DES SOLS DE DEFERENTS PEDOPAYSAGES .....	58
V.3. REPARTITION SPATIALE DE LA PERMEABILITE DES SOLS .....	61
CHAPITRE VI: MODELISATION DE LA PERMEABILITE DES SOLS .....	64
VI.1. MATRICE DE CORRELATION .....	65
VI.2. ANALYSE EN COMPOSANTE PRINCIPALE (ACP) .....	66
VI.3. MODELISATION DE LA PERMEABILITE DES SOLS .....	67
VI.3.1. Effet de la teneur du sol en sable très grossier (STG) sur la perméabilité .....	67
VI.3.2. Effet de la teneur du sol en sable grossier (SG) sur la perméabilité .....	67
VI.3.3. Effet de la teneur du sol en sable moyen (SM) sur la perméabilité.....	68
VI.3.4. Effet de la teneur du sol en sable fin (SF) sur la perméabilité .....	69
VI.3.5. Effet de la teneur du sol en sable très fin (STF) sur la perméabilité .....	69
VI.3.6. Effet de la teneur total du sol en sable sur la perméabilité.....	70
VI.3.7. Effet de la teneur du sol en limon et argile (L+A) sur la perméabilité.....	71
VI.3.8. Effet de la teneur du sol en eau (H) sur la perméabilité .....	71
VI.3.9. Effet de la densité du sol sur la perméabilité .....	72
VI.3.10. Effet des caractéristiques du sol sur la perméabilité (model multi variables) ...	73
CONCLUSION GENERALE .....	74
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE.....	77
ANNEXES .....	87

## Liste des abréviations

- STG** : sable très grossier  
**SG** : Sable grossier  
**SM** : Sable moyen  
**SF** : Sable fin  
**STF** : Sable très fin  
**L** : Limon  
**A** : Argile  
**ST** : total du sable  
**ANRH** : Agence nationale des ressources hydriques  
**ONM** : Office nationale de météorologie  
**K** : coefficient de perméabilité  
**P** : probabilité (signification)  
**St** : statistiques  
**ES** : Erreur standard  
**BI** : Borne inférieure  
**BS** : Borne supérieure  
**LTPS** : Laboratoire des Travaux Publics Sud  
**DTP** : Direction des Travaux Publics

## Liste des tableaux

Tableau I.1: Moyennes mensuelles des données climatiques à la station de cité EnNacer (ONM, 2000-2020) .....	8
Tableau V-1: Test de normalité .....	59
Tableau V-2: Les résultats de l'ANOVA.....	59
Tableau V-3:Regroupement d'informations à l'aide de la méthode Tukey et 95 % de confiance .....	59
Tableau V-4: Tests simultanés de Tukey pour les différences de moyennes.....	60
Tableau VI-1:Matrice de corrélation de Pearson entre les variables des sols de Ouargla	66
Tableau VI-2: Résultats de la régression linéaire (STG-K) .....	67
Tableau VI-3: Récapitulatif de modèle (STG-K) .....	67
Tableau VI-4: Résultats de la régression linéaire (SG-K) .....	68
Tableau VI-5: Récapitulatif de modèle (SG-K) .....	68
Tableau VI-6 : Résultats de la régression linéaire (SM-K) .....	68
Tableau VI-7 : Récapitulatif de modèle (SM-K) .....	69
Tableau VI-8: Résultats de la régression linéaire (SF-K) .....	69
Tableau VI-9: Récapitulatif de modèle (SF-K) .....	69
Tableau VI-10: Résultats de la régression linéaire (STF-K) .....	70

Tableau VI-11: Récapitulatif de modèle (STF-K) .....	70
Tableau VI-12: Résultats de la régression linéaire (Total du sable-K) .....	70
Tableau VI-13: Récapitulatif de modèle (Total du sable-K) .....	71
Tableau VI-14: Résultats de la régression linéaire (L+A-K) .....	71
Tableau VI-15: Récapitulatif de modèle (L+A-K) .....	71
Tableau VI-16: Résultats de la régression linéaire (H-K) .....	72
Tableau VI-17: Récapitulatif de modèle (H-K) .....	72
Tableau VI-18: Résultats de la régression linéaire (Densité-K) .....	72
Tableau VI-19: Récapitulatif de modèle (Densité-K) .....	73
Tableau VI-20: Variables exclus .....	73

### **Liste des figures**

Figure. I-1: Carte de localisation de la région d'étude (EarthSat, 2010) .....	7
Figure I-2: Diagramme ombrothermique de GAUSSEN de la région de Ouargla (2002–2020) .....	11
Figure I-3: Carte géologique de la région de Ouargla (Cornet et Gouscov, 1952; modifiée par Slimani, 2016) .....	12
Figure I-4: Coupe géo-structurale transversale régionale N-S (d'après Guiraud, 1975; modifiée par Slimani, 2016) .....	13
Figure I-5: Modèle du bilan hydrologique schématisé des apports-exhaures à Ouargla (Slimani, 2016) .....	14
Figure II-1: Coupe géomorphologique schématisée Ouest- Est de la cuvette de Ouargla (Slimani, 2016) .....	18
Figure III-1: Cartes d'échantillonnage .....	26
Figure III-2: Organigramme des étapes de cartographie .....	30
Figure IV-I: Coupe lithologique Ouest-Est de Ouargla .....	34
Figure VI-2: Granulométrie des solums.....	37
Figure VI-3: Box plots de la concentration en anions des sols de la séquence .....	38
Figure VI-4: Box plots de la concentration en cations des sols de la séquence .....	39
Figure VI-5: Box plots de la teneur en sable des sols de Ouargla .....	39
Figure VI-6: Carte de la teneur en sable des sols de Ouargla .....	40
Figure VI-7: Box plots de la teneur en limon et argile des sols de Ouargla .....	41
Figure VI-8: Carte de la teneur en limon et argile des sols de Ouargla.....	42
Figure VI-9: Box plots du pH des sols de Ouargla.....	43
Figure VI-10: Carte du pH des sols de Ouargla .....	44
Figure VI-11: Box plots de la conductivité électrique des sols de Ouargla.....	45
Figure VI-12: Carte de la conductivité électrique des sols de Ouargla .....	46
Figure VI-13: Box plots de la teneur en calcaire total des sols de Ouargla.....	47
Figure VI-14: Carte du calcaire des sols de Ouargla .....	48
Figure VI-15: Box plots de l'humidité des sols de Ouargla .....	49
Figure VI-16: Carte de l'humidité des sols de Ouargla.....	50
Figure V-1: Carte des pédopaysages dans la région de Ouargla.....	53

Figure V-2: Box plot de la composition granulométrique des sols de plateau .....	54
Figure V-3: Box plot de la composition granulométrique des sols de glacis .....	55
Figure V-4: Box plot de la composition granulométrique des sols de Reg .....	55
Figure V-5: Box plot de la composition granulométrique des sols d'Erg .....	56
Figure V-6: Box plot de la composition granulométrique des sols du Chott et Sebkha ...	57
Figure V-7: Box plot de la composition granulométrique des sols de lit d'oued .....	57
Figure V-8: Box plots de la perméabilité in situ des sols de pédopaysages de Ouargla ..	58
Figure V-9: Box plots de la perméabilité des sols de Ouargla .....	62
Figure V-10: Carte de la perméabilité des sols de Ouargla .....	63
Figure VI-1: Projection des variables et des individus sur le plan factoriel F1/ F2 .....	66

### **Liste des photos**

Photo III.1: Le perméamètre de Viguier installé à l'Erg et à Sebkha .....	27
---	----

### **Liste des annexes**

Annexe I: Caractéristiques physicochimiques des sols de la toposéquence .....	88
Annexe II: Analyses descriptives des caractéristiques physicochimiques du sol.....	89
Annexe III: Histogramme de fréquence de la perméabilité et la courbe de normalité ....	90
Annexe IV: Résultat du test de normalité .....	90
Annexe V: Analyses descriptives de la perméabilité des sols .....	90
Annexe VI: Résultats de test Tukey.....	91
Annexe VII: Ordre de grandeur de la conductivité hydraulique dans différents sols (Musy et Soutter, 1991) .....	92

# **INTRODUCTION GENERALE**

## INTRODUCTION GENERALE

Les déserts du monde présentent une grande diversité en termes de paysages et de processus géomorphologiques (Goudie, 2002). Lelubre, (1952) admet que, s'il y est une région du globe, où les formes de relief sont particulièrement nettes et visibles, c'est bien le désert et si les processus morphogénétiques (vent, eau...etc.) à l'œuvre dans ce milieu sont caractéristiques, rien n'est étonnant à ce que les formes qui en résultent le soient aussi.

L'étude scientifique des déserts et des reliefs désertiques a ses origines dans la seconde moitié du XIXe siècle, motivée par de nombreuses forces externes et internes, notamment l'impérialisme, le colonialisme, l'aventurisme militaire, la romance ainsi que le désir d'explorer et d'exploiter les ressources minérales et de revendiquer des terres pour l'agriculture, l'élevage et le pâturage (Mckee, 1979; Cooke et *al.*, 1993; Thomas, 1997 ; Prospero et *al.*, 2002 ; Goudie, 2005 et 2007). Dans la seconde moitié du XXe siècle, à la suite d'un certain nombre d'avancées technologiques et théoriques, ces études ont été rajeunies pour plusieurs raisons : la fascination intrinsèque en tant que formes de relief distinctes; le potentiel de ressources minérales des reliefs désertiques; les reliefs désertiques en tant qu'indicateurs des changements climatiques et écologiques passés et l'augmentation de l'occupation humaine ainsi que les risques environnementaux associés à l'augmentation de la poussière éolienne et des aérosols minéraux du désert et leurs effets sur la santé humaine et la visibilité atmosphérique. Les développements majeurs ont été menés par les progrès, le raffinement et la disponibilité des photos aériennes (après la Seconde Guerre mondiale) et de l'imagerie satellite (au cours des années 1970), permettant pour la première fois une perspective continentale et mondiale dans la recherche sur le désert, y compris la première classification mondiale complète des dunes à l'aide d'images Landsat (McKee 1979). En plus, l'émergence de la géomorphologie planétaire a conduit à accorder une plus grande attention aux reliefs désertiques en tant qu'analogues terrestres de Mars aride (Mckee, 1979 ; Graf et Lecce, 1988 ; Cooke et *al.*, 1993 ; Tchakarien, 1995 ; Thomas, 1997 ; Goudie, 1999 ; Werner et Kocurek, 1999 ; Malin et Edgett , 2000 ; Pease et Tchakarien, 2002, Prospero et *al.*, 2002 ; Goudie, 2005).

En Algérie, le désert (le Sahara algérien) est devenu le centre d'étude des scientifiques français et de leurs collègues africains durant la période coloniale. Les travaux des géo-scientifiques français, publiés à l'Institut des Travaux de Recherches Sahariennes à Alger, sont passés relativement inaperçus en dehors de l'Europe occidentale dont la plupart n'ont pas été traduits en anglais (Mckee, 1979 ; Cooke et *al.*, 1993 ; Thomas, 1997 ; Prospero et *al.*, 2002 ; Goudie, 2005). Le Sahara algérien est un désert hyper aride. Il s'agit d'un environnement éolien à haute énergie à des régimes de vent pluridirectionnels (Dubief, 1963 ; Rouvillois-Brigol, 1975 ; Goudie, 2007 ; Parsons et Abrahams, 2009 ; Derruau, 2010). Ses frontières coïncident avec les frontières du pays,

et il est bordé au nord par l'Atlas saharien. Sa superficie est estimée à 1 987 600 Km<sup>2</sup>, couvrant ainsi une superficie d'environ 90% de la superficie totale de l'Algérie. En fonction des caractéristiques de la surface et de sa structure externe, le Sahara algérien est divisé en trois régions distinctes, qui sont les plateaux rocheux, le Hoggar et le Tassili au sud-est et le bas Sahara oriental (le grand bassin oriental) (Jraya, 2013).

Le bas Sahara est constitué de surfaces planes crayeuses délimitées au nord par la bordure sud de l'Atlas saharien et au sud par le Hoggar. Au cours du quaternaire, il a été relié à la mer par la zone actuelle de Chotts. Actuellement, c'est une dépression dans le coin nord-est du Sahara algérien, avec quelques falaises apparaissant, dont la plus importante est le chott Malghigh. L'altitude du bas Sahara est très faible, ce qui favorise l'implantation des oasis là où les eaux souterraines sont disponibles (Jraya, 2013). Cette altitude est 200 mètres environ dans la région de Ouargla, dans laquelle on distingue des formes spécifiques du paysage saharien qui sont: Reg (désert de pierre), Hamada (plateau), Erg (des dunes), barkhanes (les dunes jeunes prennent la forme de demi-lunes), Glacis, Sebka, Chott et Oueds (Rouvillois-Brigole, 1975 ; Fairbridge, 1968 ; Monod, 1992 ; Derruau, 2010, Hamdi-Aïssa, 2001, Slimani, 2016). La caractérisation de l'état de surface de ces pédopaysages a été menée par Hamdi-Aïssa (2001) en utilisant la télédétection où il a signalé que la connaissance des propriétés des sols est indispensable pour caractériser et maintenir ces pédopaysages. La détermination de la perméabilité du sol, également appelée conductivité hydraulique, qui représente la facilité avec laquelle l'eau s'écoule à travers le sol, et sa variation sur les surfaces sont cruciales pour la stabilité des pentes, le taux d'érosion des sols et l'écologie de ces pédopaysages. De plus, elle est considérée comme l'un des paramètres les plus importants dans la gestion des ressources en eaux souterraines. La vitesse de tassement des sols saturés sous charge, la stabilité des talus et des ouvrages de soutènement, la conception des filtres en terre, la conception des barrages en terre sont quelques exemples d'applications de la perméabilité en géotechnique. La détermination du coefficient de perméabilité est cruciale pour estimer la quantité d'infiltration qui se produira à travers les barrages et les digues en terre et à travers leurs fondations, pour résoudre les problèmes liés au pompage des eaux d'infiltration des excavations de construction, pour déterminer l'espacement et la profondeur des drains pour abaisser la nappe phréatique sous routes et autoroutes, et pour effectuer des analyses de stabilité des ouvrages en terre et des murs de soutènement en terre lorsqu'ils sont soumis à des forces d'infiltration (Jabro, 1992 ; Alyamani et Sen, 1993 ; Das et *al.*, 2008 ; Salarashayeri et Siosemarde, 2012 ; Onur, 2014 ; Elhakim, 2016 ; Hussain et Nabi, 2016). Malgré son rôle important, la perméabilité des sols de Ouargla n'a pas fait l'objet d'études scientifiques à l'exception des études préliminaires d'où l'absence des données. Cela est un obstacle de l'estimation précise de la stabilité des pédopaysages, du taux d'érosion et des besoins des cultures, de la bonne gestion d'irrigation et de drainage et l'évaluation du potentiel de contamination de la nappe phréatique.



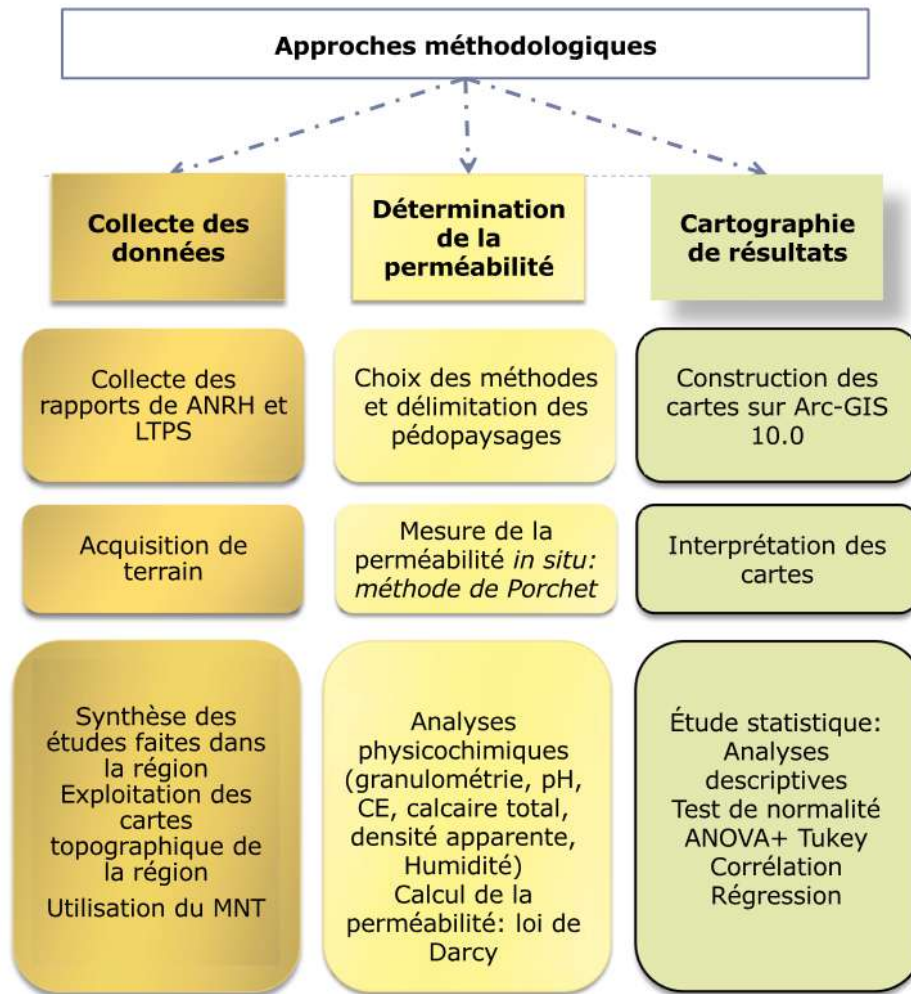
A partir de cette problématique et dans le cadre de contribuer à une gestion rationnelle et une protection efficace des eaux et des sols dans cet écosystème qui souffre actuellement de la dégradation de ses ressources hydro-édaphiques et de la baisse de la productivité agricole (Hamdi-Aïssa et Girard, 2000 ; Idder, 2007 ; Daddi Bouhoun et *al.*, 2013 ; Slimani et Guendouz, 2015 ; Slimani et *al.*, 2017 ; Amrani, 2021), nous avons fixé les objectifs suivants : Délimiter et cartographier les pédopaysages, déterminer la perméabilité et les caractéristiques physicochimiques des sols des différents pédopaysages et les cartographier en utilisant les systèmes d'information géographique (SIG); évaluer la variabilité de la perméabilité selon les pédopaysages de la région en utilisant des tests statistiques. Ensuite déterminer l'effet des paramètres physicochimiques sur la perméabilité.

Pour atteindre ces objectifs nous avons commencé par une synthèse bibliographique assez approfondie sur le plan régional et local suivie des campagnes de prélèvement sur le terrain. Les travaux de terrain sont assez fastidieux, surtout par rapport au choix des sites pour sélectionner les principales unités pédopaysagiques. Il a fallu donc faire un balayage sur l'ensemble de Ouargla pour toucher les différents pédopaysages existants et de mener des prélèvements avec mesure de la perméabilité *in situ* selon la méthode Porchet, à charge constante, adaptée pour les sols à dominance sableuse.

La deuxième étape et qui a été la plus dure à mener c'est celle relative à la partie analytique, la granulométrie, la conductivité électrique, le pH, le calcaire total, la densité apparente apparente et l'humidité ont été mesurés pour Trois cent échantillons. C'est l'étape la plus contraignante dans le travail en termes de moyens et de temps.

L'étape qui suivait consiste à établir la base de données, traiter, classer et vérifier toutes les données selon les différentes unités pédopaysagiques. Ensuite nous avons procédé à une interprétation approfondie de l'ensemble des données, ainsi, l'application des techniques cartographiques et statistiques pour développer des équations empiriques pour prédire la perméabilité à partir des fractions granulométriques et des paramètres physicochimiques pour surmonter les limitations des méthodes de mesures de laboratoire et du terrain.

L'organigramme suivant présente les approches méthodologiques adoptées pour atteindre ces objectifs.



Le travail est présenté par cette thèse que nous l'avons structuré en six chapitres complémentaires:

- Chapitre I : dans ce chapitre, nous aborderons le cadre d'étude en présentant le cadre géographique, climatique et hydrologique de la région d'étude.
- Chapitre II : il s'agit d'une description des paysages de la région et la classification de leurs sols.
- Le troisième chapitre est consacré au mode d'échantillonnage, aux méthodes d'analyses physico-chimiques des sols et au traitement des résultats obtenus.
- Le quatrième chapitre présente l'étude et la cartographie des caractéristiques physicochimiques des sols de la région de Ouargla.
- Le cinquième chapitre est consacré à la détermination et la comparaison de la perméabilité des sols de différents pédopaysages dans la région et à la cartographie de la perméabilité des sols de la cuvette.
- Le sixième chapitre est réservé à l'étude de l'effet des caractéristiques du sol sur la perméabilité et les équations de pédotransfert.
- Une conclusion générale termine le présent document par une mise en relief des principaux résultats obtenus et expose les recommandations en matière d'aide à la décision et des pistes de recherche à approfondir.

# **CHAPITRE I**

## **PRESENTATION DU SITE D'ETUDE**

## CHAPITRE I : PRESENTATION DU SITE D'ETUDE

Ce chapitre a pour objectif de présenter la région d'étude localisée dans la wilaya de Ouargla et son contexte régional. Les informations disponibles concernant les facteurs naturels susceptibles d'influencer les sols sont présentées (climat, géologie, et hydrogéologie). Il est basé sur une synthèse d'un nombre important de documents et des rapports collectés auprès de différents organismes (ANRH, ONM, LTPS, DTP) et des travaux réalisés au niveau de la région, dont certaines sont fréquemment cités (Cornet et Gouscov, 1952 ; Dubief, 1959; Dubief ,1963 ; Cornet, 1964; Beuf, 1971 ; Aumassip et *al.*, 1972 ; Rouvillois-Brigole,1975; Castany, 1982 ; Guendouz et *al.*, 1992 ; Hamdi-Aïssa, 2001 ; LeHouérou, 2009 ; Slimani, 2016).

### I.1. CADRE GEOGRAPHIQUE

Dans le désert nord-est de l'Algérie "Bas-Sahara" (figure I-1) se situe la région d'étude, 31° 54' à 32° 10'N et 5° 15' à 5° 27'E, avec une altitude moyenne de 134m. Elle est installée dans une large cuvette qui constitue l'aboutissement de l'aorte hydrographique de l'oued Mya appelée cuvette de Ouargla. Ce grand fleuve prend son origine à Tadmaït et arrive à sa fin avec l'oued Mzab et oued N'sa vers Sebkhât Sefioune, à 20 km au nord de Ouargla. Sa vallée atteint près de 30 km de largeur à cette latitude, mais elle se rétrécit et devient étroite d'environ 4 km au sud de l'agglomération (à 11 km) (Rouvillois-Brigole, 1975). Elle occupe une superficie de 99.000 ha et comprend les daïras et les communes suivantes : Ouargla, Rouissat, N'Goussa, Aïn el Beïda, Hassi Ben Abdellah et Sidi Khouïled (figure I-1) .

Sur le plan topographique, la région de Ouargla présente une pente légèrement inférieure à 1 ‰, qui n'est pas constante ce qui permet d'isoler trois tronçons (Rouvillois-Brigole, 1975):

- 2 ‰ du pied du Djebel Abbad à la rive nord de la sebkha de Ouargla.
- 1.8 ‰ au nord de la sebkha, immédiatement après le massif dunaire au sud de la palmeraie de N'goussa.
- 0.6 ‰ après le seuil de N'goussa, la topographie devient pratiquement plane jusqu'aux rives de Sebkhât Safioune.

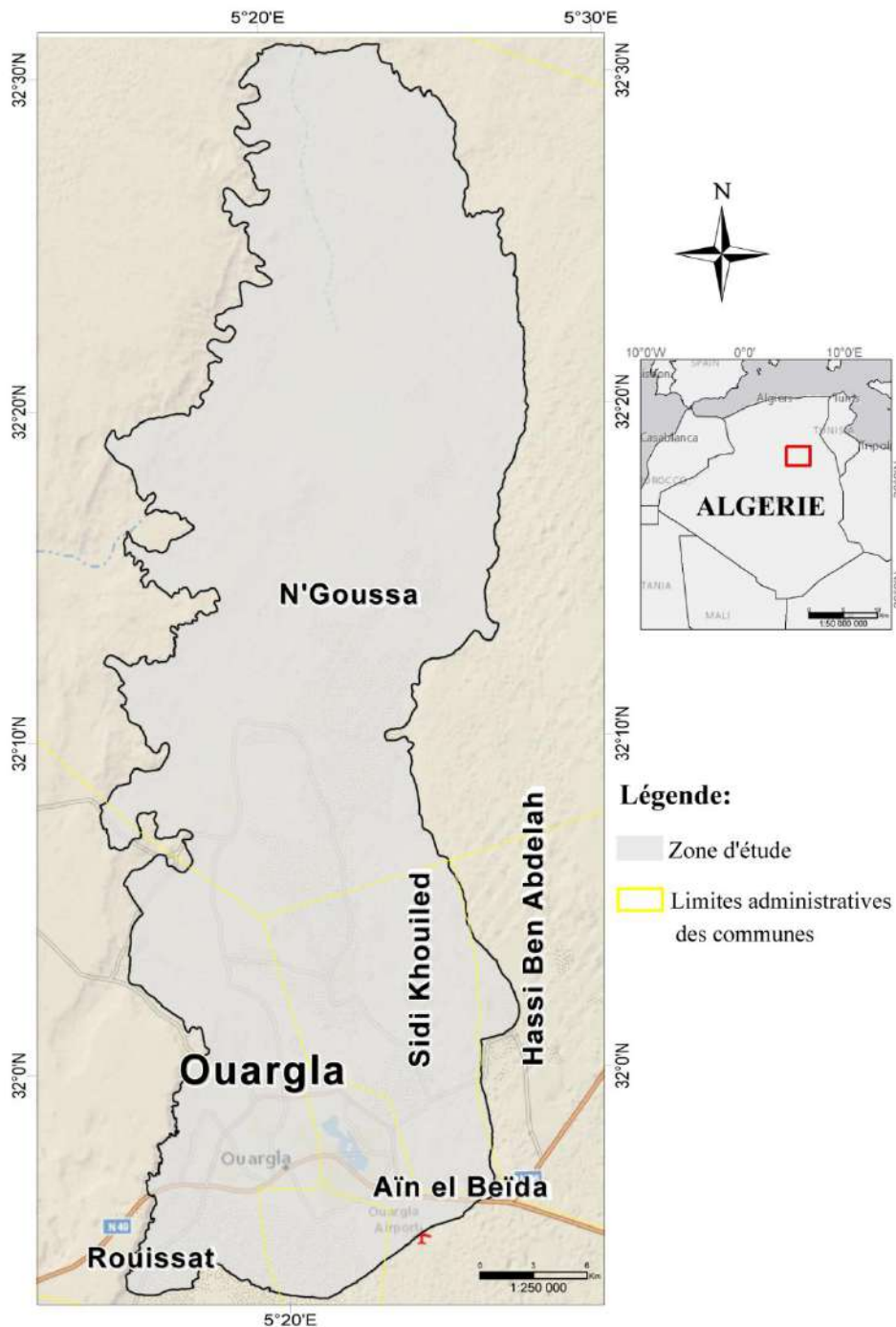


Figure. I-1: Carte de localisation de la région d'étude.

## I.2. CADRE CLIMATIQUE

Ouargla de part son appartenance au bas Sahara, elle obéit à un schéma de circulation atmosphérique qui consiste en un échange entre la zone de basse et celle de haute pression; malgré sa latitude septentrionale, le climat de Ouargla est un climat désertique avec un hiver froid et un été chaud (Dubief, 1959; Dubief, 1963; LeHouérou, 2009).

### I.2.1. Principaux paramètres climatiques

Rouillois-Brigole (1975) décrit qu'à Ouargla l'aridité s'exprime non seulement par des températures élevées en été et par la faiblesse des précipitations, mais surtout par l'importance de l'évaporation due à la sécheresse de l'air. Pour cela, il est nécessaire d'étudier les principaux paramètres climatiques de cette région à savoir la température, les précipitations, le vent et l'humidité relative de l'air (Tableau I-1).

Tableau I.1: Moyennes mensuelles des données climatiques à la station de cité EnNacer (ONM, 2000-2020).

Paramètres	T max	T min	T moy	Insol. (h)	H (%)	V (m.s <sup>-1</sup> )	P	EV (mm)	ETP
	(°C)								
Janvier	23,4	4,41	13,93	234,05	55,4	0,28	4,4	106,2	99,91
Février	21,19	6,48	13,84	230,42	47,8	10,94	2,35	138,9	96,49
Mars	25,58	10,29	17,93	250,28	40,7	11,47	4,55	239,6	120,31
Avril	30,58	15,42	22,98	274,93	34,7	13,00	1,3	237	136,64
Mai	32,98	20,19	27,73	299,31	30,9	15,39	5,45	350,9	164,47
Juin	38,98	25,10	32,90	278,64	25,4	15,58	0,23	455,1	186,07
Juillet	44	28,07	35,94	337,29	23	11,58	0,1	525,3	204,93
Août	41,27	27,53	33,97	327,96	26,7	13,19	0,8	436	184,78
Septembre	37,92	23,47	30,67	274,13	33,1	12,25	3,3	308,2	153,69
Octobre	31,46	17,02	24,24	242,64	43,4	11,33	4,1	229,9	126,99
Novembre	23,79	10,32	17,06	234,94	63,6	11,28	3,3	139	101,69
Décembre	19,66	6,08	12,87	211,43	58,2	10,92	2	101,8	97,10
Moyenne	30,90	16,19	23,67	3196,02*	40,24	11,34	31,8*	272,32	1673,07*

\*: Cumuls annuels

#### I.2.1.1. Température

C'est un facteur qui conditionne l'hydro-climatologie de toute la région. Les données des températures de l'air recueillies à la station de Ouargla (Tableau I-1) couvrent la période allant de 2000 à 2020, montrant que le climat de Ouargla se caractérise par un hiver doux avec des minima moyens qui dépassent les 16,19 °C. Les températures maximales moyennes de l'été s'élèvent à 30,90°C. La température moyenne annuelle est de 23,67 °C.

A l'échelle mensuelle, la région de Ouargla est caractérisée par de faibles températures hivernales et des températures estivales élevées accompagnées d'une forte amplitude thermique ce qui constitue l'une des caractéristiques climatiques de la région. Selon la température, La région de Ouargla passe par deux périodes :

- Une période relativement froide allant du mois de novembre au mois d'avril, avec une température minimale de 4,41 °C en janvier et un maximum de 30,58 °C en avril (Tableau I-1).
- Une période chaude du mois de mai au mois d'octobre, avec une température minimale de 17,02°C en octobre et un maximum de 44 °C en juillet (Tableau I-1).

### **I.2.1.2. Pluviométrie**

Les précipitations représentent le paramètre climatique le plus important, notamment dans les zones arides et semi-arides. Elles constituent également le facteur essentiel du régime hydrologique. Comme dans la majeure partie des régions sahariennes, les précipitations à Ouargla, sont marquées par leur caractère faible et irrégulier.

La saison pluvieuse s'étend sur une période allant de Septembre à mai. La moyenne interannuelle, pour la période 2000-2020, est de 36,74 mm/an (ONM, 2021). A l'échelle mensuelle, est sur la base des données disponibles (Tableau I-1), on distingue une période d'absence presque totale de précipitations qui s'étend du mois de juin au mois d'août, pendant laquelle la moyenne des précipitations est de l'ordre de 0,37 mm. Les plus fortes valeurs sont enregistrées pendant les mois de janvier, mars, mai et décembre avec respectivement 4,4 mm, 4,55 mm, 5,45 mm et 4,1 mm.

### **I.2.1.3. Humidité de l'air**

Ce facteur dépend essentiellement de la température de l'air. Il augmente au cours des passages d'orages et chute brusquement pendant le temps du Sirocco (Tableau I-1). L'humidité relative moyenne de la région est de l'ordre de 40.24 %, cependant, la période hivernale est relativement humide (55,4 – 63,6 %). Sous l'effet d'une forte évaporation et des vents chauds, l'humidité de l'air chute à des valeurs minimales en été (< 30%).

### **I.2.1.4. Vent**

Les vents dominants soufflent du nord, mais les plus forts proviennent généralement du nord-est et du sud. Ils suivent de ce fait approximativement l'orientation générale de la cuvette (Rouvillois-Brigole, 1975). Ces vents soufflent durant toute l'année (tableau I.1), avec des vitesses variables, allant de 0,28 m.s<sup>-1</sup> en janvier à 15,58 m.s<sup>-1</sup> en juin où la vitesse moyenne est de 11,34 m.s<sup>-1</sup>. Ces vents occasionnent des gênes importantes en transportant des quantités considérables de sables ce qui peut produire une érosion éolienne en contrepartie des dépôts également importants qui se transforment en dune de sable favorisant les phénomènes de désertification. Ils contribuent, en outre, d'une manière notable à l'assèchement de l'atmosphère (Dubief, 1952).

### **I.2.1.5. Insolation**

La variation annuelle de l'insolation concorde avec celle de la nébulosité, elle est de type méditerranéen présentant un maximum estival. Cependant, il existe plusieurs

variations annuelles dues aux petits accidents provoqués par des ponts nuageux (LeHouérou, 1995). Selon les valeurs mentionnées au tableau II.1, on estime que la durée moyenne d'ensoleillement journalière est de 8,75 h/j, elle dépasse légèrement 10 h/j en été tandis qu'elle ne dépasse pas 8 h/j en hiver. L'insolation mensuelle, la plus grande, correspond aux mois les plus chauds (juillet et août), alors que le minimum est enregistré durant la période de novembre à février. D'une manière générale, la durée moyenne est de l'ordre de 3196,02 h/an, soit 8 H 45 min de soleil par jour.

#### **I.2.1.6. Evaporation**

L'évaporation est un paramètre climatique qui a une grande influence sur l'eau dans le sol. L'évaporation mensuelle moyenne est de 272,32 mm (tableau I.1). Cela s'explique par les fortes températures et le fort pouvoir évaporant de l'air et des vents desséchants. Les mois où l'évaporation est la plus forte, sont les mois de juin, juillet et août avec respectivement 455,1 mm, 525,3 mm et 436 mm. Les mois à faible évaporation sont décembre et janvier (101,8 mm et 106,2 mm).

#### **I.2.1.7. Evapotranspiration potentielle**

L'évapotranspiration est un phénomène dépendant de plusieurs paramètres climatiques tels que la température, l'humidité relative, l'insolation et d'un ensemble de facteurs relatifs au système sol-plante (extension de la surface d'évaporation, caractéristiques du couvert végétal). Les données de l'évapotranspiration potentielle de la région de Ouargla obtenues par le biais de l'application de la méthode de Thornthwaite exprimée par  $ETP = 16(10T/I)^a * K$ , où T est la température moyenne mensuelle exprimée en °C, I est l'indice thermique annuel, i est l'indice thermique mensuel et K est un coefficient d'ajustement mensuel (Le Houérou, 2009).

Les valeurs d'ETP atteignent leurs maximums au mois de juillet avec 204,93 mm pour un cumul annuel de l'ordre de 1673,06 mm soit environ 51,19 % de l'évaporation (tableau I.1). On constate que les mois de la saison sèche sont marqués par des valeurs relativement fortes de l'évapotranspiration, tandis que le minimum se manifeste au mois de décembre.

### **I.2.2. Classification bioclimatique**

La classification écologique des climats est effectuée par deux facteurs les plus importants à savoir, la température et la pluviosité (Dajoz, 1971). Ces deux facteurs sont utilisés pour établir le diagramme ombrothermique de GAUSSEN et le climagramme d'EMBERGER.

#### **I.2.2.1. Diagramme ombrothermique de GAUSSEN**

Le diagramme ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN (1953) met en évidence les périodes sèches et humides d'une région. GAUSSEN considère que le climat



d'un mois est sec quant le total mensuel des précipitations exprimé en (mm) est inférieur à deux fois la moyenne thermique mensuelle exprimée en °C, soit  $P \text{ mm} < 2T$ .

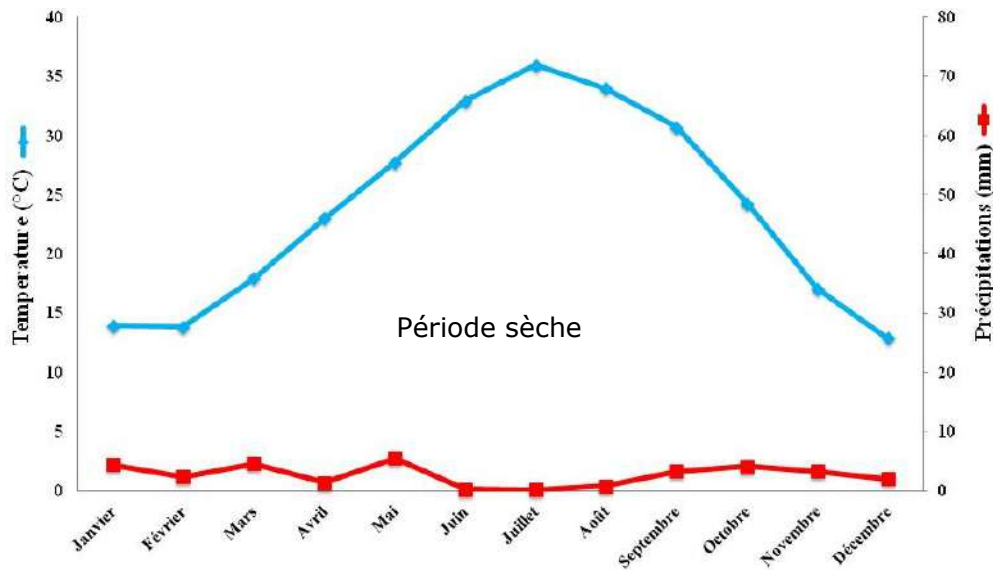


Figure I-2: Diagramme ombrothermique de GAUSSEN de la région de Ouargla (2002-2020)

A partir de la figure I-2, on constate que  $P < 2T$  durant toute l'année ce qui indique que la période sèche s'étale sur toute l'année dans la région de Ouargla.

### I.2.2.2. Climagramme d'EMBERGER

La classification des régions climatiques est basée sur le calcul du quotient pluviométrique d'Emberger (1995), qui est selon la formule de STEWART adaptée pour l'Algérie, exprimé par :  $Q_3 = 3,43P / (M - m)$

Où P est la pluie annuelle exprimée en mm, M est la température maximale du mois le plus chaud, et m est la température minimale du mois le plus froid (Dajoz, 1971, Le Houérou, 1995).

Dans la zone d'étude, le coefficient  $Q_3$  est de 2,76 pour une pluie moyenne de 31,88 mm/an, ce qui permet de classer la région dans un étage bioclimatique saharien (hyper aride) à hiver doux.

### I.2.2.3. Indice d'aridité de DE MARTONNE

L'indice de l'aridité DE MARTONNE est exprimé par l'équation :  $IM = P / T + 10$   
 Où P représente la moyenne annuelle des précipitations, exprimé en mm et T la température annuelle moyenne en °C. Cet indice permet de définir les intervalles climatiques suivants :

- $0 < IM < 5$  : climat désertiques aréiques
- $5 < IM < 20$  : climats très secs à secs
- Pour  $IM > 30$  : climats humides

Ce coefficient, d'un usage constant en géographie, Il est d'autant plus faible que le climat est plus aride (Ozenda, 1991 ; Idder, 1998 ; Slimani, 2016, Bouhanna, 2021).

Dans la zone d'étude, nous trouvons une valeur de  $IM = 0.07$ , elle traduit donc une aridité nettement exprimée.

### I.3. CONTEXTE GEOLOGIQUE

#### I.3.1. Cadre stratigraphique

L'étude de la carte géologique de l'Algérie au 1/500 000 (figure I-3) montre que la cuvette de Ouargla est creusée dans un dépôt du continental terminal dans lequel alternent des sables rouges, des argiles et parfois des marnes; le gypse est peu abondant, daté du Pontien. Le dépôt est connu sous le nom du Miopliocène.

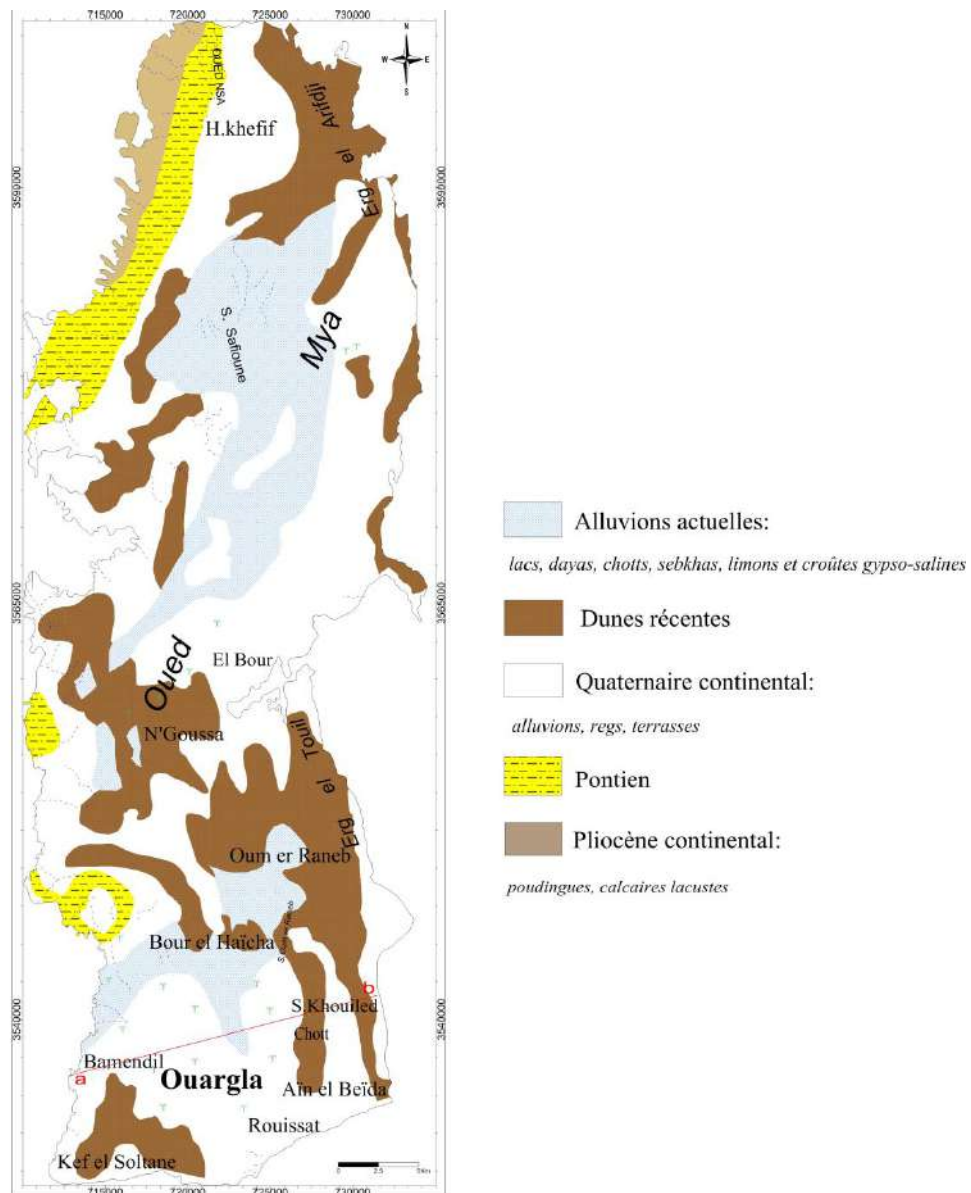


Figure I-3: Carte géologique de la région de Ouargla (Cornet et Gouscov, 1952; modifiée par Slimani, 2016).

On distingue quatre niveaux différents du Miopliocène, qui se sont de bas en haut (Cornet, 1964; Bel et Dermagne, 1966): Un dépôt argileux peu épais (< 10m), un niveau

gréso-sableux qui devient argileux vers le sommet, le plus épais (> 30m) et le plus constant, un niveau argilo-sableux et un niveau très épais ( $\approx$  30m) dans la zone des chotts, à sommet affleurant sur de grandes surfaces et souvent constitué par une croûte de calcaire gréseux (croûte Hamadienne). (Cornet et Gouscov, 1952 ; Aumassip et *al.* ; 1972 ; Beuf, 1971 ; Guendouz et *al.*, 1992 ; Slimani, 2016 ; Bouhanna, 2021)

Les terrains du Miopliocène sont recouverts par une faible épaisseur de dépôts quaternaires qui se caractérisent par des affleurements d'alluvions récents et des dépôts sableux (Slimani, 2016).

### I.3.2. Tectonique

La cuvette de Ouargla fait partie de la dépression d'Oued M'ya. Cette dernière, occupe la plus grande partie du bas-Sahara. L'épaisseur totale de la couverture sédimentaire atteint 400 m dans la partie Sud et la partie Ouest de la dépression, et elle augmente dans la partie Nord jusqu'à 6000 m. Dans son ensemble cette dépression est une structure dissymétrique assez plate et elle est le résultat de mouvements compressifs N0-SE et N-S du Mésozoïque et du Cénozoïque ainsi que de la réactivation à partir du Sénonien d'anciens accidents tectoniques hercyniens. Cette dépression a constitué plus tard un milieu favorable pour le dépôt des formations néogènes et quaternaires du bas Sahara (Aliev, 1972 ; Bracène & Frizon de Lamotte, 2002; Yelles-Chaouche et *al.*, 2006).

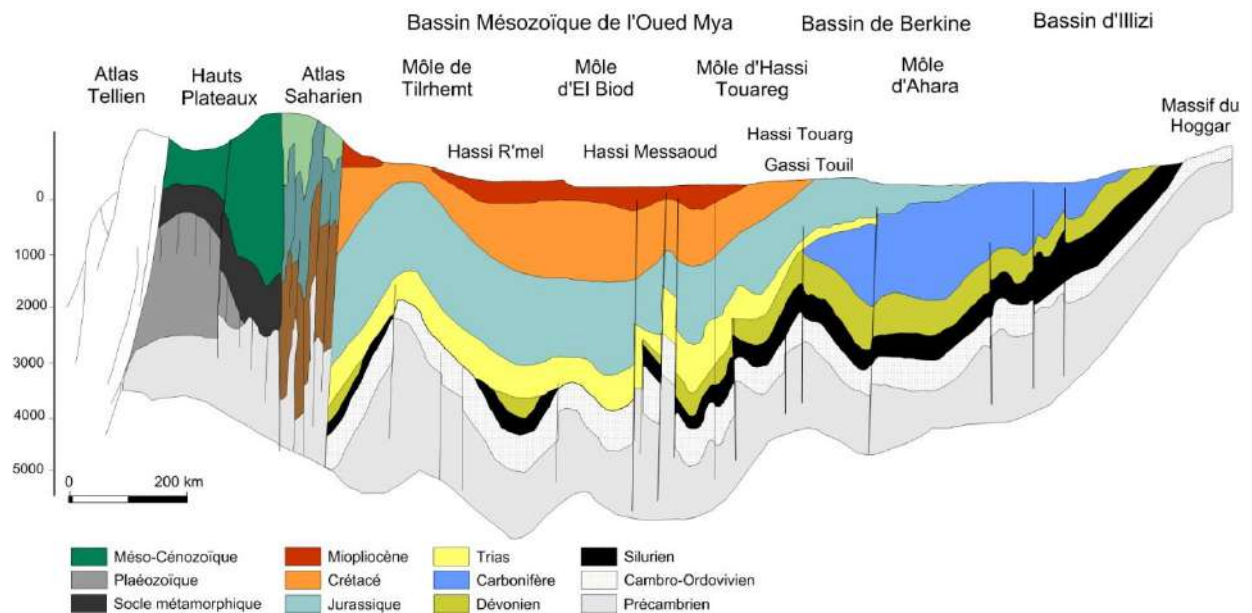


Figure I-4: Coupe géo-structurale transversale régionale N-S (d'après Guiraud, 1975; modifiée par Slimani, 2016).

Sur la coupe géo structure transversale régionale (figure I-4), sont représentées toutes les structures et les failles mises en évidence par les études géophysiques, montrant que la dépression est structurellement affectée par les failles hercyniennes du Hoggar à partir du comblen jusqu'au sénonien inférieur. Ces failles sont orientées sud-est

nord-ouest et traversent la région de Ouargla par l'est ; elles seraient à l'origine de communications entre les différents aquifères dans cette zone (Guendouz et *al.*, 1992-2003; Edmund et *al.*, 2003 ; Slimani, 2016).

#### I.4. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

A Ouargla, les formations géologiques contiennent deux grands ensembles de formations aquifères séparés par d'épaisses séries évaporitiques ou argileuses. De la base du crétacé supérieur, l'ensemble inférieur est appelé "Continental Intercalaire (CI)", et l'ensemble supérieur est appelé "Complexe Terminal (CT)". Une troisième formation, d'importance plus modeste, s'ajoute aux deux précédentes "la Nappe Phréatique" (figure. I-5).

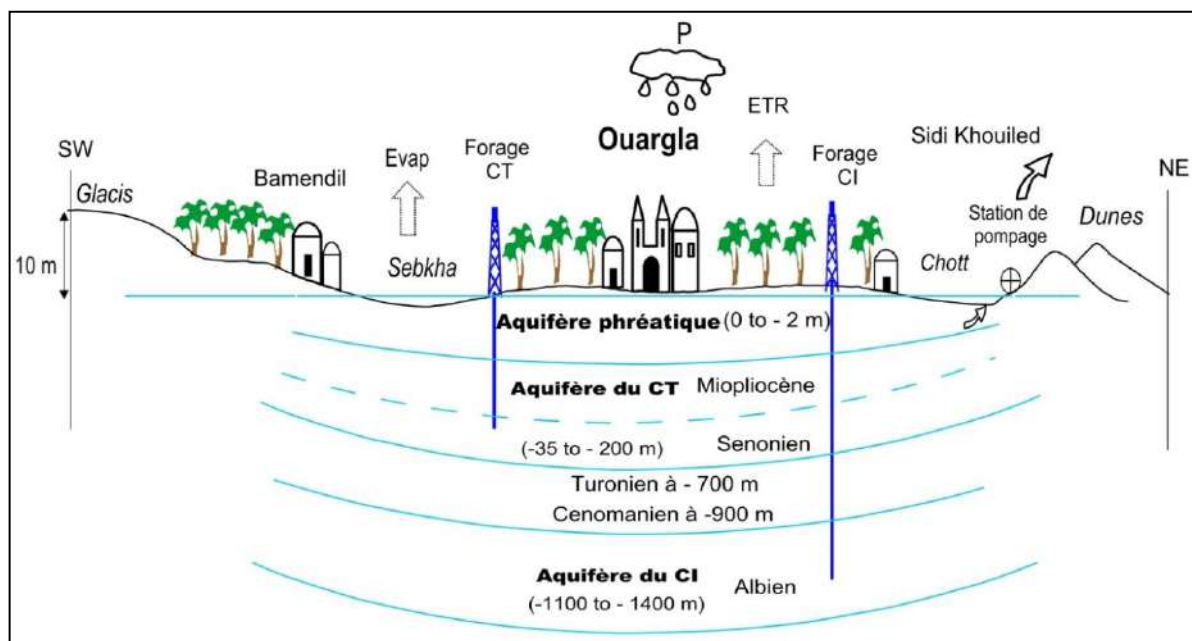


Figure I-5: Modèle du bilan hydrologique schématique des apport-exhaures à Ouargla (Slimani, 2016).

##### I.4.1. Nappe du Continental Intercalaire (CI)

La nappe du Continental Intercalaire est contenue dans des formations sablo-gréseuses et argilo-sableuses. Elle est comprise entre le trias et le crétacé inférieur (Cornet et Gouscov 1952; Unesco, 1972), et porte souvent, de manière restrictive, le nom de nappe de l'Albien en référence à son étage supérieur (Cornet, 1961). C'est un énorme réservoir qui est alimenté par l'infiltration des eaux dans l'Atlas saharien et suralimenté par les eaux circulant sous la hamada sud-oranienne et sous l'Erg Occidental (Cornet, 1964; Castany, 1982).

Dans la région de Ouargla, le toit de la nappe est situé à -850 m (par rapport au niveau de la mer) et à -1000 m au sol, l'épaisseur de ce réservoir est de 800 m au total.

L'aquifère du C.I est caractérisé par une température qui dépasse les 60°C; une minéralisation de l'eau qui oscille entre 1 et 2 g/l de résidu sec; une transmissivité de  $8.10^{-3}$  m/s et un coefficient d'emmagasinement =  $10^{-3}$  et un débit de 1500 litres/minutes pour un forage de 900 m de profondeur (Abderrahmane, 1997; Bonnard et Gardel, 2003; Slimani, 2016).

#### **I.4.2. Nappe du Complexe Terminal (CT)**

Le Complexe Terminal (CT) couvre la majeure partie du bassin oriental du Sahara septentrional et s'étend sur une superficie de 350.000 Km<sup>2</sup> avec une profondeur oscillante entre 100 et 500 m (Castany, 1982). Il regroupe plusieurs formations litho-stratigraphiques dans lesquelles se trouvent des formations aquifères contenues dans les horizons perméables du Crétacé supérieur et du Tertiaire (Cornet, 1964; Nesson, 1978; Castany, 1982). Les nappes du Complexe Terminal sont essentiellement alimentées par les eaux de ruissellement qui proviennent des reliefs de la périphérie du bassin (Flancs est du de la dorsale du Mzab) (ERESS, 1972; Guendouz et al., 2003; OSS, 2003), ainsi que par les infiltrations qui s'effectuent à travers l'Erg Oriental (Bel et Dergmae, 1966; Nesson, 1978; Ben Brahim, 1997, Moulla et al., 1997).

Le complexe Terminal comprend trois nappes qui sont du haut en bas le Mio-pliocène, le Sénonien et le Turonien mais dans la région de Ouargla seules sont exploitées les nappes du Mio-pliocène et du Sénonien. Les caractéristiques hydrodynamiques de la nappe dans la région varient de 8 à  $100 \cdot 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s pour la transmissivité et de 5 à  $30 \cdot 10^{-3}$  pour le coefficient d'emmagasinement (Slimani, 2016)

#### **I.4.3. Nappe phréatique**

Les sables de surface du Quaternaire renferment la nappe phréatique qui est constituée de sable fin à moyen argileux, rarement grossier au Sud de Ouargla et plus vers le Nord (N'goussa et Sebkheth Safioune) les sables sont riches en gypse, qui devient dominant à Sebkheth Safioune. Cette nappe circule dans les sables dunaires de l'Oued Mya. Elle est présente partout à l'échelle de la région à des profondeurs très rapprochées de la surface du sol dont elle est en moyenne 1,5 m de profondeur. Sa frange capillaire affleure souvent sur la surface du sol sous forme de petits chotts qu'on trouve de part et d'autre de la ville de Ouargla (Hamdi-Aïssa, 2001; Bonnard et Gardel, 2003).

La qualité des eaux de cette nappe est très dégradée. La conductivité est très forte. Elle augmente en allant du Sud vers le Nord. A Safioune, la conductivité varie de 199 à 214 ms/cm à 25 °C, ce qui correspond à environ 250-300 g/l de sel. La perméabilité de l'aquifère varie de  $1,27 \cdot 10^{-3}$  cm/s à  $-5,6 \cdot 10^{-5}$  cm/s (Abderrahmane, 1997; Bonnard et Gardel, 2003; Hamdi-Aïssa, 2001; Charikh, 2015; Slimani, 2016).

## CONCLUSION

La région de Ouargla correspond à une grande dépression d'une superficie d'environ 750 km<sup>2</sup>. Elle est située dans le lit quaternaire de la basse vallée fossile de l'oued Mya.

Du point de vue climatique, elle appartient à l'étage méditerranéen de type saharien. Les précipitations sont irrégulières, l'étude des variations séculaires fait ressortir, pour une moyenne de 31,88 mm de pluie annuelle. Les vents, et notamment les vents de sable, jouent un rôle particulièrement desséchant. L'humidité relative est faible, atteignant un maximum en novembre de 63,6 %. En moyenne l'évaporation croît de 101,8 mm en décembre à 525,3 mm en juillet. L'évapotranspiration atteint son maximum au mois de juillet avec 204,93 mm.

La géologie de la région est creusée dans un dépôt du Miopliocène dans lequel alternent des sables rouges, des argiles et parfois des marnes. Le Pliocène continental constitue l'ossature des regs sous forme d'une croûte calcaire. Le Quaternaire, composé d'alternances de couches perméables sableuses et de couches marneuses relativement imperméables.

Le système aquifère de la région est formé de trois unités : la nappe du Continental Intercalaire qui se situe dans les formations continentales du crétacé inférieur, la nappe du Complexe Terminal regroupant plusieurs aquifères qui circulent dans l'une ou deux formations litho-stratigraphiques du Sénonien, l'Éocène carbonatés ou du Miopliocène sableux, ainsi que la nappe phréatique logée dans les formations perméables sablo-gypseuses du Quaternaires.

## **CHAPITRE II**

### **DESCRIPTIONS DES PEDOPAYSAGES**

## CHAPITRE II : DESCRIPTIONS DES PEDOPAYSAGES

Le Sahara est loin d'être une surface plane; certain nombre de reliefs se sont développés et ont reçu des noms spécifiques, principalement d'origine arabe. Ces reliefs constituent des paysages spécifiques du milieu saharien. Le présent chapitre a pour objectif de mettre en évidence les caractéristiques géomorphologiques et pédologiques de la région de Ouargla.

### II.1. LES PAYSAGES DE LA CUVETTE DE OUARGLA

La cuvette de Ouargla ainsi que l'ensemble du Bas-Sahara est constitué de formations sédimentaires (Hamdi-Aïssa, 2001). D'après Rouvillois-Brigol (1975), Ouargla présente une dissymétrie marquée par la présence d'une falaise occidentale (le Baten), particulièrement nette et continue, tandis que la limite orientale est beaucoup plus imprécise. Nous allons examiner la géomorphologie de la zone située de part et de l'autre du sillon de l'Oued Mya à travers une coupe de l'ouest à l'est de la cuvette (Figure II-3)

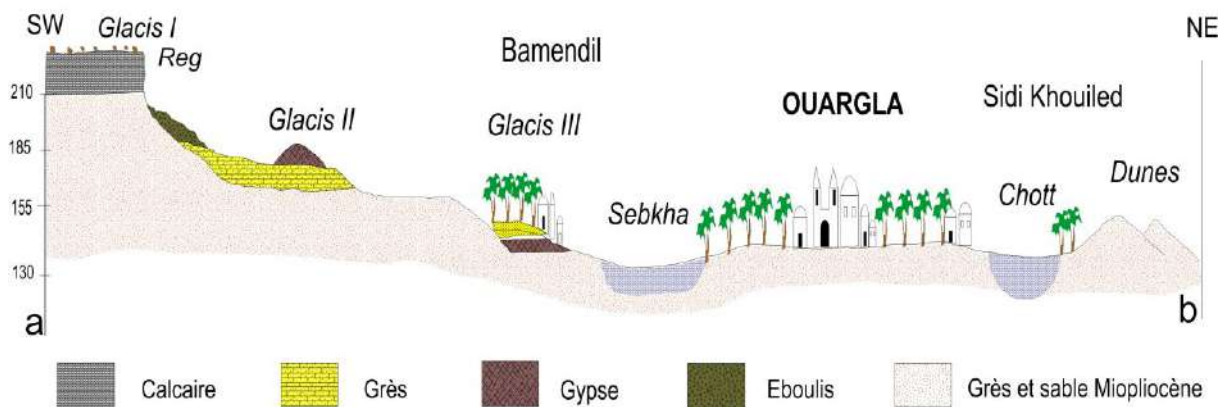


Figure II-1 : Coupe géomorphologique schématique Ouest- Est de la cuvette de Ouargla (Slimani, 2016)

#### II.1.1. La Hamada

La signification du terme Hamada est assez peu précise et traduit simplement l'état d'un plateau à peu près horizontal dont la surface est garnie soit de rocailles soit au contraire d'éléments détritiques fins (Gevvin et *al.*, 1975). Les hamadas du Sahara septentrional se caractérisent par le prolongement sur le piémont atlasique méridional du faciès détritique et lacustre de la Torba, qui est un sédiment non stratifié, interrompu par un ou plusieurs niveaux de calcaires dolomitiques silicifiés, appelés carapace Hamadienne (Conrad, 1969 ; Mabbutt, 1977 ; Parsons et Abrahams, 2009).

Dans la région de Ouargla la limite vers l'Ouest de la cuvette, est marquée par une falaise qui se termine par un plateau de la Hamada pliocène de 200 à 250 m d'altitude, appelé localement «plateau de Gantra ». Ce plateau s'abaisse légèrement d'Ouest en Est



où on trouve des composées de formation dunaires (Erg Touil et Erg Boukhenza), (Rouvillois-Brigol, 1975). Il est interrompu par une vaste dépression ovale de la sebkha Mellala (30 km de long, de 6 à 11 Km de large, 80 à 90 m de profondeur), qui s'étend parallèlement à la vallée de l'Oued Mya (Hamdi-Aïssa, 2001). Il est très fortement érodé ne laissant que quelques buttes témoins appelées « Goure » (Rouvillois-Brigol, 1975). Sur les plateaux, le sol est constitué d'un matériau meuble exclusivement détritique, hérité de l'altération des grès à sable rouge du Miopliocène, c'est le sol le plus pauvre en gypse dans la région, à 10 m de profondeur, il s'agit d'un sol sableux à graviers (Slimani, 2016 ; Hadjkouider, 2019).

### **II.1.2. Les glacis**

Le glacis (dit glacis d'érosion ou d'ablation pour le distinguer de remblaiements en plan incliné) est une topographie de pente longitudinale nette (1 à 5 % en moyenne), constante ou légèrement concave, mais de pente latérale nulle; autrement dit, les rills (rigoles peu profondes, légèrement sinueuses) qui le parcourent coulent parallèlement sans s'enfoncer sensiblement dans la surface du glacis, de sorte qu'on ne saurait distinguer lits et interfluves (Derruau, 2010).

D'après Côte (1998), Hamdi-Aïssa et Girard (2000) et Hamdi-Aïssa *et al.* (2004), sur le versant Ouest de la cuvette de Ouargla, les glacis s'étagent du plus ancien au plus récent, d'Ouest en Est sur quatre niveaux caractéristiques. Le plus ancien recoupe le sommet de la bordure du plateau en buttes, son altitude s'abaisse de 225 m à l'Ouest jusqu'à 200 m environ à l'Est. Sa couverture très caractéristique est une croûte gypso calcaire épaisse de 1,5 m; son exiguïté le rend souvent difficile à distinguer de la surface du plateau de la Hamada. C'est à ce niveau qu'il faut rattacher certains Gara(s) de la vallée (Djebel Abbad, Gara Krime, Bab El-Hattabat, les buttes de trois pitons sur la route de Touggourt, ...etc.).

Les glacis, de deuxième niveau à 180 m et de troisième niveau à 160 m sont beaucoup plus visibles, se caractérisent par l'affleurement du substrat gréseux du Miopliocène. Le dernier est souvent recouvert de sable et de graviers gréseux plus ou moins encroûtés de gypse; sa pente est faible. Le glacis de troisième niveau (160 m d'altitude) a été fortement démantelé lors de la formation du dernier glacis, développé à 140 m d'altitude environ, et a donné naissance à des formes de relief originales sur les quelles se sont installées quelques palmeraies de Bamendil.

### **II.1.3. Les Regs**

Reg (au Sahara occidental), ou Serir (au Sahara oriental) ou Gibber Plain (Australie), ou Saï (Désert du Tarim, Asie centrale), l'un des reliefs formés à la suite de l'érosion éolienne, dans les régions arides et semi-arides où l'érosion éolienne est forte. (Fitte *et al.*, 1947; Fairbridge, 1968 ; Derruau, 2010).

Dans la cuvette de Ouargla, le reg correspond à une plaine sablonneuse ou large dépression largement recouverte de graviers lisse ou cailloux, dont le sol et les sédiments plus fins ont été dépouillés par ablation éolienne. Ces cailloux proviennent de la désagrégation mécanique des roches soumises aux violentes alternances quotidiennes des températures. La surface est dilatée par les températures diurnes élevées et se contracte pendant les nuits qui sont froides. Ce mouvement permanent fissure la surface, les morceaux plus petits sont emportés par le vent, exposant ainsi une nouvelle surface à l'agression thermique. Seuls restent en place les morceaux momentanément intransportables. La surface est inhabitée de manière permanente et totalement dépourvue de végétation

#### **II.1.4. Les Ergs**

Le terme Erg, d'origine arabe, signifie les dunes qui se localisent dans les vastes régions où les édifices sableux sont jointifs ou juxtaposés, actifs ou partiellement fixés (Lelubre, 1952 ; Wilson, 1971 ; Cooke *et al.*, 1993 ; Dewolf et Bourrié, 2008).

Les dunes entourent toute la région de Ouargla. Au Nord, elles sont situées à N'Goussa, se caractérisent par une abondance de sable, d'herbes et de buissons désertique. Les dunes au côté Sud sont situées à Gara Krima qui est caractérisée par un manque d'approvisionnement en sable et un grand nombre d'obstacles, notamment des routes et quelques constructions, ce qui a entraîné la raréfaction des dunes et la présence de certains modèles de barkhanes de manière limitée. Les dunes orientales sont situées dans la zone de Sidi Khouild qui se caractérise par une abondance de sable. Le champ dunaire du versant Ouest de la région, situé à proximité du bassin de Berkaoui et se caractérise par la présence de barrières naturelles (rochers et collines) ; les dunes sont hautes et souvent de forme irrégulière, avec quelques barkhanes éparpillées dans des endroits séparés (Mechri et Chihi, 2014 ; Ouled Elhadj et Ouakad, 2020).

Les dunes vives ( Et-Touil, Arifdji, Boukhenza) restent les plus répandues et les plus caractéristiques dans la région de Ouargla, où elles constituent le seul élément vraiment dynamique de la morphologie. Ces dunes sont formées de sables éoliens d'origine gréseuse provenant de la Hamada Miopliocène (Mainguet et Jacqueminet, 1984; Dutil, 1971; Dewolf et Bourrié, 2008).

#### **II.1.5. Les Sebkhass et les Chotts**

Les sebkhass et les chotts sont des dépressions topographiques fermées qui caractérisent les surfaces à faible angle des zones arides du monde (Jaeger, 1939). Monod (1992) dit que lorsque les eaux s'évaporent sous l'effet de la chaleur, des plaques de sels divers se déposent en surface suivant l'origine de leurs eaux (phréatiques ou superficielles) formant les chotts et les sebkhass qui sont des fonds plats et salés des dépressions fermées, sans végétation, caractérisés par des efflorescences salines en

périodes sèches, inondable par des eaux de crue ou des remontées d'eaux profondes en périodes de pluie (Kinsman, 1969; Neal, 1975; Warren, 1989; Briere, 2000).

Ces formations morphologiques constituent les niveaux les plus bas du paysage (103 à 131 m) et occupent environ 25.000 hectares de la cuvette (Slimani, 2016). En aval de Ouargla, les diverses sebkhas Oum Er-Raneb, Nakhlet En-Nous, El-Mergueb alternent avec des massifs dunaires jusqu'à la sebkha Safioune qui est à 103 m d'altitude point le plus bas de la région (Idder, 1998; Slimani, 2016).

Les sondages superficiels effectués montrent que sur les Chotts et les terrains intermédiaires, l'horizon de surface est une croûte gypseuse épaisse, blanchâtre partiellement couverte de voiles de sable éolien gypso-siliceux. De 10 à 20 cm de profondeur, on trouve un encroûtement gypseux pulvérulent, homogène de couleur jaune rougeâtre très claire. En dessous, on trouve un encroûtement gypseux induré de 40 cm d'épaisseur. Plus en dessous un tuf présente une teneur de gypse décroissante. Les Sebkhas sont caractérisées par une salure extrêmement élevée, ces croûtes salines reposent sur des matériaux limono-sableux (Slimani, 2016).

#### II.1.6. Les Oueds

Les oueds sont des cours d'eau le plus souvent intermittent des régions sèches, où l'alimentation s'effectue presque uniquement par ruissellement, et s'achevant généralement dans une dépression fermée ou disparaissant par épuisement (Roger *et al.*, 1993; Ballais, 2010 ; Derruau, 2010).

L'hydrographie de la cuvette de Ouargla se caractérise par son endoréisme (Dubief, 1953). Les bassins versants de Oued Mya, Oued Mzab et Oued N'sa forment le réseau hydrographique qui aboutit à la Sebkhât Safioune, Nord de la région (Hamdi-Aïssa, 2001).

- **Oued Mya** : Il draine le versant nord-est du plateau de Tadmaït. Le bassin de l'oued Mya est en forme d'une vaste gouttière relevée du sud (800 m) avec une inclinaison très faible (0,1 à 0,2) vers le nord-est, il s'étend sur 19800 km<sup>2</sup>. Le cours fossile de l'oued Mya inférieur est jalonné par de vastes sebkhas jusqu'à Ouargla. Au nord de Ouargla, la vallée n'est plus discernable. Si l'on admet cependant que l'oued Mya quaternaire se jetait dans le chott Melghir actuel, sa longueur devait atteindre 900 km (Dubief, 1953).
- **Oued M'zab** : Il est constitué à l'amont par la confluence de trois importants oueds : El Abiod, Laadhira et Areguedane; A une dizaine de kilomètres en aval de Ghardaïa, se trouve un deuxième centre de rencontre (Zelfana), à droite oued Noumerat et à gauche oued hasseï. L'oued M'zab prend naissance dans la région de Botma Touila à une altitude de 750 m et il coule sensiblement d'ouest en est sur 325 km environs, et se termine à Sebkhât Sefioune (Dubief, 1953; Hamdi-Aïssa, 2001).
- **Oued N'sa** : Il part de la région de Tilremt, vers 750 m d'altitude pour aboutir à Sebkhât Sefioune à la cote 107 m; Il présente une superficie de 7800 km<sup>2</sup> environ,

avec un parcours de 320 km, les limites orientales sont peu précises par suite de la nature géologique de la région (Slimani, 2016 ; Djili 2018). L'oued est composé d'un cours supérieur de direction ouest-est d'une quarantaine de kilomètres, un cours moyen de direction nord nord-ouest, sud sud-est de 100 km, et un cours inférieur entièrement situé dans le pliocène continental à 160 km dans lequel l'oued se dirige à nouveau vers l'est (Hamdi-Aïssa, 2001, Slimani, 2016 ; Djili, 2018).

Les bas-fonds de la cuvette sont occupés par des alluvions. Ce sont des terrains inondables de la sebkha qui s'allongent en forme de croissante, au nord de la ville depuis l'Est vers l'Ouest.

## **II.2. LES SOLS DE LA CUVETTE DE OUARGLA**

Les sols arides sont l'un des ordres des sols les plus répandus au monde, et les plus caractérisés par leurs carences en eau (Mathieu et Pieltain, 2009). Six grands ensembles des sols ont été distingués dans le Sahara par Dutil (1971): minéraux bruts (Lithosols et Regosols), Regs (autochtones et allochtones), sols alluviaux, sols d'oasis en pays cristallins, sols halomorphes (sols d'oasis en pays sédimentaire, solontchaks, hypersolonchaks) et les paléosols (Hamdi-Aïssa, 2001; Boumaraf, 2013).

Dans la cuvette de Ouargla, les groupes d'états de surface du sol se différencient par la couleur de surface du sol, sa nature (chlorure de Sodium, gypse, silice, ...etc.) et diverses rugosités dues aux efflorescences, aux croûtes lisses, aux éléments grossiers,...etc. D'après Hamdi-Aïssa et Girard (2000) et Hamdi-Aïssa (2001), les sols varient d'un pédopaysage à un autre dans la région d'Ouargla, dont on trouve d'Ouest en Est les classes suivantes selon le référentiel pédologique (1998).

### **II.2.1. LITHOSOL**

Sur le plateau, les sols présentent une surface graveleuse, reg à graviers, ou pierreuse, reg à pierre, et des voiles éoliens. Cet horizon de surface surmonte une croûte calcaire à dolomie, très dure, de 30 cm d'épaisseur. On trouve ensuite un horizon calcaire, nodulaire, moins dur et fissuré, entre 35 et 60 cm puis, au-delà de 60 cm, un horizon pétrogypsiqne à 57 % de gypse. C'est un LITHOSOL pétrocalcarique de Hamada à encroûtement gypseux en profondeur. Les LITHOSOLS stricts du grès à sable rouge de Miopliocène alternent avec les REGOSOLS sur le versant entre 140 et 180 m d'altitude.

### **II.2.2. REGOSOL**

Sur le glaciais, à 140 m d'altitude, le sol est constitué d'un matériau meuble, exclusivement détritique, hérité de l'altération du grès à sable rouge du Miopliocène. C'est le sol le plus pauvre en gypse de la région; jusqu'à 8 m de profondeur, il ne présente aucun niveau d'encroûtement. Il s'agit d'un REGOSOL sableux à graviers, saliques. Les dunes sont des REGOSOLS sableux. Il existe aussi des cordons dunaires.

Enfin dans les talwegs et sur les versants rocheux, on trouve en surface des affleurements de grès rouge du Miopliocène.

### II.2.3. SALISOL

Dans le chott, l'horizon de surface est une croûte gypseuse épaisse ou polygonale, blanchâtre, partiellement couverte de voiles de sable éolien gypso-siliceux et de nebkas associées à une végétation gypso-halophiles à *Zygophyllum album*. À 15-20cm d'épaisseur, on trouve un encroûtement gypseux pulvérulent, homogène, de couleur jaune rougeâtre très claire. En dessous, on trouve un encroûtement gypseux induré de 40 cm d'épaisseur, moins riche en gypse que l'horizon précédent. Le solum non calcaire présente une teneur en gypse décroissante de 68,6 % dans la croûte polygonale à 43 %. C'est un SALISOL chloruré sulfaté à horizon gypseux et pétrogypsiq de surface. Les sols salés de la sebkha se caractérisent par une salure extrêmement élevée de l'horizon de surface et des croûtes et efflorescences salines continues. Les sols du centre de la sebkha se caractérisent par une croûte saline qui repose sur un matériau limono-sableux. La teneur en gypse est de 11 à 21 %. Il s'agit d'un SALISOL chloruré sulfaté.

Les sols salins sont Actuellement fonctionnels, ils varient dans le temps mais restent dans le même espace géographique. Le processus de salinisation est actuel et il est lié aux nappes souterraines notamment la nappe phréatique dont sa remontée est causée par les rejets des eaux excédentaires agricoles et urbaines et une topographie défavorable. Ceci a accentué les effets de l'hydromorphie et de la salinisation naturelle des sols (Hamdi-Aïssa et Federoff, 1997; Idder, 1998; Zidi et *al.*, 1997; Hamdi-Aïssa et *al.*, 2000; Hamdi-Aïssa et Girard, 2000; Hamdi-Aïssa, 2001)

### CONCLUSION

L'observation précise de la géomorphologie de Ouargla montre une diversité de pédopaysages dont on distingue: le plateau qui est caractérisé par des LITHOSOLS pétrocalcaires de Hamada à encroûtement gypseux en profondeur; les glacis et le reg caractérisés par des REGOSOLS sableux à graviers, saliques; l'Erg qui est constitué de REGOSOLS sableux; les sebkhas et les chotts où on trouve les SALISOLS et les lits d'oueds qui sont occupés par des alluvions.

# **CHAPITRE III**

**DESCRIPTIONS DES METHODES**

**MISES EN ŒUVRE**

## **CHAPITRE III : DESCRIPTIONS DES METHODES MISES EN ŒUVRE**

Dans ce chapitre nous présentons l'ensemble des méthodes mises en œuvre dans les différentes approches: cartographie des pédopaysages et des constituants du sol et leurs caractéristiques; travaux de terrain; description macromorphologique du sol; les méthodes analytiques utilisées pour la caractérisation physique du sol au laboratoire et l'étude statistique.

### **III.1. DÉLIMITATION DES PÉDOPAYSAGES**

Pour délimiter les principaux pédopaysages à l'échelle régionale, nous avons commencé en premier temps par l'exploitation des cartes topographiques de la région à différentes échelles; la carte des états de surface de sols de Ouargla après classification ascendante hiérarchique (CAH) (1/100000) et la carte des états de surfaces de l'ensemble de la région de Ouargla après classification bayésienne par maximum de vraisemblance (CBMV) (1/250000) élaborées par Hamdi-Aïssa (2001), des images satellitaires et le modèle numérique du terrain (MNT). La deuxième étape est un balayage sur l'ensemble de Ouargla pour toucher les différents pédopaysages existants et confirmer les informations que nous avons sortis à partir des différentes sources graphiques.

La délimitation des pédopaysages nous a permis d'élaborer la carte des pédopaysages de la région à l'échelle de 1/250000 et comme l'objectif de notre étude ne portant que sur les pédopaysages de la région, nous avons masqué tout ce qui correspond à la végétation, aux routes et infrastructures humaines.

### **III.2. DESCRIPTION MACROMORPHOLOGIQUE DU SOL**

Après avoir défini les principales unités pédopaysagiques de la zone d'étude interprétées par la carte des pédopaysages, nous avons choisi de décrire une toposéquence Est-ouest pour mettre en évidence l'organisation de la couverture pédologique de différents pédopaysages de la cuvette. Pour cela nous avons utilisé Cross View intégré au SIG pour reproduire les logs graphiques des Huit profils de sol qui ont été créés par Hamdi-Aïssa (2001) en basant sur l'orientation et l'espacement optimaux pour représenter les horizons souterrains dans la zone d'étude et la position linéaire. Les représentations graphiques des logs lithologiques du sol ont fourni la base visuelle pour l'interprétation de la morphologie du sol.

### **III.3. METHODES D'APPROCHE DE TERRAIN**

#### **III.3.1. Choix de sites et campagnes du prélèvement**

Pour les mesures de la perméabilité 53 points ont été sélectionnés par échantillonnage aléatoire orienté en fonction des différentes unités pédopaysagiques et pour l'échantillonnage du sol 300 points ont été sélectionnés en adoptant

l'échantillonnage systématique par maillage de 2 km dont le prélèvement est fait au centre de la maille.

Après avoir repéré les sites sur la carte des pédopaysage nous avons effectué six campagnes de mesure, pour réaliser des essais de perméabilité et prélever des échantillons du sol, entre le 14/10/2016 et le 15/11/2019.

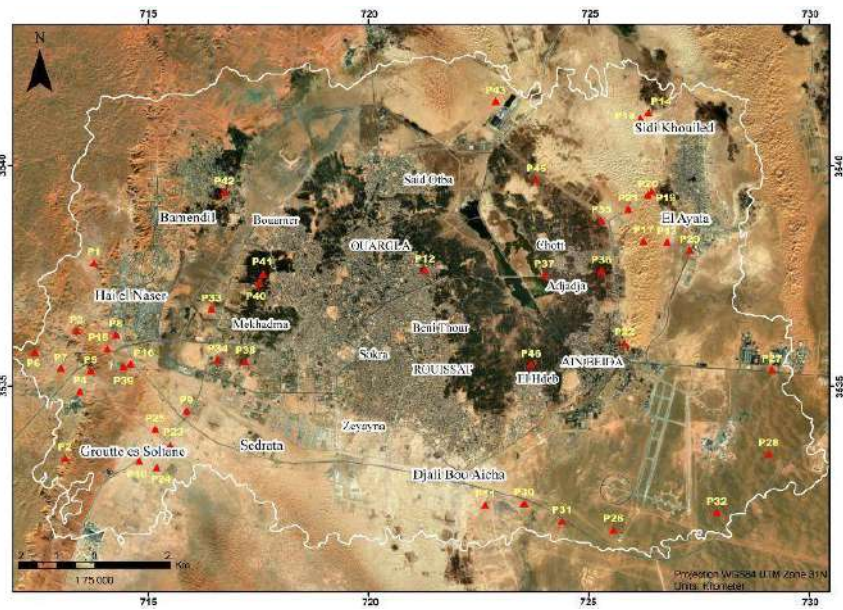
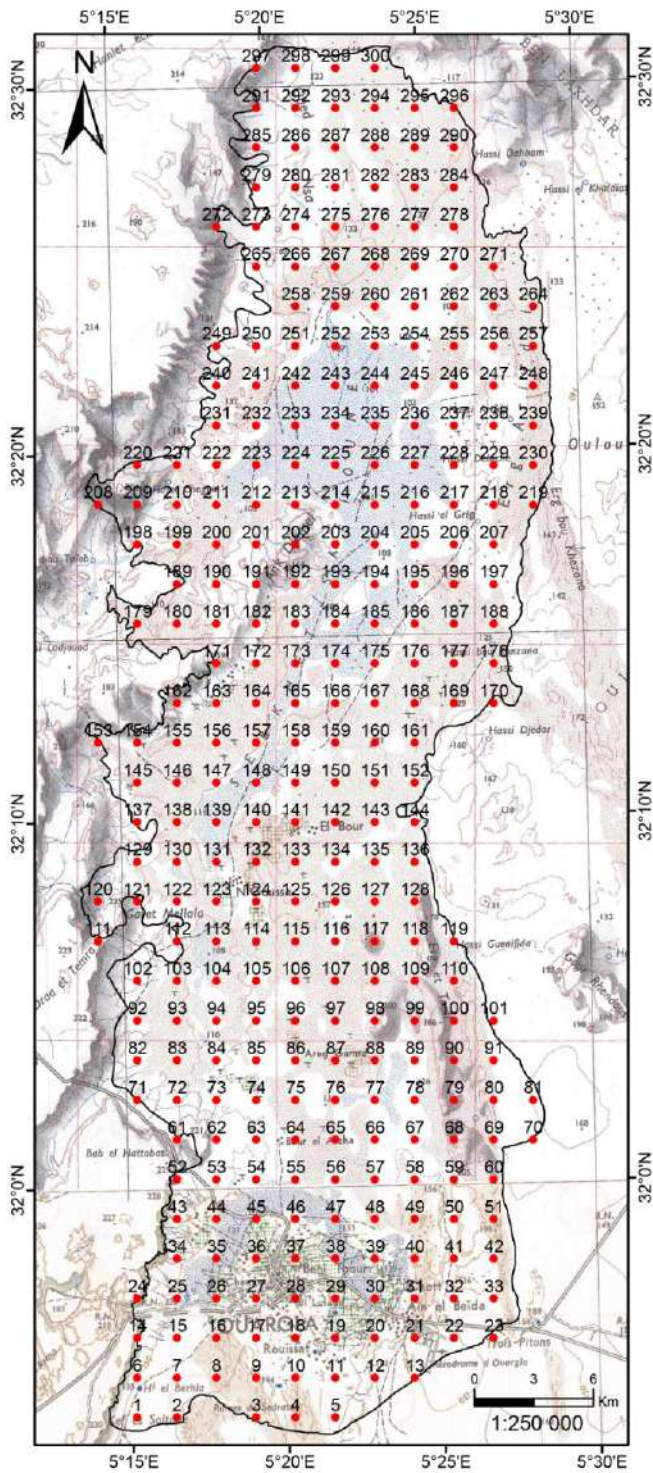


Figure III-1 : Cartes d'échantillonnage



### III.3.2. Mesure de la perméabilité

La détermination de la perméabilité peut se faire par des méthodes directes au laboratoire ou *in situ* ou par des méthodes indirectes.

Au laboratoire, la perméabilité est généralement mesurée sur de petits échantillons qui ne représentent pas l'hétérogénéité des sols sur le terrain. Il est très difficile d'obtenir des échantillons non perturbés à partir de dépôt des sols granuleux. En conséquence, la perméabilité mesurée peut ne pas être représentative de la perméabilité du champ car le tissu du sol est détruit à cause des techniques d'échantillonnages

D'autre part, la modélisation inverse avait fourni une méthode alternative pour déterminer les propriétés hydrodynamiques au lieu de mesures directes. Elle est fondée sur l'application des fonctions largement utilisées. Une grande différence entre les valeurs de perméabilité générées avec les méthodes directes et indirectes a été démontrée.

Pour surmonter les problèmes posés par les mesures au laboratoire et les méthodes indirectes, les essais de mesures *in situ* sont généralement les plus utilisés et restent la méthode la plus fiable et la plus robuste pour déterminer la perméabilité. Les essais de pompage sont utilisés pour les grands projets d'ingénierie et les infiltromètres pour les champs stationnaires (Hachicha et al., 1996 ; Iversen et al., 2001; Aljaradin et al., 2011; Köhne et al., 2011 ; Nagy et al., 2013; Elhakim, 2016; Kaçi et al., 2022).

#### III.3.2.1. Montage expérimental *in situ*

Les mesures de la perméabilité *in situ* avaient été préconisées selon la méthode Porchet, à charge constante, adoptée pour les sols à dominance sableuse (photo III.1). C'est une méthode mise au point par Porchet et Laferrere (1935), pour répondre surtout aux besoins d'aménagement du domaine agricole (drainage et irrigation) (Chossat, 2005).



Photo III.1: Le perméamètre de Viguiier installé à l'Erg (à gauche) et à Sebkhia (à droite).

Perméamètre de Viguiier (1): constitué d'un réservoir de saturation de 25 litres, une cellule de régulation de niveau en acier inoxydable (a), équipé d'un dispositif de suspension (b) (flotteur) muni d'une connexion avec le réservoir, un réservoir de mesure de 2.5 litres (c) gradué par 100 ml, et muni d'une connexion. Tarière (2).

### III.3.2.2. Le protocole expérimental

Le principe général de la méthode de Porchet repose sur le suivi de l'abaissement du niveau d'eau dans un trou creusé à la tarière en fonction du temps. Ce trou est d'un rayon (R) et d'une profondeur (H). La procédure est subdivisée en trois phases comme suit (Hachicha et *al.*, 1996; Iversen et *al.*, 2001; Chossat, 2005; Nagy et *al.*, 2013; Elhakim, 2016; Kaçki et *al.*, 2022):

- **Mise en place du dispositif:** Cette phase consiste à forer une cavité superficielle dans le sol, de 20 cm, manuellement avec une tarière. Cela se fait prudemment en évitant le lissage des parois. Son diamètre doit être suffisant pour y installer la cellule régulatrice (15 cm). Ensuite on place celle-ci dans le trou de telle sorte qu'elle soit bien horizontalement, elle a pour objet le maintien de la structure en suspension (flotteur) liée au réservoir de saturation.
- **Mise en route de l'essai:** Dans cette étape, on a essayé de s'approcher des conditions de saturation, et donc de respecter au mieux les hypothèses de calcul, nous avons systématiquement effectué un premier remplissage du trou par l'eau pour atteindre la saturation avant de commencer les mesures.
- **Phase de mesure:** Une fois l'étape d'imbibition est achevée et la saturation atteinte, on connecte le régulateur avec le réservoir de mesure, après avoir le déconnecté de celui de saturation, et on note chaque 60 seconds la hauteur d'eau dans le réservoir gradué, cela est fait de 10 à 30 fois selon le sol en question.

Après la notation des variations des niveaux de la hauteur d'eau, la perméabilité est calculée suivant la formule suivante déduit de la loi de Darcy (Chossat, 2005):

$$K = V/S.t$$

Avec : V : le volume disparu du réservoir/infiltrée dans le sol dans le temps t.

S : représente l'aire de la zone humectée (partie latérale et le fond du trou)

$$S = \pi R^2 + 2\pi R h$$

Avec R est le rayon du trou, h est la hauteur de l'eau dans ce ci.

### I.3.3. Prélèvement des échantillons

Les échantillons de sols en vrac ont été prélevés pour chaque point de mesure pour les analyses physiques du sol (granulométrie, pH, humidité). D'autres échantillons non remaniés ont été prélevés pour quelques points destinés à la mesure de la densité apparente.

### III.4. LES ANALYSES PHYSIQUES ET CHIMIQUES DES SOLS

**Granulométrie :** Après séchage à l'aire libre des échantillons, l'analyse granulométrique en six classes a été faite, au laboratoire de pédologie de la faculté de SNV de l'université de Ouargla, sans décarbonatation sur des échantillons de terre fine (moins de 2 mm), par tamisage humide (sous jet d'eau) (AFNOR N. F. X. ,2003).

**Humidité :** L'humidité du sol a été obtenue en calculant la différence de poids d'un échantillon de sol avant et après passage dans une étuve à 105°C pendant 24 heures. La démarche suivie repose sur la norme NF ISO 11465 (AFNOR, 1994).

**Densité apparente :** Elle est déterminée par la méthode du cylindre. Cette technique consiste à prélever un volume de terre effectué avec un cylindre enfoncé directement dans le sol et dont les extrémités sont soigneusement arasées. L'échantillon est recueilli, séché à 105 °C et pesé. Elle est exprimée en g/cm<sup>3</sup> (Mathieu et *al.*, 2003).

**pH :** La mesure de pH a été effectuée sur des extraits dont le rapport (terre/eau) est de 1/5 par pH-mètre selon la norme NF ISO 10390.

**Conductivité électrique (CE) :** La conductivité électrique a été mesurée sur un extrait dilué de 1/5, selon la norme NF ISO11265 et le résultat est corrigé à une température de 25 °C. Elle est exprimée en mS/cm.

**Calcaire totale :** Le calcaire total est déterminé par calcimétrie volumétrique au calcimètre de Bernard.

**Bilan ionique :** Les cations échangeables alcalins et alcalino-terreux (Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> et Ca<sup>2+</sup> et Mg<sup>2+</sup>) sont extraits selon les méthodes de dosage figurant dans la norme NF X 31-108. Elle procède par une extraction directe des cations par agitation en présence d'acétate d'ammonium. Le dosage se fait par spectrométrie d'adsorption atomique.

Le dosage des anions carbonate (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) et bicarbonate (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) a été réalisé par titration à l'acide sulfurique en présence des indicateurs (Phénolphtaléine et orange de méthyle). La fin de la réaction est indiquée par le changement de couleur à l'orange (virage) (Mathieu et *al.*, 2003).

Les chlorures sont déterminés par la méthode de MOHR basée sur la titration de l'extrait de sol par le nitrate d'argent en présence de chromate de potassium (K<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub>) jusqu'à l'apparition de la couleur rouge brique) (Mathieu et *al.*, 2003).

La teneur en sulfate (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) est déterminée selon la norme NF ISO 11048 par la méthode gravimétrique basée sur la précipitation des sulfates sous formes de sulfate de baryum par l'attaque de l'extrait par une solution de chlorure de baryum.

### III.5. CARTOGRAPHIE DES PÉDOPAYSAGES ET DES CARACTERISTIQUES DES SOLS

Après l'échantillonnage et l'analyse du sol, les résultats ont été assemblés dans une feuille de calcul Excel de tous les paramètres physico-chimiques avec les coordonnées de points d'échantillonnage (X, Y).

La réalisation de la banque de données disposant de colonne représentant les coordonnées x et y et les paramètres étudiés se forme d'une extension (.data) à partir de logiciel ARC GIS 10.0 puis la localisation des points sur la carte topographique qui est déjà calée par le logiciel. L'auto krigeage (krigeage ordinaire) produit un maillage régulier des valeurs interpolées où on a utilisé le krigeage par points. Une fois le variogramme est établi, avec le logiciel ARC GIS les données krigées sont stockées dans un fichier avec l'extension (.grid). Le logiciel utilise le fichier (.grid) pour rétablir la cartographie des paramètres étudiés (Figure III.2). Il et n'est pas visé à obtenir des cartes manifestant exactement le phénomène tel qu'il est, mais on se contente bien des cartes représentant l'aspect général du phénomène et se rapprochent de plus en plus de la réalité observée.

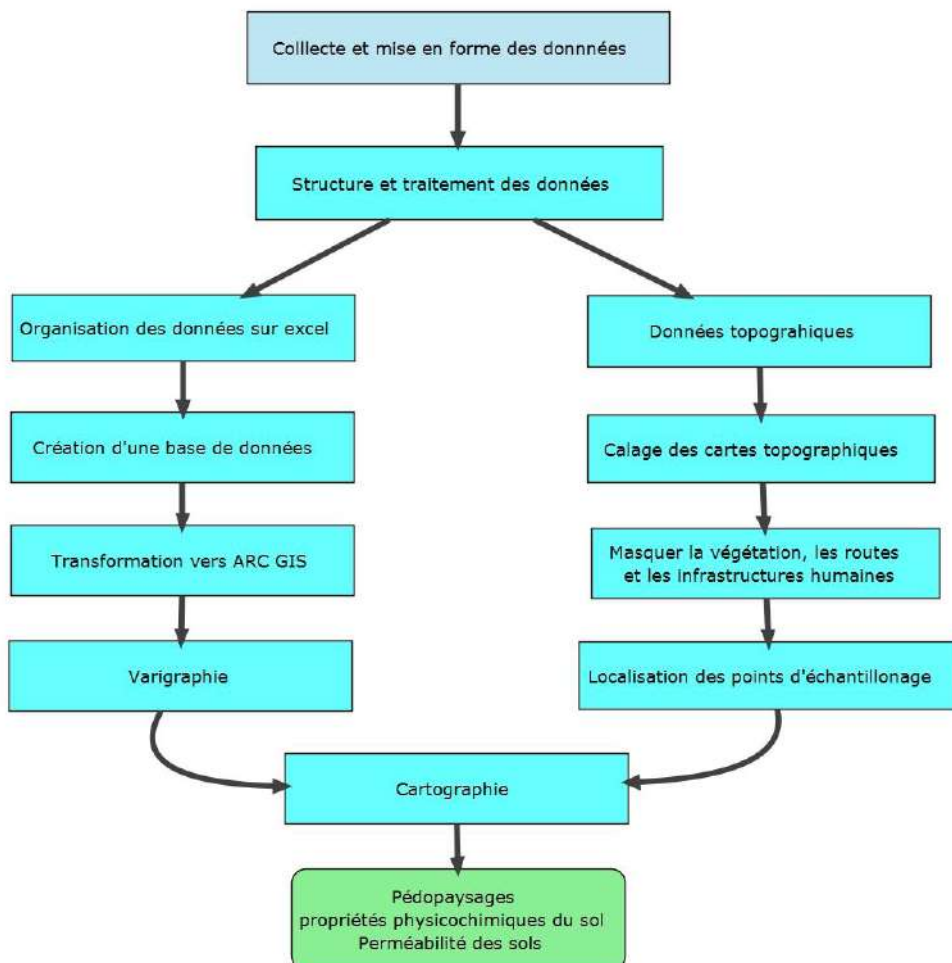


Figure III-2 : Organigramme des étapes de cartographie

Nous avons réalisé des cartes (1/ 250000) de pédopaysage, de sable, de limon + argile, du pH d'humidité et de perméabilité des sols de Ouargla. "Universal Transverse Mercator (WGS 84)" est le système de projection utilisé pour la réalisation des cartes.

### III.6. ETUDE STATISTIQUE

Pour connaître les caractéristiques de notre échantillon, des statistiques descriptives ont été réalisées. Elles sont l'ensemble des méthodes et techniques qui permettent de présenter, décrire et synthétiser des jeux de données nombreux et variés.

Des boîtes à moustaches (box plot) ont été utilisées pour montrer la perméabilité et les propriétés des sols de différents pédopaysages. Cette forme graphique nous permet de résumer rapidement et facilement la variable, de détecter les valeurs extrêmes et de comprendre la distribution des observations.

Avant de comparer la perméabilité des sols de différents pédopaysages, nous avons commencé par un test de normalité pour savoir si nos données ont une distribution normale ou non, et choisir le test qui nous permet une meilleure comparaison. Le test de Kolmogorov-Smirnov a été choisi pour tester la normalité de notre échantillon car il est particulièrement puissant pour les grands nombres ( $n > 50$ ).

Afin de comparer la perméabilité des sols entre les différents pédopaysages étudiés, nous avons réalisé une analyse de variance (ANOVA) pour vérifier si les moyennes des groupes proviennent d'une même population. L'ANOVA a été suivie du test de Tukey, appliqué à un niveau de probabilité de  $p = 0,05$  pour tester les différences significatives entre les moyennes.

L'Analyse de régression génère une équation pour décrire la relation statistique entre une ou plusieurs variables prédictives et la variable de réponse. Elle est effectuée pour déterminer l'effet des caractéristiques du sol sur la perméabilité. Elle est appliquée à un niveau de probabilité de  $p = 0,05$ .

Le logiciel IBM SPSS Statistics 25 a été utilisé pour exécuter les analyses statistiques.

# **CHAPITRE IV**

## **CARACTERISATION DES SOLS DE OUARGLA**

L'information spatialisée sur les sols est classiquement produite à l'aide d'une part, d'observations locales (sondages, fosses pédologiques), qui permettent la reconnaissance des types de sol et de leurs caractéristiques, et, d'autre part, en s'appuyant sur des relations qualitatives entre types de sols et facteurs du milieu (relief, géologie, ...etc.) qui permettent d'interpoler voire d'extrapoler spatialement les observations ponctuelles. Ce chapitre a pour objectif de caractériser le sol du site d'étude, apprécier ses aptitudes et comprendre son fonctionnement.

## **IV.1. PROSPECTION PEDOLOGIQUE**

### **IV.1.1. Identification des horizons de la tranchée**

La Figure IV-1 a illustré le résultat de l'identification des horizons de la coupe lithologique ouest-Est de Ouargla. La longueur totale de la coupe est de 1500 m et sa dénivelée est de 30 m. Elle est orientée d'Ouest en Est : un niveau du glaciaire à 160 m (au nord de zone de Cité En-Nacer), avec une contre pente à 200 mètres plus en aval où le grès de Miopliocène affleure. La partie aval est la sebkha Sud de la route entre Bamendil et Mekhadma.

Nous avons accentué les observations sur le tiers amont de la séquence où la variation du relief est importante. Plusieurs dizaines de sondages à la tarière de 1,5 à 2 mètres de profondeur et quelques coupes naturelles ont été observées. En fin nous avons creusé huit fosses le long de la séquence, il s'agit de solums d'amont en aval : P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8. La couleur du sol a été déterminée à l'aide de la charte de couleur de Munsell.

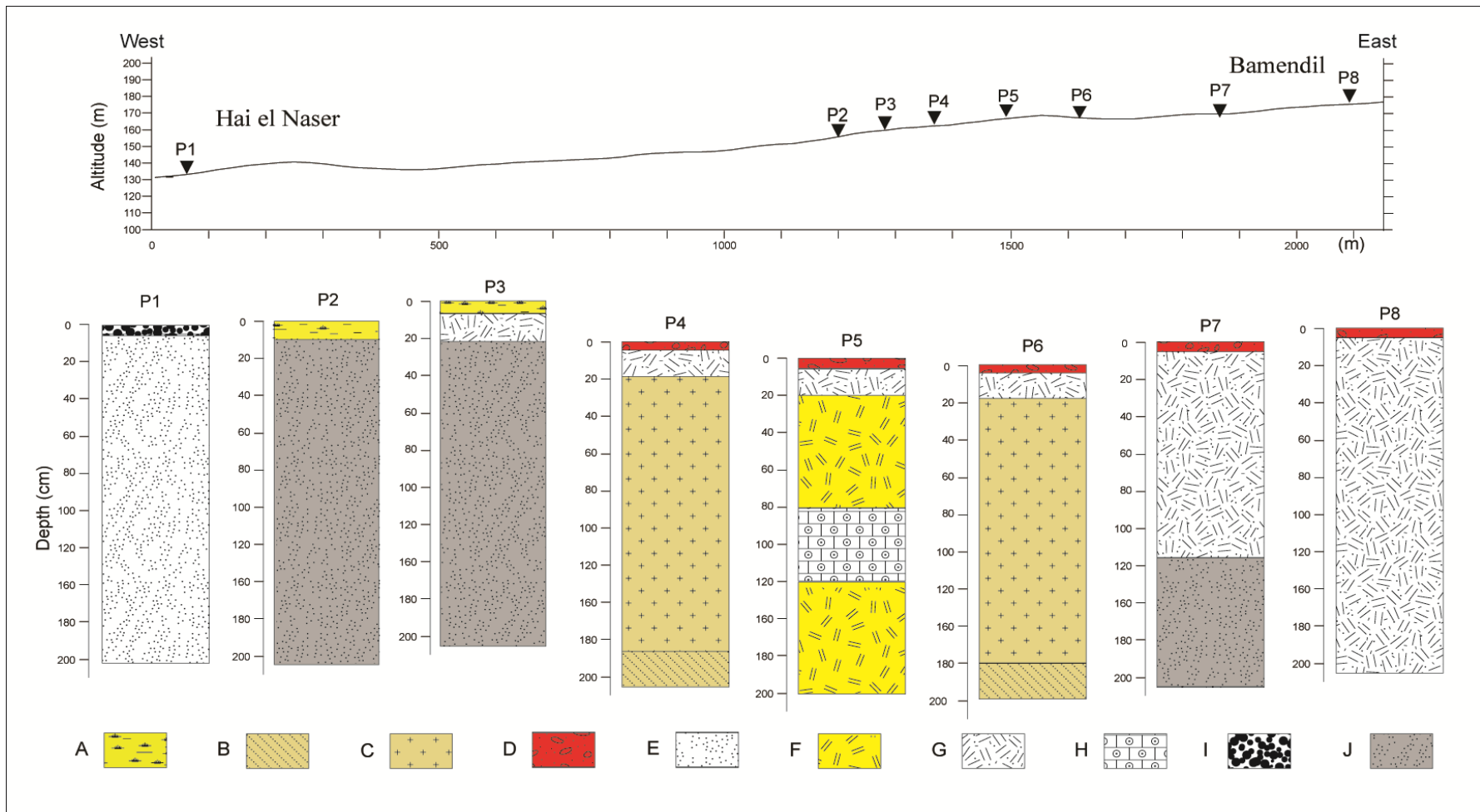


Figure IV-I : Coupe lithologique ouest-Est de Ouargla



### **Légende : les horizons pédologiques des solums**

- (A) Croûte gypseuse polygonale de surface
- (B) Encroûtement gypseux cristallin à taches noires (réductiques)
- (C) Encroûtement gypseux cristallin moyennement induré
- (D) Croûte de surface saline
- (E) Sable détritique
- (F) Encroûtement gypseux cristallins induré (croûte de nappe)
- (G) Substratum gréseux du Miopliocène
- (H) Croûte calcaire pétrocalcaires
- (I) Horizon graveleux à pédoreliques calcaires
- (J) Encroûtement gypse cristallin friable.

## IV.1.2. Description de des solums

### • Solum P1

Situé sur un glacis à environ de 150 m d'altitude, le solum P1 présente une texture sablo-limoneuse, meuble avec une charge en grès calcaire (pédorelique) importante (40%) de taille de 1 à 2 cm. La couleur est jaune rougeâtre (5 YR 7/6). La surface est sablo-graveleux. Le sable fin est très dominant avec 55,23 % (figure VI-2) avec l'argile en trace (1,02%). C'est le solum le moins salé avec les plus faibles teneurs en  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{K}^+$ .

### • Solum P2

Le solum P2 est situé sur une butte (colline). La surface est encroûtée. Il s'agit de la roche mère de grès de Miopliocène surmontée d'un horizon pétrogypsiqque de surface avec des manchons de gypse dans les fissures de substrat.

### • Solum P3

Il est situé à la bordure de la colline sur laquelle est situé le P2. Il est caractérisé par une croûte gypseuse de surface, massive et très compacte, contient des fissures là où on trouve les manchons de gypse. Sous la croûte, la structure est sablo-limoneuse à dominance de sable fin avec 45,2 % (figure VI-2). La couleur varie de jaune rougeâtre (5YR 6/4) à rose (7,5 YR 8/4). Les teneurs en  $\text{Na}^+$  et en  $\text{Cl}^-$  sont les plus élevées (1169,44 mmol/l et 1123,24 mmol/l respectivement) tandis que les teneurs des autres éléments oscillent entre 1,45 mmol/l pour les bicarbonates et 126,34 mmol/l pour les sulfates.

### • Solum P4

Ce solum est situé au piedmont de la colline, d'une couleur jaune rougeâtre (7,5 YR 6/6) à rose (7,5 YR 7/4). Sa structure est sablo-limoneuse avec dominance de sable fin (46,3%) (figure VI-2). Il est très pauvre en  $\text{HCO}_3^-$  avec 1,66 mmol/l et contient plus de 450 mmol/l de  $\text{Na}^+$  et de  $\text{Cl}^-$ . Les teneurs en  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  sont comprises entre 22,46 mmol/l et 63,49 mmol/l.

### • Solum P5

A la bordure de sebkha se situe le P5 avec une croûte saline plus ou moins battante en surface, d'une couleur jaune rougeâtre (7,5 YR 6/6) et une structure lamellaire avec une limite nette. Ce solum a une structure sableuse avec 63,95% de sable fin (figure VI-2). Il est caractérisé par la présence des cristaux gypseux moyennement endurés. C'est un solum le plus riche en  $\text{Cl}^-$  avec 4798,41 mmol/l. La concentration de  $\text{Na}^+$  est 4449,06

mmol/l. le sulfate est présent avec 203, 91 mmol/l; les bicarbonates 4,02 mmol/l; le  $\text{Ca}^{2+}$  19,2;  $\text{Mg}^{2+}$  315,6 mmol/l et le  $\text{K}^+$  91,59 mmol/l.

• **Solum P6**

Ce solum est sableux à dominance de sable fin avec 58,15% (figure VI-2), d'une couleur jaune rougeâtre (7,5 YR 6/6) à brune très pale (10 YR 7/4) en profondeur. Il est situé à la bordure de la sebkha. Les teneurs en anions et cations varient entre 1,88 mmol/l pour les bicarbonates et 343,34 pour le  $\text{Cl}^-$ . Une croûte saline peu développée, fragile, d'une structure lamellaire avec une limite nette est remarquée à la surface.

• **Solum P7**

Il est situé dans la sebkha, ce qui explique sa teneur élevée en cations et en anions dont il contient 4152,09 mmol/l de  $\text{Cl}^-$ , 5216,87 mmol/l de  $\text{Na}^+$ , 1300,97 mmol/l de  $\text{SO}_4^{2-}$ , 763,44 mmol/l de  $\text{Mg}^{2+}$ . Le  $\text{Ca}^{2+}$  a la plus faible concentration dans ce solum avec 2,63 mmol/l. sa structure est limono-sableuse avec 57,2% du limon grossier (figure VI-2).

• **Solum P8**

Au centre de sebkha de Bamendil, se trouve le solum P8 qui est surmontée par une croûte saline jaune rougeâtre (5 YR 6/6) d'une structure lamellaire. Il est limono-sableux avec 61,2% de limon grossier (figure VI-2). Sa couleur est jaune rougeâtre (5 YR 8/6). La concentration plus faible est celle de bicarbonates avec 8,4 mmol/l et la plus élevée est celle de  $\text{Cl}^-$  (879,91 mmol/l).

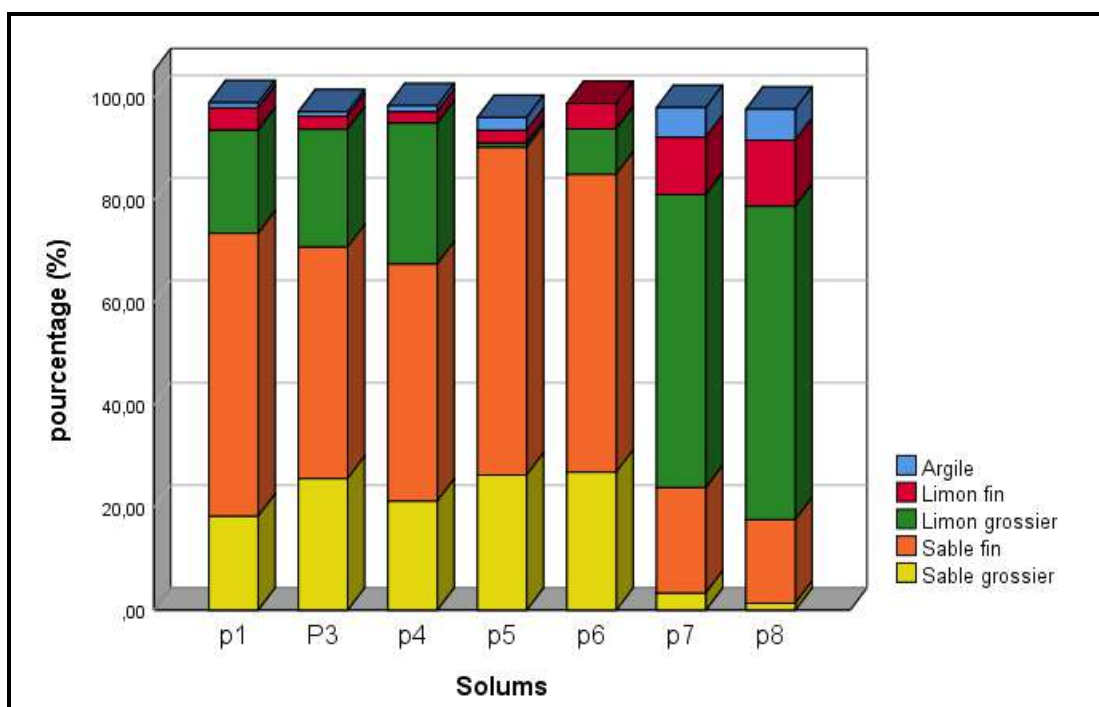


Figure VI-2 : Granulométrie des solums.

### IV.1.3. Organisation de la couche pédologique

La capacité d'identifier et de corréler les unités souterraines est limitée par les horizons de sol très variables. La coupe Ouest-Est (Figure IV-1) montre la présence de dix horizons pédologiques. De petites unités géologiques de surface sont représentées sur les coupes. Ces dépôts comprennent une croûte gypseuse polygonale de surface (A) en P2 et P3, une croûte de surface saline (D) en P4, P5, P6, P7 et P8 et un horizon graveleux à pédoreliques calcaires (I) en P1. Le sable détritique (E) n'est présent qu'en P1 depuis la surface jusqu'à une profondeur de 200 cm. Le substratum gréseux du Miopliocène (J) est à 10 cm en surface en P2, 20 cm en P3 et 120 cm en P7. L'encroustement gypse cristallin friable (G) est l'horizon présent dans tous les profils à l'exception de P1 et P2 à différentes profondeurs. L'encroustement gypseux cristallin moyennement induré (C) dans P4 et P6. L'encroustement gypseux cristallins induré (croûte de nappe) (F) et la croûte calcaire pétrocalcaires (H) ne sont présents qu'en P5.

Les logs révèlent une stratigraphie relativement simple sous Ouargla. Ils sont suffisamment espacés dans cette zone pour suivre la plupart des variations de la morphologie du sol. Par conséquent, la stratigraphie peut ne montrer aucune corrélation apparente entre les profils adjacents.

Les sols de cette séquence sont caractérisés par la dominance du sable fin avec une moyenne de 43,67% et peu argileux (2,49%) (Annexe I). La structure est sablo-limoneuse à limono-sableuse. Les concentrations en éléments solubles (Figure IV-3 et IV-4) montrent la dominance de  $\text{Na}^+$  avec une moyenne de 1795,45 mmol/l (Figure VI-4a), suivi par le  $\text{Cl}^-$  avec 1688,31 mmol/l (Figure VI-3a),  $\text{SO}_4^{2-}$  avec 277,77 mmol/l (Figure VI-3b),  $\text{Mg}^{2+}$  190,22 mmol/l (Figure VI-4c),  $\text{K}^+$  avec 36,60 mmol/l (Figure VI-4d),  $\text{Ca}^{2+}$  avec 17,26 mmol/l (Figure VI-4b) alors que les bicarbonates ont la plus faible concentration avec 4,39 mmol/l (Figure VI-3c).

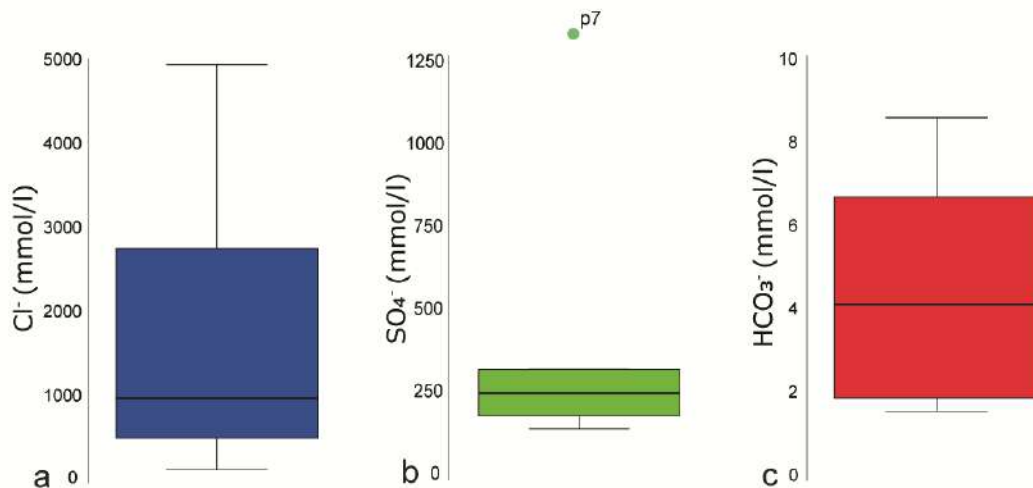


Figure VI-3 : Box plots de la concentration en anions des sols de la séquence.

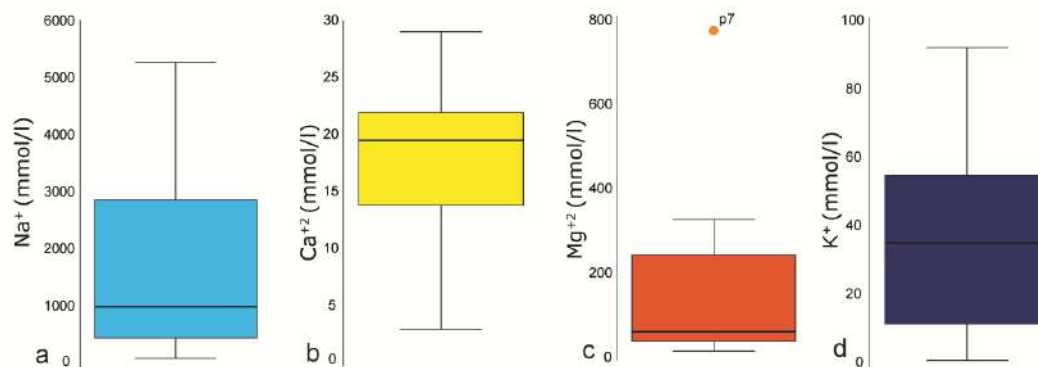


Figure VI-4 : Box plots de la concentration en cations des sols de la séquence.

## IV.2. CARTOGRAPHIE DE QUELQUES PARAMETRES DES SOLS

### IV.2.1. Teneur en sable

Les proportions relatives en argile, limon, sable fin, sable grossier définissent la texture du sol. La connaissance de la texture permet d'indiquer les tendances du sol quant à ses qualités physiques. Les sols de la région de Ouargla sont à dominance du sable avec des teneurs qui varient entre 92,5% et 99,7% où la moyenne est 97,86% (Figure IV-5) (Annexe II).

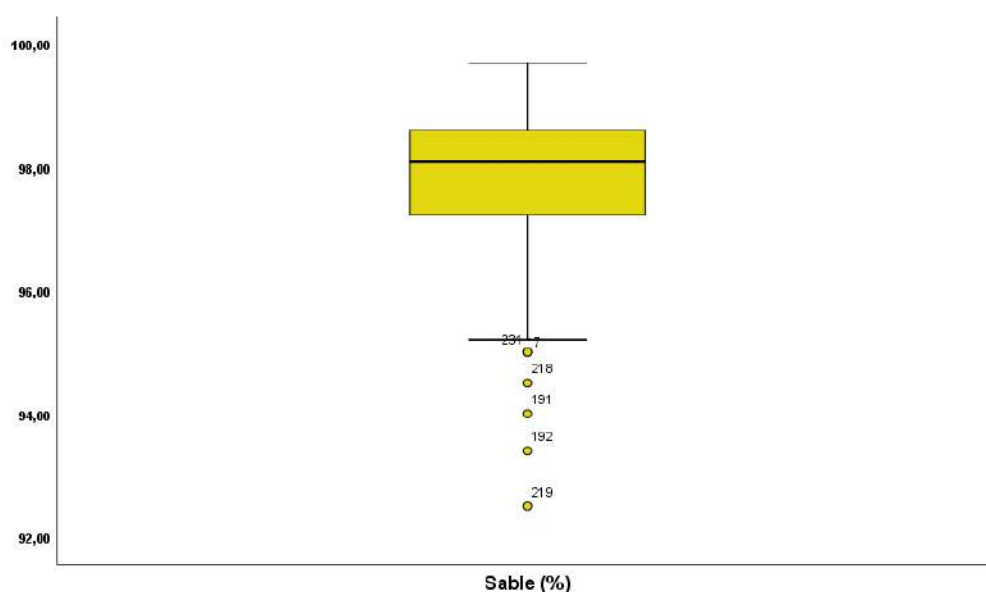


Figure VI-5 : Box plots de la teneur en sable des sols de Ouargla.

La carte de la variation spatiale de la teneur des sols en sable, à l'échelle de 1/ 250000, montre une variation de la teneur en sable en allant du Sud vers le Nord. Au sud de la région la teneur en sable est maximale suite au type de pédopaysage dont on trouve les Ergs. En allant vers le Nord de la cuvette, la teneur en sable diminue peu à peu jusqu'à ses valeurs minimales au niveau de Oued N'sa où les sols sont alluviaux

(Figures IV-6). Ces résultats sont identiques aux résultats obtenus précédemment par les études localisées dans la région de Ouargla (Dekkiche, 1974 ; Daoud et Halitim, 1994 ; Hamdi-Aïssa, 2001 ; Hamdi-Aïssa et *al.*, 2004 ; Daddi Bouhoun, 2010 ; Daddi Bouhoun et *al.*, 2013 ; Berkal et *al.*, 2014 ; Boutelli, 2014 ; Youcef et *al.*, 2014 ; Omeiri, 2015 ; Koull et Halilat, 2016 ; Karabi, 2017) qui ont montré que les sols de la région sont sableux à sablo-limoneux avec la dominance de sable grossier.

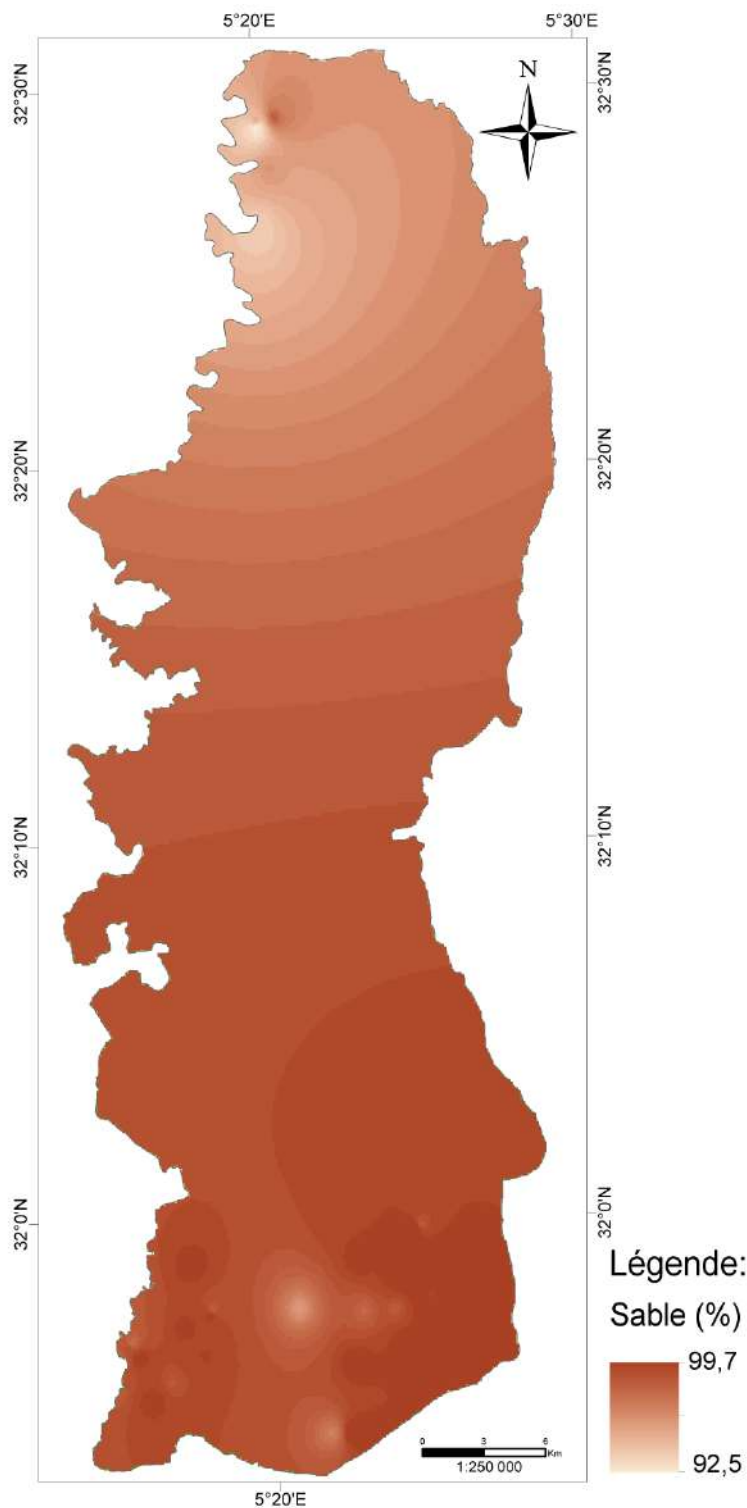


Figure VI-6 : carte de la teneur en sable des sols de Ouargla.

### IV.2.2. Teneur en limon et argile

Les sols de la région de Ouargla renferment des faibles teneurs en limon et argile qui oscillent entre 0,3 et 7,5% dont le limon est domine l'argile. Le limon et l'argile se trouve dans les sols de Ouargla avec un taux moyen de l'ordre de 2,13% (Figure IV-7).

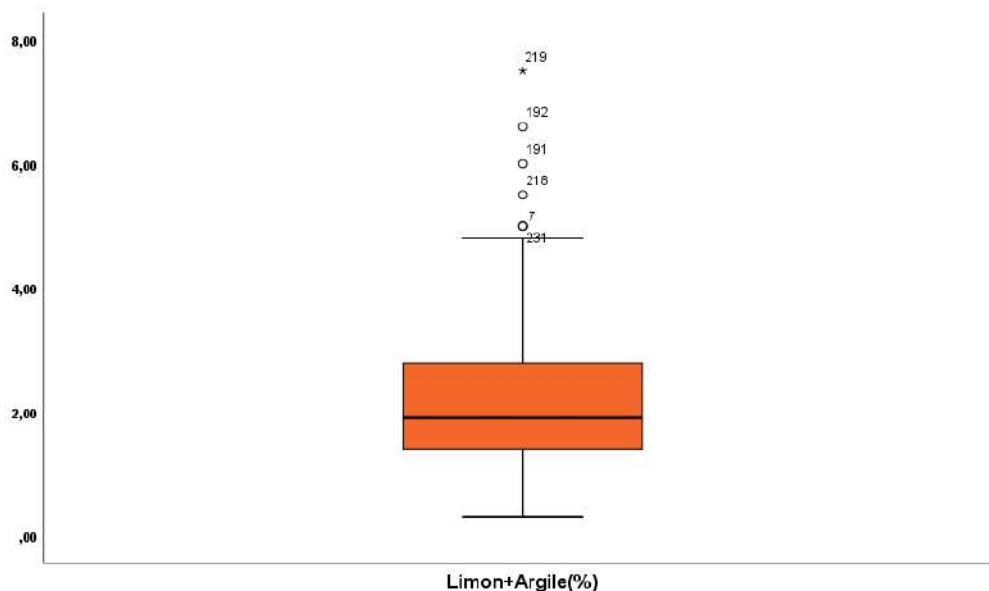


Figure VI-7 : Box plots de la teneur en limon et argile des sols de Ouargla.

La carte de la variation spatiale de taux de limon et argile dans les sols de Ouargla (1/ 250000) (Figures IV-8), montre une variation des teneurs en allant du sud vers le Nord. A l'inverse de la teneur en sable, la teneur en limon et argile augmente en allant du Nord vers le Sud de la région. Au Nord de la région le taux en limon et argile est maximal car les lits de Oueds sont constitués des alluvions. En allant vers le Sud de la cuvette, une diminution de taux de limon et argile est remarquable suite à l'augmentation de taux de sable dans le sol, où il atteint ses valeurs les plus au niveau des formations dunaires constituées des sables éoliens. Les travaux antérieurs sur les sols de la région (Dekkiche, 1974 ; Daoud et Halitim, 1994 ; Hamdi-Aïssa, 2001 ; Hamdi-Aïssa et *al.*, 2004 ; Daddi Bouhoun, 2010 ; Daddi Bouhoun et *al.*, 2010, Berkal et *al.*, 2014 ; Youcef et *al.*, 2014 ; Omeiri, 2015 ; Koull et Halilat, 2016 ; Karabi, 2017) ont conclu que ces sols renferment des faibles taux de limon et argile ce qui confirme nos résultats.

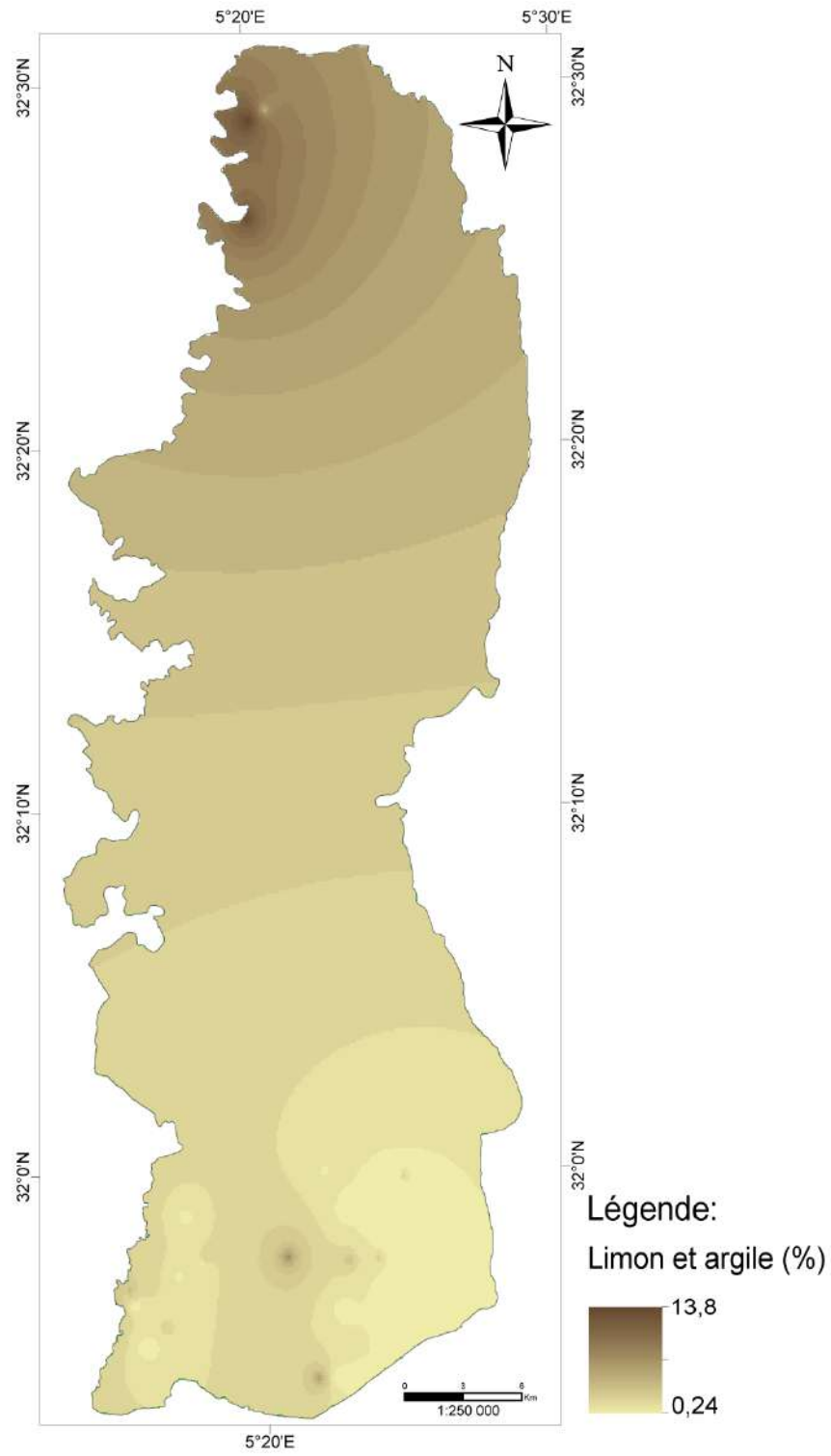


Figure VI-8 : Carte de la teneur en limon et argile des sols de Ouargla.



### IV.2.3. pH

Le pH des sols de Ouargla est compris entre 6,7 et 8,2 avec une moyenne de 7,42 (Figure IV-9). Ceci est dû probablement à la faible teneur en fraction fine et en calcaire qui sont en moyenne de 2,13 % et 3,64 % respectivement.

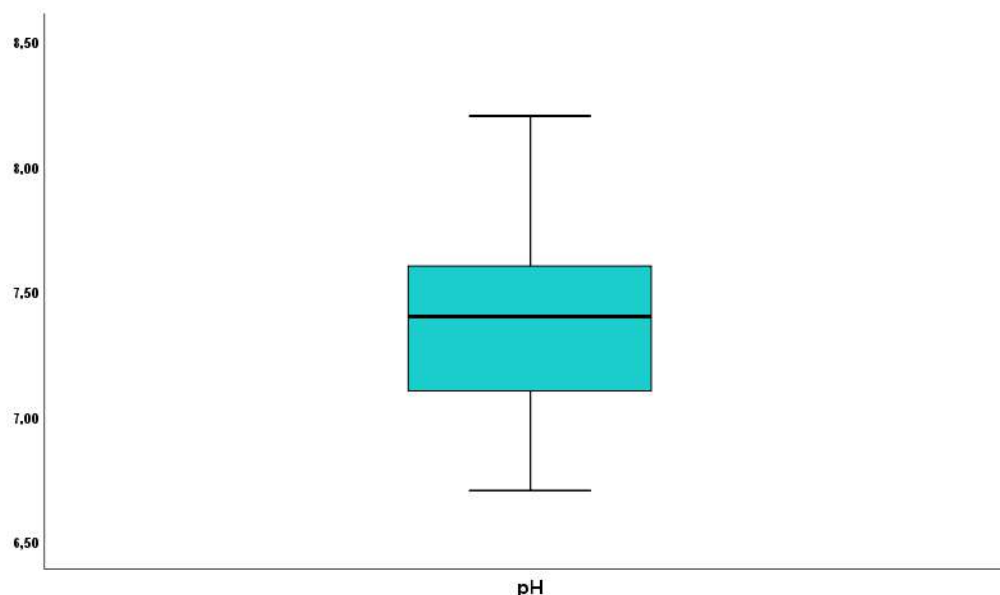


Figure VI-9 : Box plots du pH des sols de Ouargla.

Ces valeurs nous ont permis de classer les sols de la région de Ouargla en trois classes selon Soltner(1989) comme le montre la carte de variation spatiale de pH du sol (Figure VI-10). Les sols neutres; avec un pH qui varie entre 6,6 et 7,3 ; couvrent 43,7 % de la région de Ouargla. Ils sont concentrés dans la partie nord de Ouargla. Les sols légèrement alcalins,  $7,3 < \text{pH} < 7,9$ , couvrent 42% de la région d'étude. Ils sont localisés au centre de la cuvette. Les sols moyennement alcalins ne couvrent que 14,3 % de la cuvette. Ils sont localisés à l'extrémité sud de la région. Ces résultats sont confirmés par ceux de Hamdi-Aïssa (2001), Hamdi-Aïssa et *al.* (2004), Daddi Bouhoun (2010), Berkal et *al.* (2014), Youcef et *al.* (2014), Omeiri (2015) et Koull et Halilat (2016) qui ont trouvé que les sols de Ouargla sont légèrement alcalins à alcalins ( $7,5 < \text{pH} < 8,5$ ). Les sols neutres n'ont été pas signalés avant parce qu'ils sont concentrés au nord de la région tandis que la majorité des études sont effectuées au centre de la cuvette.

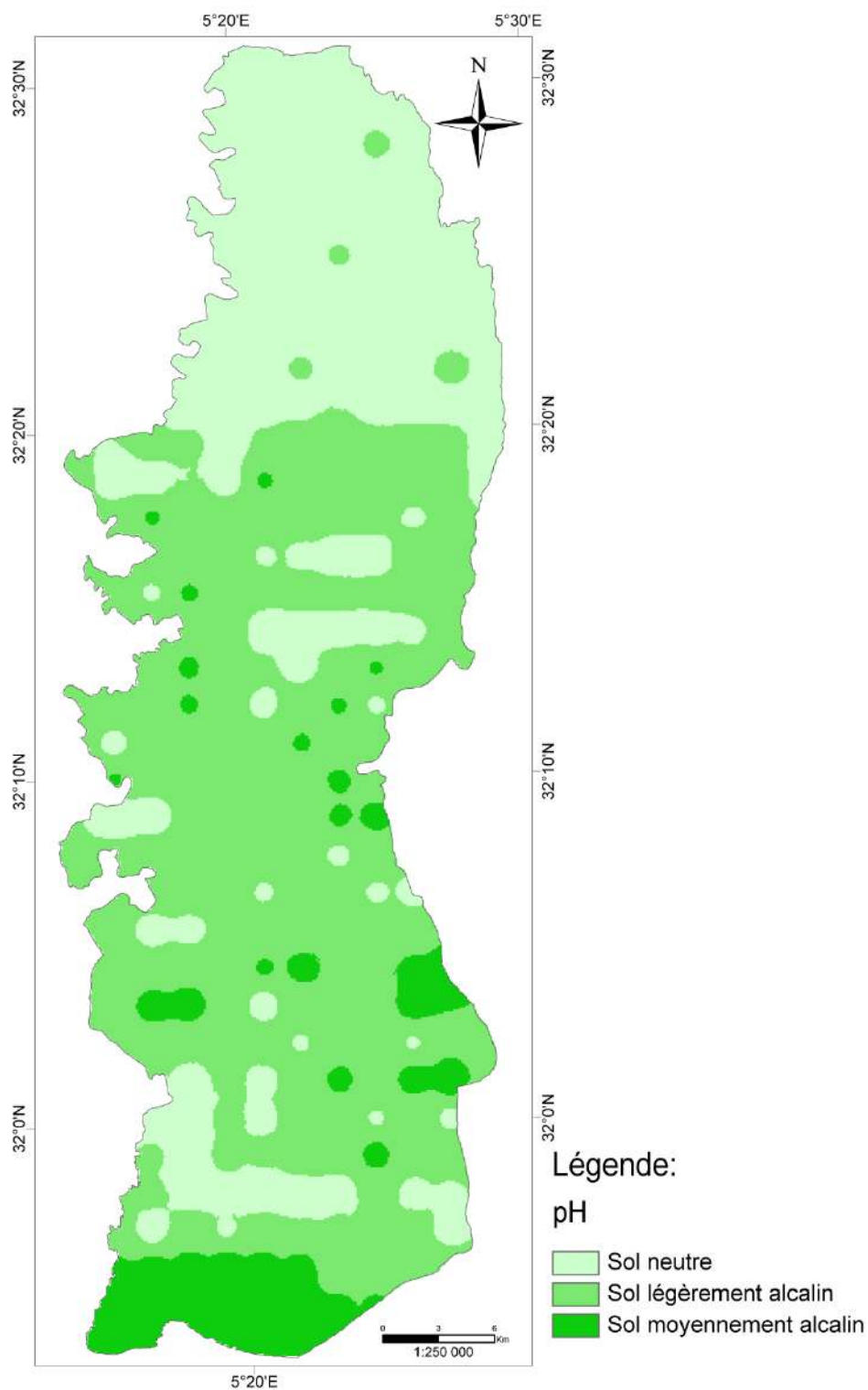


Figure VI-10 : Carte du pH des sols de Ouargla.

#### IV.2.4. Conductivité électrique

Les solutions des sols de Ouargla présentent des valeurs de CE qui varient entre 0,21 mS/cm à 23,2 mS/cm. La conductivité électrique moyenne de ces sols est de l'ordre de 5,13 mS/cm. Cette forte salinité est justifiée d'une part par la forte évaporation due aux températures élevées et d'autre part, par la faible précipitation qui caractérisent le climat des régions arides. En plus, les vents fréquents qui soufflent dans la région de

Ouargla, accentuent le dessèchement. Ceci est d'autant plus important que le couvert végétal est faible. Il s'ajoute aussi le phénomène de la remontée des eaux de la nappe phréatique très salée ainsi que la salure des eaux d'irrigation d'origine souterraine qui augmentent la teneur en sels dans le sol.

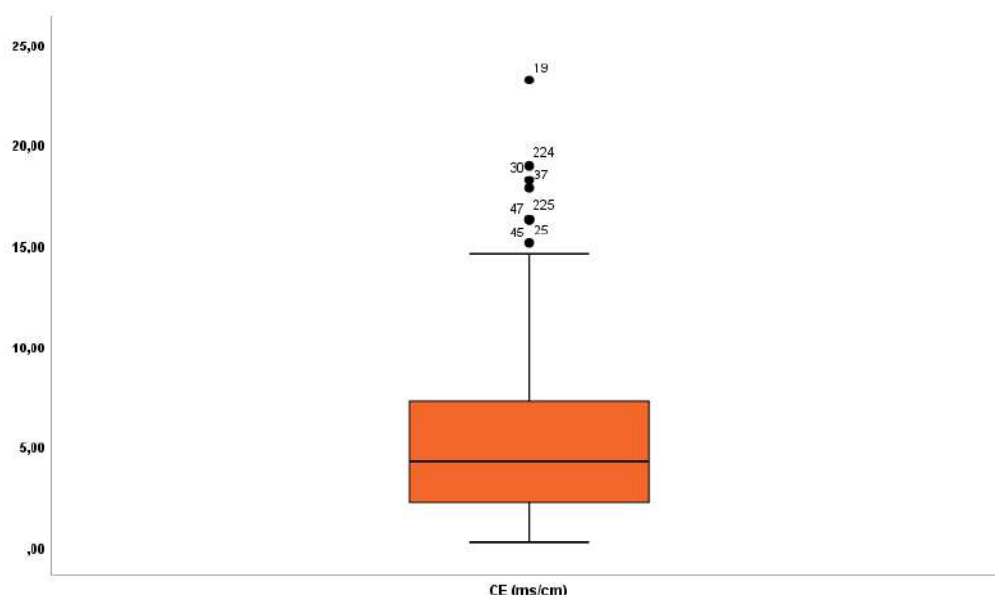


Figure VI-11 : Box plots de la conductivité électrique des sols de Ouargla.

Les valeurs de la CE sols de Ouargla permettent de les classer en cinq classes illustrées par la carte de la répartition spatiale de la CE (Figure VI-12) selon Durand (1983). Les sols extrêmement salés ( $CE > 4$  mS/cm) sont les dominants dans la région dont ils couvrent 53,7% de sa superficie. Ils se trouvent partout dans la région à l'exception de l'extrême nord. Les sols non salés ( $0 < CE < 0,5$  mS/cm) ne couvrent que 2% de la région sous des points dispersées. Les sols légèrement salés ( $0,5 < CE < 1$  mS/cm), salés ( $1 < CE < 2$  mS/cm) et très salés ( $2 < CE < 4$  mS/cm) couvrent 9%, 12,3% et 23% de la cuvette respectivement. Ces résultats sont identiques à ceux lancés par Hamdi-Aïssa (2001), Omeiri (2015), Berkal (2016) et Koull et Halilat (2016).

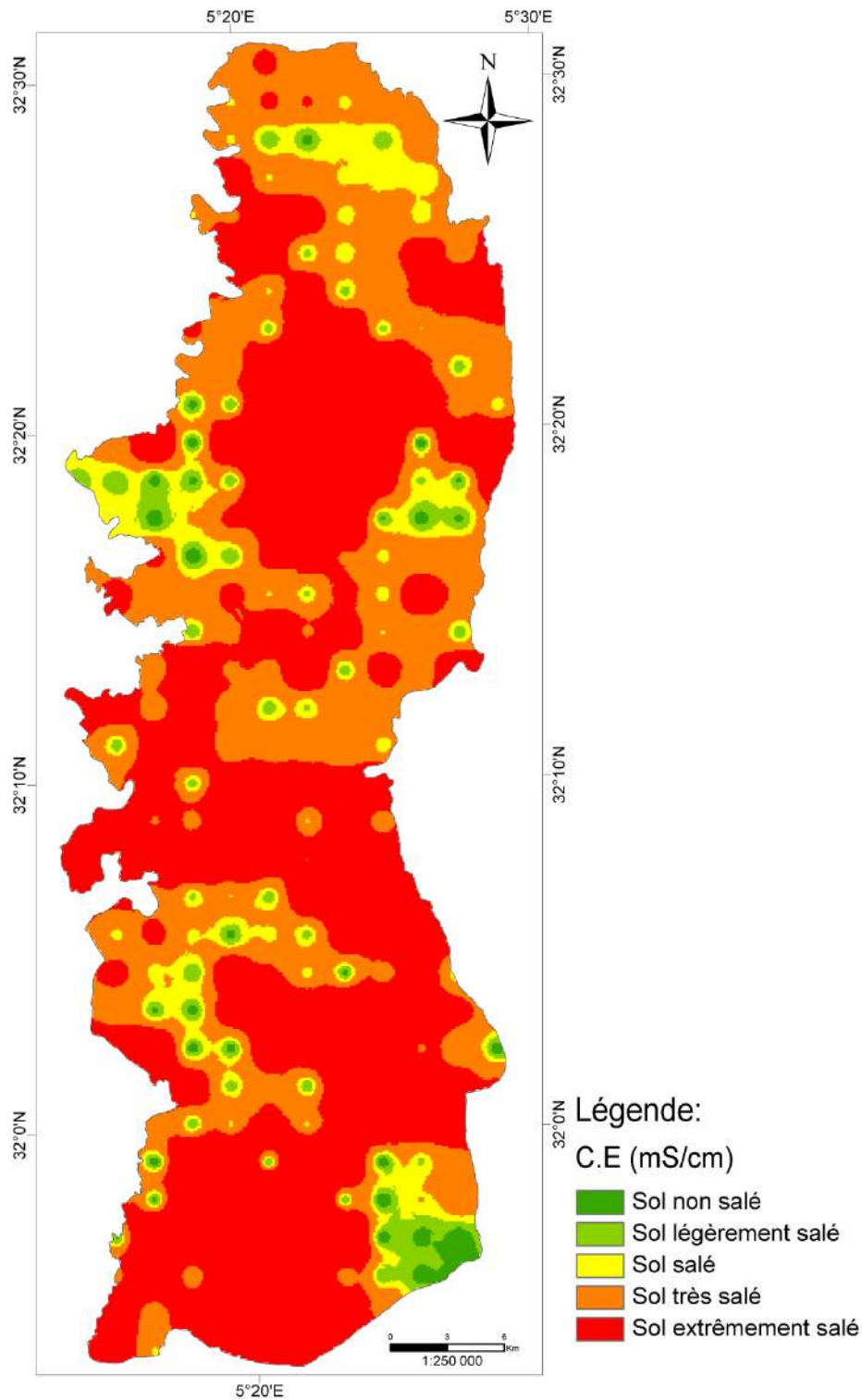


Figure VI-12 : Carte de la conductivité électrique des sols de Ouargla.

#### IV.2.5. Calcaire total

Le calcaire total est faiblement présent dans les sols de Ouargla avec des valeurs comprises entre 0,26 % et 18,56 % et une teneur moyenne de 3,64 % (Figure VI-13). Ces teneurs sont identiques à ceux trouvés par Hamdi-Aïssa (2001), Omeiri (2015), Berkal (2016), et Koull et Halilat (2016).

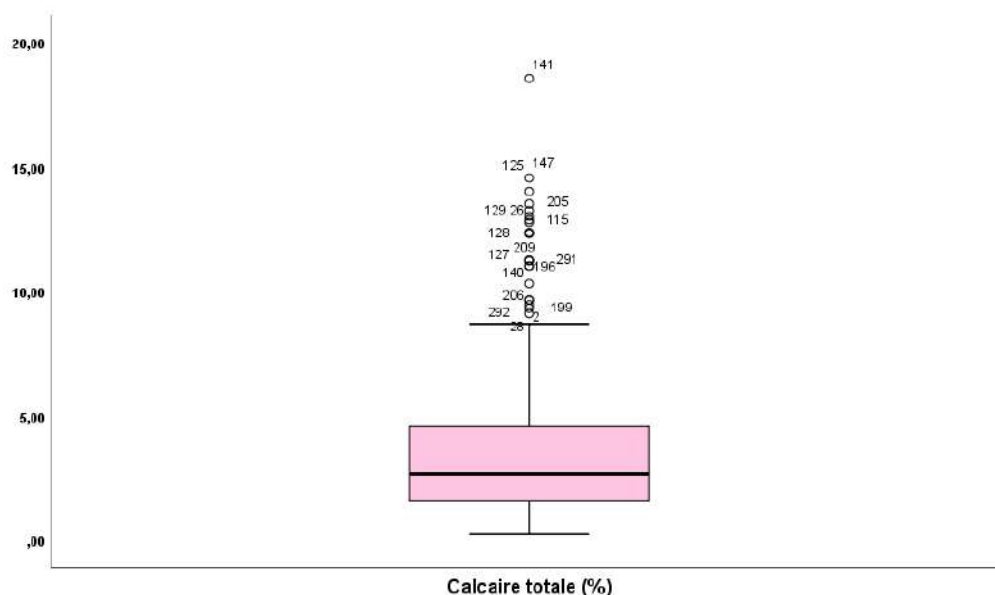


Figure VI-13 : Box plots de la teneur en calcaire total des sols de Ouargla.

Selon leurs teneurs en calcaire total, les sols de Ouargla sont répartis en trois classes : les sols peu calcaires avec une teneur inférieure à 5%, couvrent la majorité de la région avec 78,7%. Les sols moyennement calcaire, caractérisés par un taux de calcaire total compris entre 5 et 15%, présentent 21% de la région et les sols calcaires ( $15\% < \text{taux de calcaire total} < 30\%$ ) ne présentent que 0,3% (Figure VI-14) .

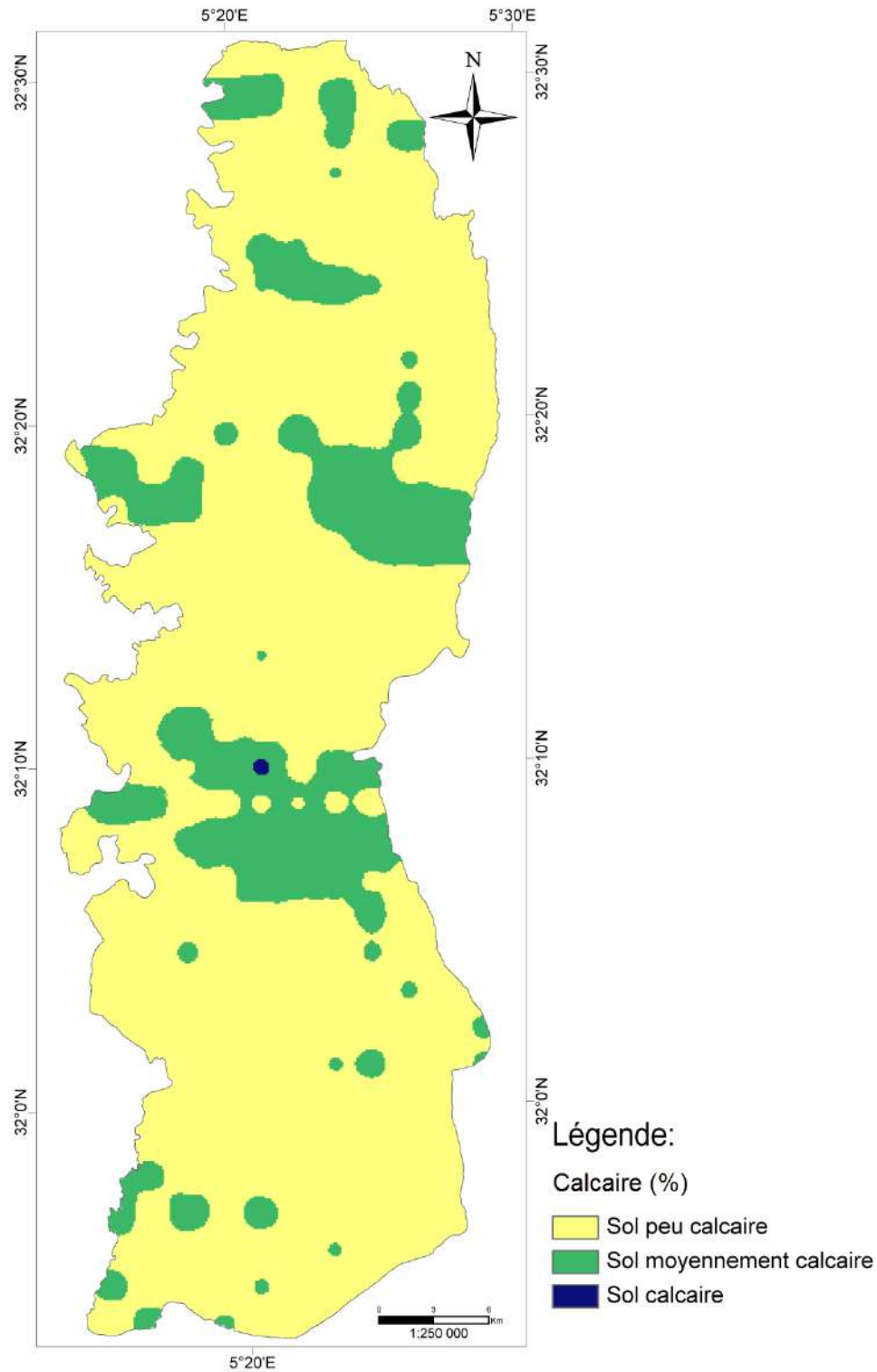


Figure VI-14 : Carte du calcaire des sols de Ouargla.

#### IV.2.6. Humidité

La teneur en eau des sols de Ouargla varie entre 1,5 % et 66,2 % avec une moyenne de 22,94% (Figure IV-15). Elle varie d'un point à l'autre dont les sols les plus humides se trouvent au niveau des sebkhas au nord et au sud de la région. L'humidité

des sols diminue en allant du sud et du nord vers le centre de la région d'étude (Figure IV-16).

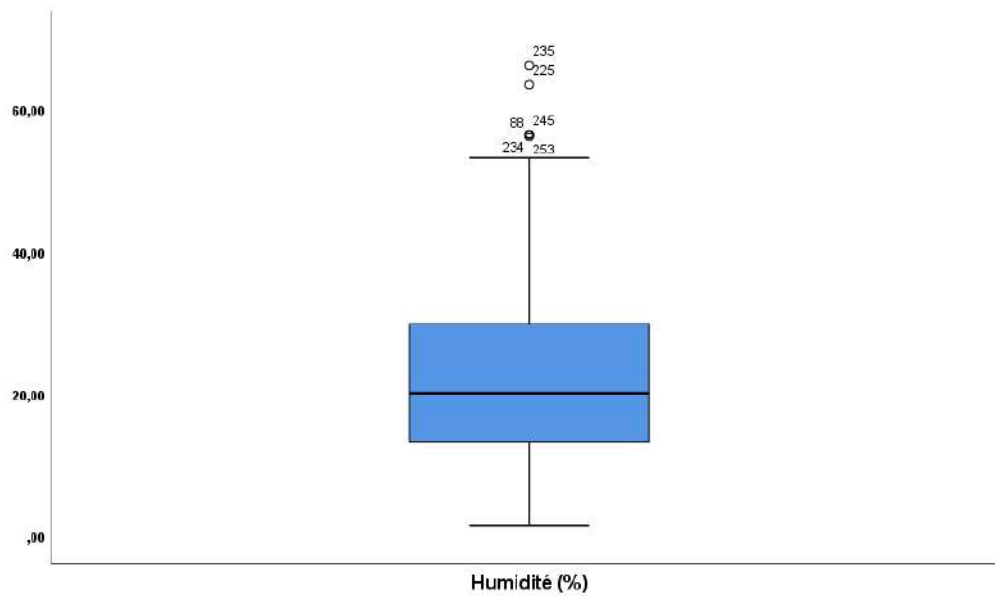


Figure VI-15 : Box plots de l'humidité des sols de Ouargla.

La faible teneur en eau peut s'expliquer par l'aridité du climat, la faiblesse de la capacité de rétention en eau de ces sols et la texture contenant un faible pourcentage d'argile. La faiblesse de celui-ci diminue la capacité de stockage de l'eau qui s'infiltré rapidement vers le sous-sol.

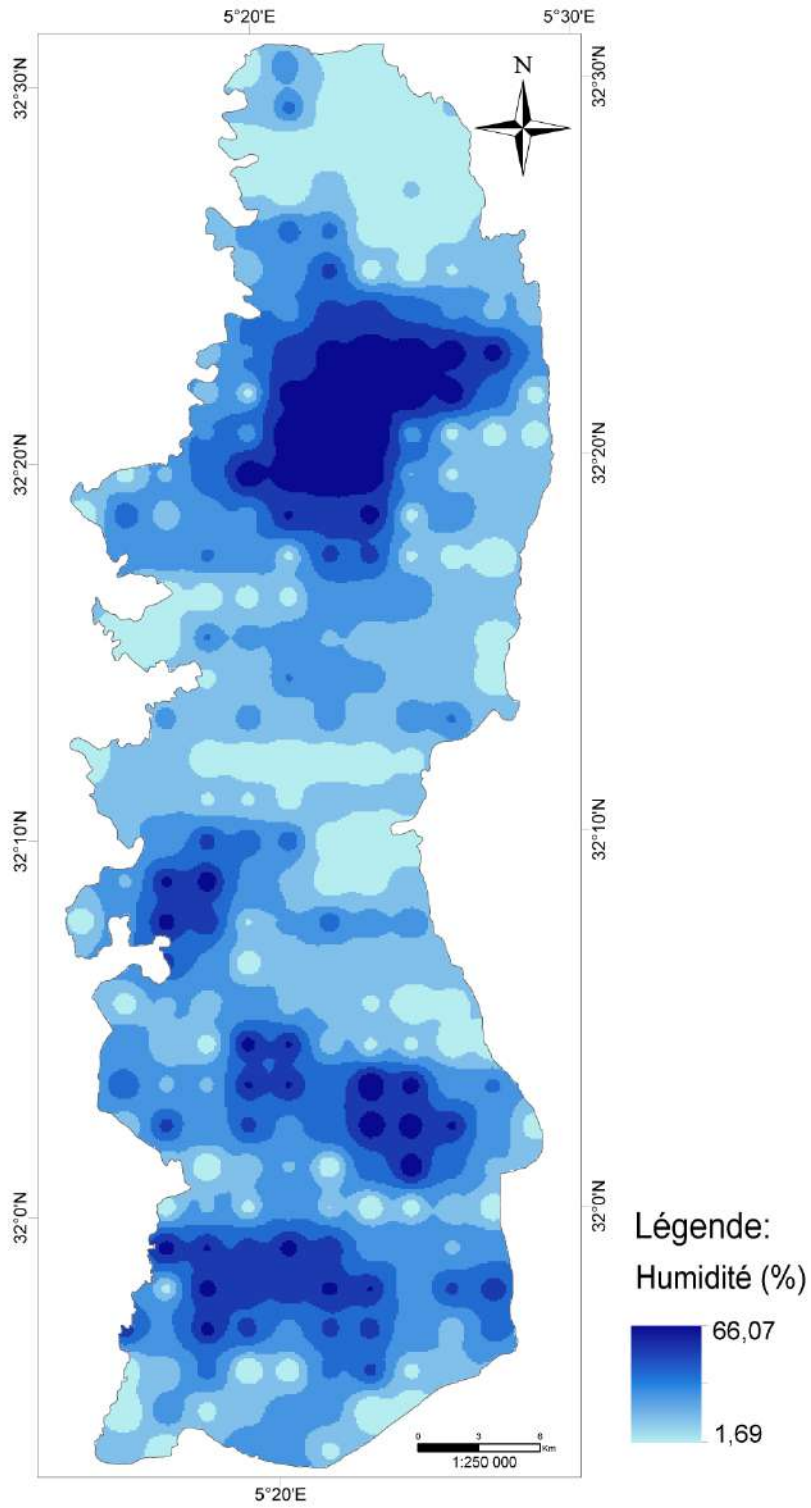


Figure VI-16 : Carte de l'humidité des sols de Ouargla.



# **CHAPITRE V**

## **PERMEABILITE DES SOLS DE DIFFERENTS PEDOPAYSAGES**

## **CHAPITRE V : PERMÉABILITÉ DES SOLS DE DIFFÉRENTS PÉDOPAYSAGES**

Un pédopaysage est un ensemble litho-géomorpho-pédologique cohérent. Plusieurs sols sont regroupés de manière hiérarchisée au sein d'un paysage identifié par des caractéristiques homogènes. Ce chapitre a pour objectif de cartographier la répartition spatiale des pédopaysages dans la région de Ouargla, présenter les résultats de mesure in situ de la perméabilité des sols de ces pédopaysages et comparer la perméabilité de ces différents pédopaysages.

### **V.1. CARTOGRAPHIE DES PEDOPAYSAGES**

La digitalisation des cartes topographiques de la région à différentes échelles et des images satellitaires, le modèle numérique de terrain (MNT) et les prospections sur le terrain ont permis l'élaboration de la carte des pédopaysages dans la région de Ouargla (figure V-1). Cette carte montre la diversité de pédopaysage dans la région de Ouargla qui est spécifique à sa forme de cuvette. Les pédopaysages se trouvent à différentes altitudes et ils ont une répartition spatiale différente :

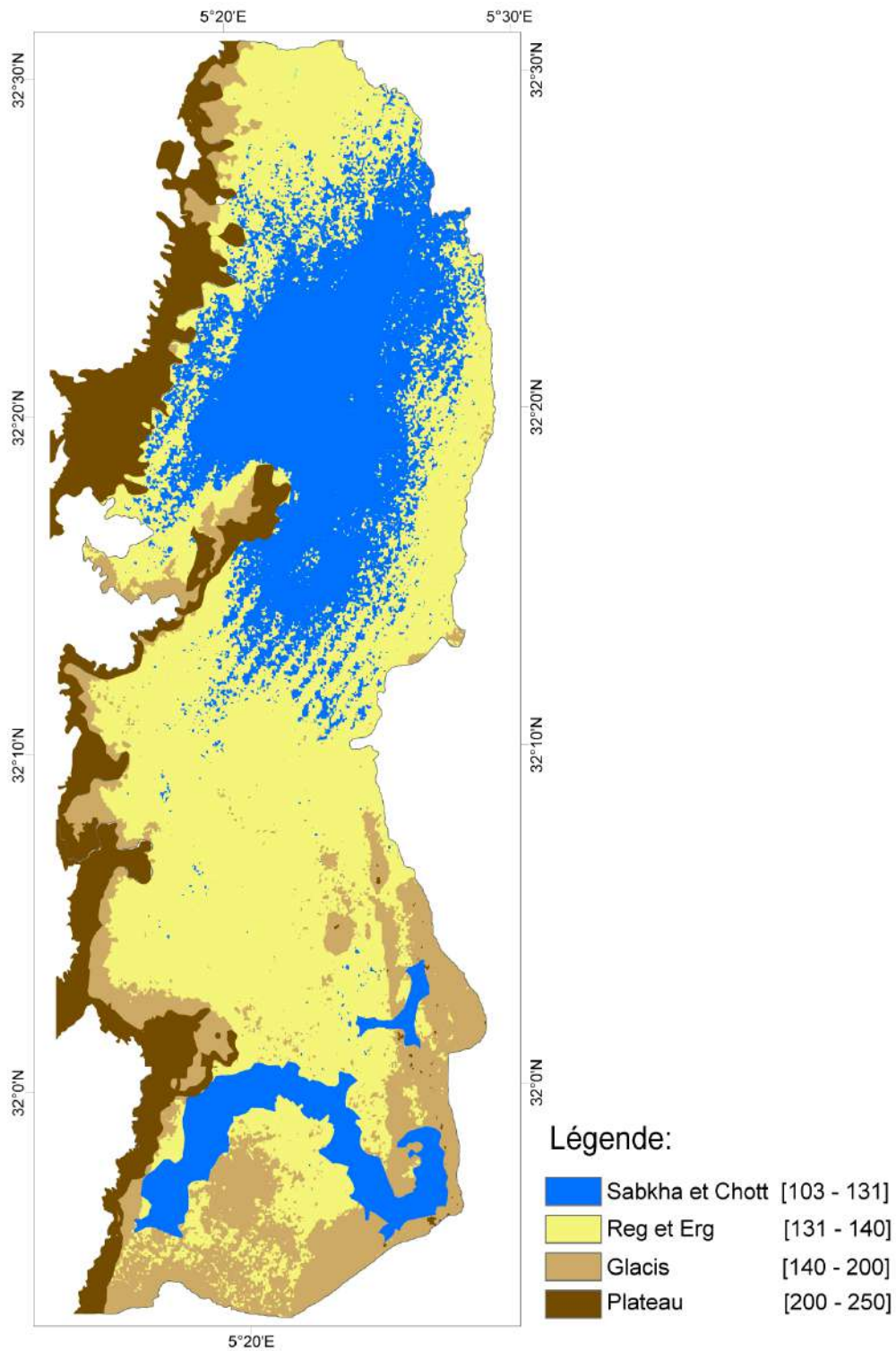


Figure V-1: Carte des pédopaysages dans la région de Ouargla.

### V.1.1. Plateau

Le plateau est le pédopaysage le plus élevé dans la région, son altitude dépasse 200 m. Il s'étale sur le côté Ouest de la cuvette. Il est caractérisé par une surface pierreuse et sèche. Le sol est très fin et compact à partir des premiers centimètres de profondeur ce explique l'absence de végétation à ce niveau.

L'analyse granulométrique (Figure V-2) montre que les sols de plateau contiennent de 1,21% à 5,79% de limon et argile avec en moyenne de 3%. Le sable fin est la fraction dominante avec une moyenne de 41,18 % et des taux qui varient entre 20,84 % et 55,76 %. Les autres fractions sont dans l'ordre décroissant : sable très fin, sable moyen, sable grossier et sable très grossier avec les teneurs moyennes 24,73%, 20,22%, 6,15% et 4,67% respectivement.

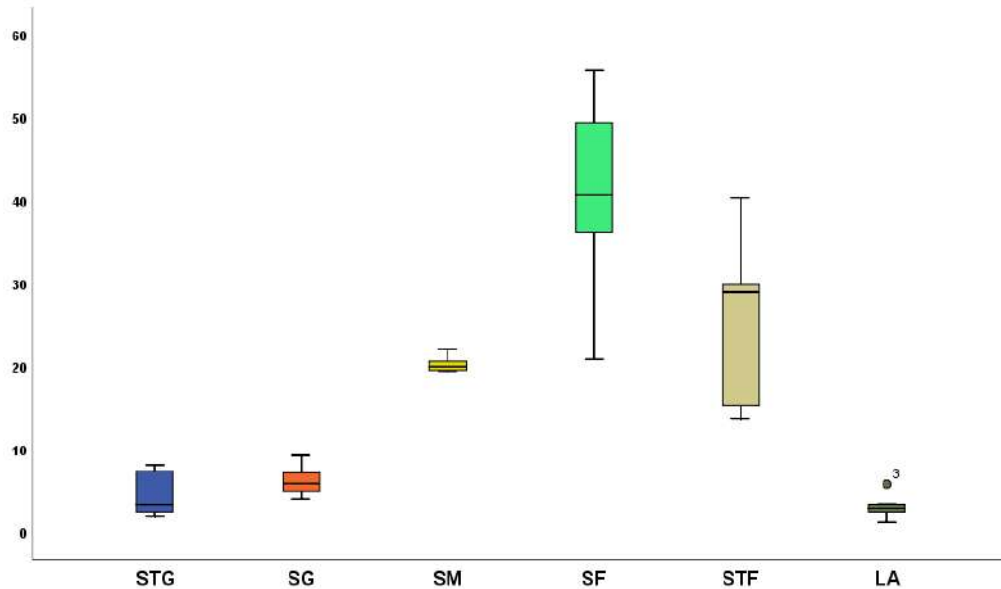


Figure V-2: Box plot de la composition granulométrique des sols de plateau.

### V.1.2. Glacis

Au dessous du plateau, se trouve le glacis entre 140 et 200 m d'altitude. C'est le pédopaysage le plus diversifié à la surface qui est soit surmontée par une dalle de gypse compacte, soit une croûte saline fragile, soit caillouteuse ou sableuse. Des fois il est difficile à distinguer de l'Erg. C'est un pédopaysage omniprésent dans la région, il s'agit des surfaces planes accessibles. Le *zygophyllum Album* est l'espèce végétale caractéristique de glacis. L'analyse granulométrique (Figure V-3) montre que les sols de glacis contiennent de 0,65 % à 7,87 % de limon et argile avec en moyenne de 2,6 %. Le sable fin est la fraction dominante avec une moyenne de 39,85% et des taux qui varient entre 19,54 % et 49,94 %. Les autres fractions sont dans l'ordre décroissant : sable moyen, sable très fin, sable grossier et sable très grossier avec les teneurs moyennes 29,4 %, 10,99 %, 8,57 % et 8,55 % respectivement.

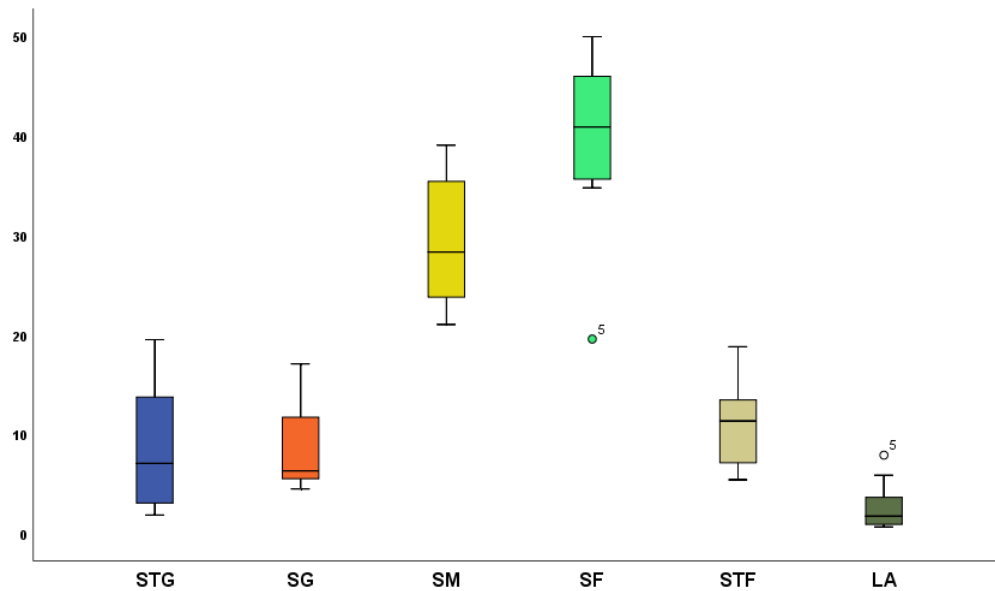


Figure V-3: Box plot de la composition granulométrique des sols de glacis.

### V.1.3. Reg

Les Regs sont des surfaces planes à couverture caillouteuse, inhabitable. En surface du sol le vent entraîne les particules fines, les particules grossières supérieures à la compétence des vents se concentrent sous forme d'un pavage graveleux. Ce sont des sols nus concentrés au sud-ouest de la région de Ouargla. Le sable moyen domine les Regosols avec une moyenne 33,32 % suivi par le sable fin avec 31 %; Le limon et l'argile sont peu présents avec 0,77 %. Les teneurs moyennes des autres fractions sableuses fluctuent entre 7,56 % et 15,91 % (Figure V-4).

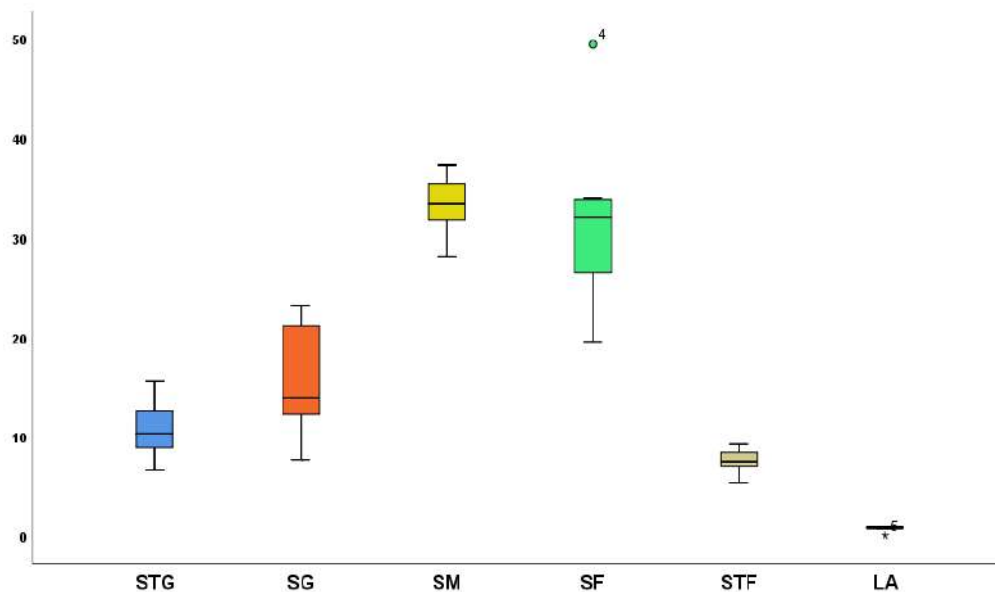


Figure V-4: Box plot de la composition granulométrique des sols de Reg.

### V.1.4. Erg

Les Ergs sont concentrés sur le côté Est de la cuvette et ils couvrent une grande partie de sa superficie. Ce sont des accumulations des arénosols qui sont des sols sableux, sur au moins 120 cm d'épaisseur. Ils ne sont affectés par un excès d'eau ce qui leurs donne un aspect sec. Les sols sont assez peu différenciés (textures et couleurs très proches). Des pieds de palmier dattier dispersés sont remarquables au niveau des Ergs.

L'analyse granulométrique (Figure V-5) montre que le sable moyen et le sable fin dominant les sols d'Erg avec une moyenne de 51,41 % et 38,95 %. Les autres fractions ne constituent que 9,64 % des sols d'Erg avec 1,29 % du sable très grossier, 3,45 % du sable grossier, 4,62 % du sable et très fin et 0,27 % de limon et argile. Ce sont des sols minéraux bruts.

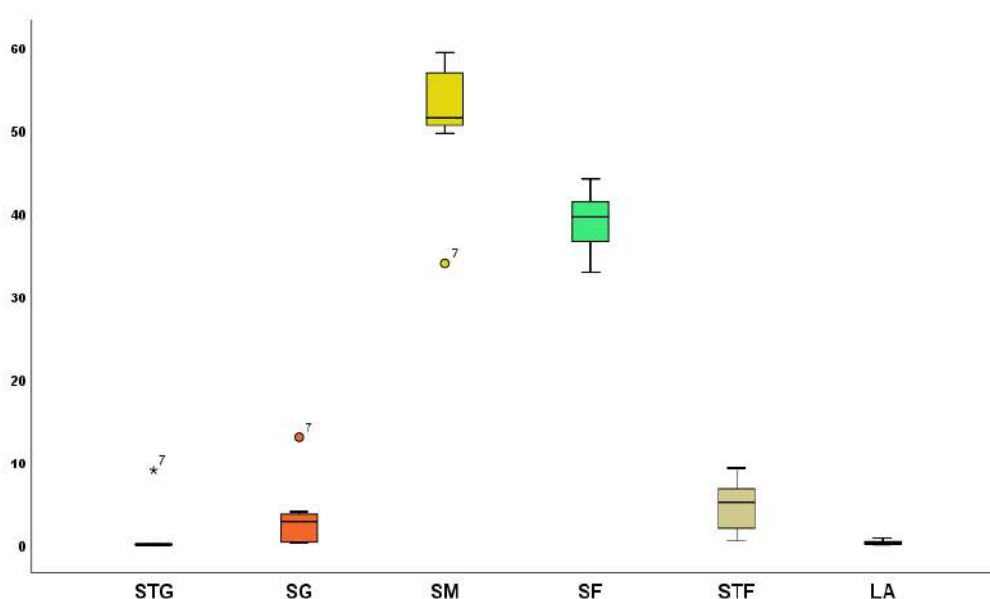


Figure V-5: Box plot de la composition granulométrique des sols d'Erg.

### V.1.5. Chott et Sebkh

Les sebkhas Safioune au nord, Oum Er-Raneb au sud-est et Bamendil au sud (centre-ville) sont les trois sebkhas présentes dans la cuvette. Ce sont des fonds plats et salés des dépressions fermées, sans végétation, caractérisé par des efflorescences salines en périodes sèches. Le chott de Aïn El-Beida est le seul chott dans la région de Ouargla. Il s'agit d'une dépression avec lac salé.

L'analyse granulométrique (Figure V-6) montre que les sols de chott et sebkha contiennent de 0,36 % à 3,74 % de limon et argile avec en moyenne de 1,44%. Le sable fin est la fraction dominante avec une moyenne de 57,29 % et des taux qui varient entre 24,20 % et 72,66 %. Les autres fractions sont dans l'ordre croissant : sable très grossier, sable très fin, sable grossier et sable moyen avec les teneurs moyennes 1,18 %, 4,68 %, 5,35 % et 30,13 % respectivement.

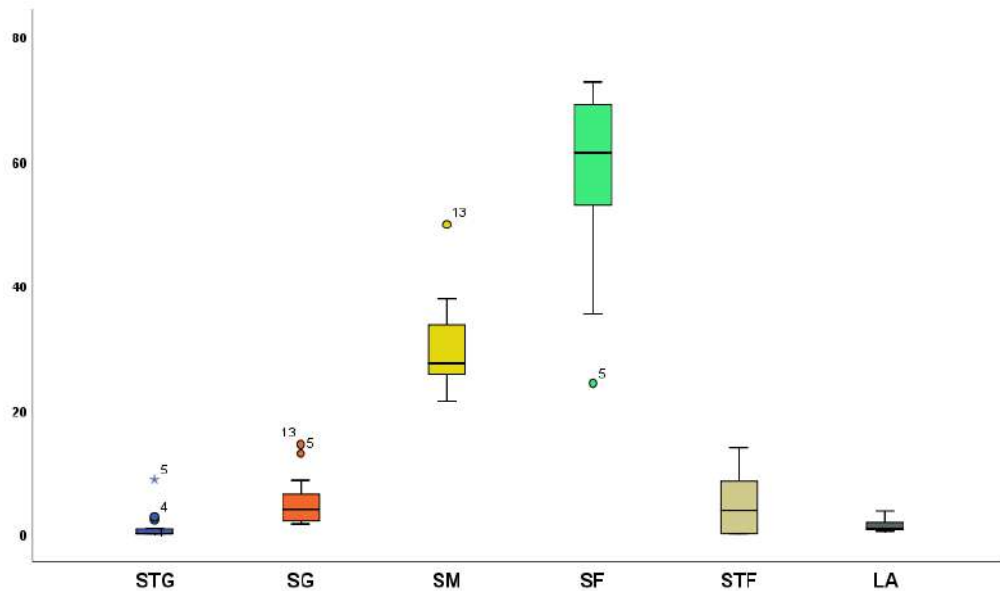


Figure V-6 : Box plot de la composition granulométrique des sols du Chott et Sebka.

### V.1.6. Lits d'Oueds

Au Nord de la cuvette, à l'ouest de la Sebkhate Safioune, se trouvent le lit d'Oued N'sa qui se coïncide avec le glaciaire. Il est constitué des sols sableux à dominance de sable fin avec une moyenne de 57,17 %, sans végétation. Ces sols sont les plus riches en limon et argile où leurs teneurs peuvent atteindre jusqu'à 17,16 %. Le sable très grossier est presque absent dans ces sols (0,78 %). La teneur moyenne est 12,99 % pour le sable grossier, 20,41 % pour le sable moyen et 3,44 % de sable très fin (Figure V-7).

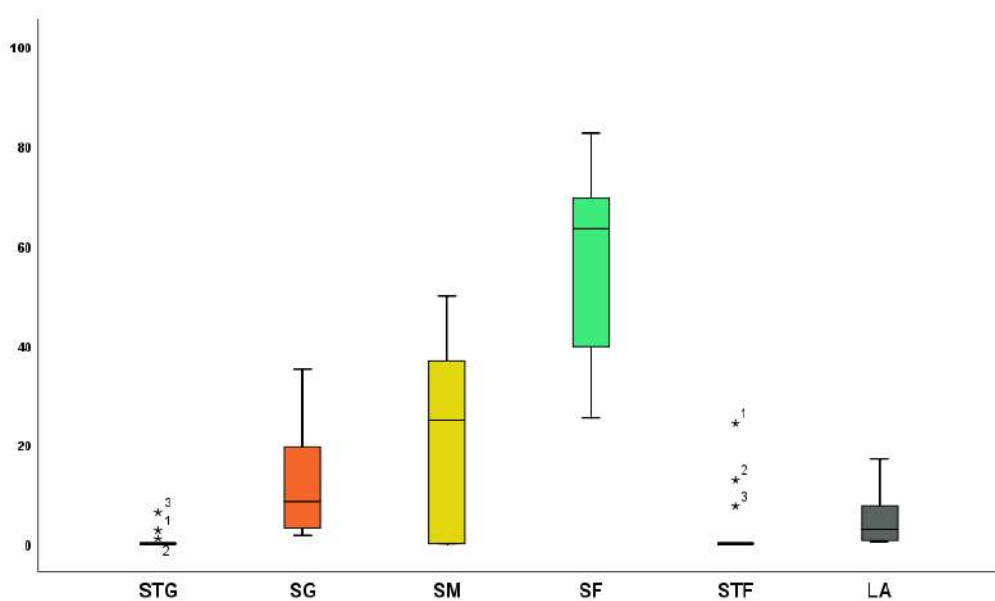


Figure V-7: Box plot de la composition granulométrique des sols de lit d'oued.

## V.2. PERMEABILITE DES SOLS DE DEFERENTS PEDOPAYSAGES

Les box plots (Figure V-8) ont été utilisés pour présenter les résultats de mesures de la perméabilité des sols des différents pédopaysages de Ouargla (plateau, glacis, reg, erg, chott et sebkha et lit d'oued) *in situ* par la méthode de Porchet. Ils montrent une grande variation de la perméabilité du sol d'un pédopaysage à un autre. La perméabilité du sol dans le Plateau varie de 1,35 à 10,95 m/j, dans le Glacis de 1,21 à 5,75 m/j, dans le Reg de 3,08 à 6,37 m/j, dans l'Erg de 5,28 à 8,49 m/j, dans le chott et la sebkha de 0,33 à 8,16 et de 2,19 à 5,66 dans les lits d'oueds. Dans tous les cas, les moustaches sont asymétriques. La distribution est élevée dans le cas du plateau, et elle devient de moins en moins importante dans les cas de Sabkha, Glacis, Erg, Reg et lits d'oueds respectivement.

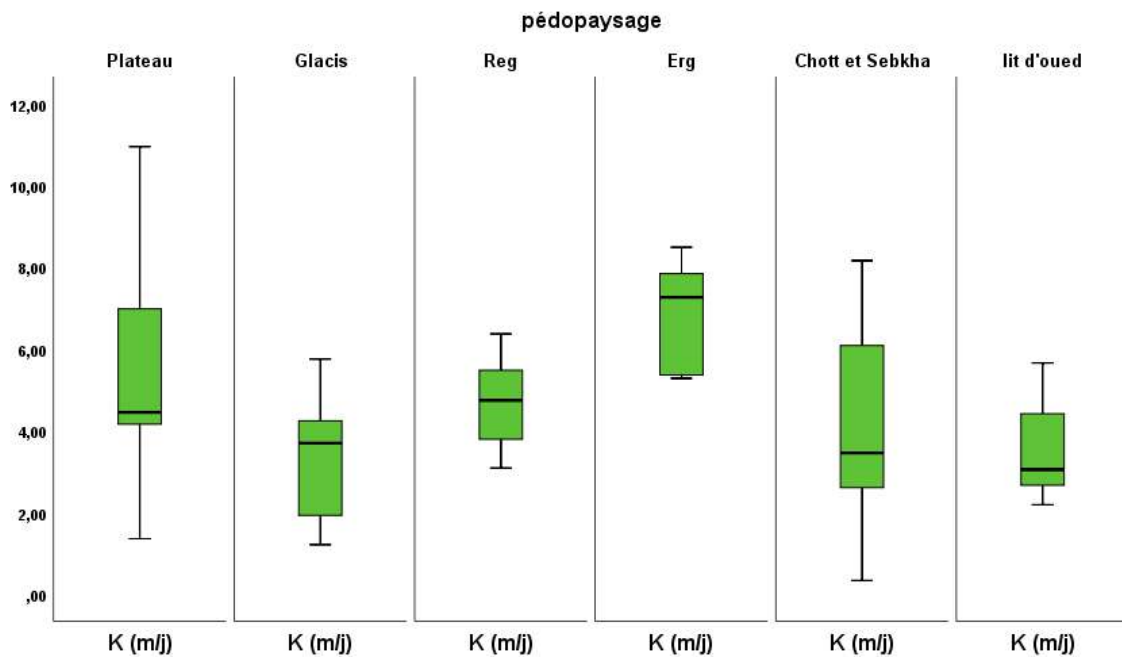


Figure V-8: Box plots de la perméabilité in situ des sols de pédopaysages de Ouargla.

Selon les valeurs de la perméabilité moyenne des sols de chaque pédopaysage, on a déduit le classement décroissant suivant : les sols d'Erg (6,92 m/j), les sols du Plateau (5,58 m/j), les sols de Reg (4,68 m/j), les sols de chott et Sebkhha (4,06 m/j), les sols de lits d'oueds (3,51 m/j) et les sols des Glacis (3,35 m/j) (Annexe III et IV).

Pour tester la normalité de nos données nous avons utilisé le test de Kolmogorov-Smirnov avec correction de la signification de Lilliefors. Les résultats obtenus (Tableau V-1) montrent que  $P > 0,05$  pour la perméabilité (K (m/j)) des sols de tous les pédopaysages et des sols de Ouargla, ce qui implique une distribution normale pour nos données.



Tableau V-1 : Test de normalité.

Variable	Kolmogorov-Smirnov		
	Statistique	df	P
K (m/j) plateau	0,215	7	0,200*
K (m/j) Glacis	0,212	12	0,143
K (m/j) Reg	0,148	7	0,200*
K (m/j) Erg	0,236	6	0,200*
K (m/j) Chott et Sebkha	0,210	13	0,120
K (m/j) lit d'oued	0,286	8	0,053
K (m/j) (sols de Ouargla)	0,104	53	0,200*

\*. Il s'agit d'une limite inférieure de la véritable signification.

Une analyse de variance (ANOVA) a été réalisée afin de comparer la perméabilité des sols des différents paysages dans la région de Ouargla (Tableau V-2). Dans ces résultats  $P= 0,007$ . Du fait du  $P < 0,05$ , nous rejetons l'hypothèse nulle (il n'y a pas de différence de moyennes de la perméabilité des sols entre les pédopaysages) et concluons que les sols de certains pédopaysages ont des moyennes de perméabilité différentes. Cette différence peut s'expliquer par la différence de texture et de structure du sol.

Tableau V-2: Les résultats de l'ANOVA.

K (m/j)					
	Somme des carrés	df	moyenne Carrée	F	P.
Entre groupes	69,228	5	13,846	3,668	0,007
Au sein des groupes	177,397	47	3,774		
Total	246,626	52			

Pour déterminer si la différence de moyenne entre des paires spécifiques de groupes est statistiquement significative et pour estimer de combien elles sont différentes, nous avons utilisé le test de Tukey (Tableau V-3 et tableau V-4) (Annexe VI).

Tableau V-3: Regroupement d'informations à l'aide de la méthode Tukey et 95 % de confiance.

Pédopaysage	N	A	B
Glacis	12	3,3557	
lit d'oued	8	3,5155	
Chott et Sebkha	13	4,0612	4,0612
Reg	7	4,6805	4,6805
Plateau	7	5,5802	5,5802
Erg	6		6,9207

Le tableau (V-3) montre que le groupe A contient les sols des Glacis, lit d'oued, Chott et Sebkha, Reg et Plateau et le groupe B contient les sols des Chott et Sebkha, Reg, Plateau et Erg. Les sols Chott et Sebkha, Reg et Plateau sont dans les deux groupes, donc les différences entre les moyennes ne sont pas statistiquement significatives. Les sols des Glacis, lit d'oued et Erg ne partagent pas un groupe, ce qui indique que les sols Erg ont une moyenne significativement plus élevée que les sols de Chott, Sebkha et Glacis.

Tableau V-4: Tests simultanés de Tukey pour les différences de moyennes

Différence de niveaux	Différence de moyenne	95 % CI		P
		Borne inférieure	Borne supérieure	
Plateau – Glacis	2,22	-0,52	4,97	0,175
Plateau – Reg	0,90	-2,18	3,98	0,953
Plateau – Erg	-1,34	-4,55	1,87	0,815
Plateau - Chott et Sebkha	1,52	-1,19	4,22	0,559
Plateau- lit d'oued	2,06	-0,92	5,05	0,329
Glacis – Reg	-1,32	-4,07	1,42	0,707
Glacis – Erg	-3,56	-6,45	-0,68	0,008*
Glacis - Chott et Sebkha	-0,71	-3,02	1,60	0,943
Glacis - lit d'oued	-0,16	-2,79	2,47	1,000
Reg – Erg	-2,24	-5,45	0,97	0,319
Reg - Chott et Sebkha	0,62	-2,09	3,32	0,983
Reg - lit d'oued	1,17	-1,82	4,15	0,854
Erg - Chott et Sebkha	2,85	0,01	5,71	0,049*
Erg - lit d'oued	3,40	0,29	6,52	0,025*
Chott et Sebkha - lit d'oued	0,55	-2,05	3,14	0,989

Dans les résultats de Tukey, les intervalles de confiance indiquent ce qui suit :

- L'intervalle de confiance pour la différence entre les moyennes de la perméabilité des sols de Glacis et d'Erg est de -6,45 à -0,68. Cette plage ne comprend pas zéro, ce qui indique que la différence est statistiquement très significative (P = 0,008). Les sols de glacis sont des formations sablo-graveleuses d'origine alluvion-éolienne, composées à 38,85 % de sable fin avec la présence de gypse, ce qui les rend plus compacts et moins perméables que les sols d'Erg, qui sont des accumulations éoliennes, composées principalement de 51,41 % de sable moyen et 38,95 % de sable fin à structure particulière.

- L'intervalle de confiance pour la différence entre les moyennes de la perméabilité des sols d'Erg et Chott et Sebkha est de 0,01 à 5,71. Cette plage ne comprend pas zéro, ce qui indique que la différence est statistiquement significative ( $P = 0,049$ ). Les sols d'Erg sont des accumulations éoliennes, composées principalement de 51,41 % de sable moyen et 38,95 % de sable fin à structure particulière ce qui les rend non compacts et plus perméables que les sols de Chott et Sebkha où le sable fin est la fraction dominante avec une moyenne de 57,29 %.
- L'intervalle de confiance pour la différence entre les moyennes de la perméabilité des sols d'Erg et lit d'oued est de 0,29 à 6,52. Cette plage ne comprend pas zéro, ce qui indique que la différence est statistiquement très significative ( $P = 0,025$ ). Les sols d'Erg sont des accumulations éoliennes, composées principalement de 51,41 % de sable moyen et 38,95 % de sable fin à structure particulière ce qui les rend non compacts et plus perméables que les sols de lit d'oued qui sont à dominance de sable fin avec une moyenne de 57,17 % et qui sont les sols les plus riches en limon et argile où leurs teneurs peuvent atteindre jusqu'à 17,16 %.
- Les intervalles de confiance pour les paires de moyennes restantes; (Plateau – Glacis), (Plateau – Reg), (Plateau – Erg), (Plateau - Chott et Sebkha), (Plateau- lit d'oued), (Glacis – Reg), (Glacis - Chott et Sebkha), (Glacis - lit d'oued), (Reg – Erg), (Reg - Chott et Sebkha), (Reg - lit d'oued), (Chott et Sebkha - lit d'oued) ; incluent tous zéro, ce qui indique que les différences ne sont pas statistiquement significatives. Cela est dû à l'homogénéité des sols de ces couples en termes de structure et de texture, qui sont généralement majoritairement sableux avec des pourcentages différents de sable grossier, de sable fin, de sable moyen, de limon et d'argile.

Le niveau de confiance simultané de 95 % indique que nous pouvons être sûrs à 95 % que tous les intervalles de confiance contiennent les vraies différences.

### **V.3. REPARTITION SPATIALE DE LA PERMEABILITE DES SOLS**

La perméabilité des sols de Ouargla varie entre 0,34 m/j et 10,96 m/j (Figure V-9) (Annexe V). La perméabilité moyenne est de 4,43 m/j. La boîte à moustaches est approximativement symétrique, car les deux moitiés de la boîte sont de longueurs sensiblement égales ce qui indique une distribution concentrée.

La carte de perméabilité montre sa variation d'un point à un autre (Figure V-10). Les sols les plus perméables sont localisés sur le côté Sud-est de la cuvette, là où se trouvent les formations dunaires (Erg). La perméabilité diminue en allant du Sud-est vers le centre dans les zones de sebkhas et des glacis et elle augmente en allant du centre vers le sud-ouest où se trouve les sols de plateau. Vers le nord de la région la perméabilité des sols diminue dans la Sebkha de Safioune et lit d'oued.

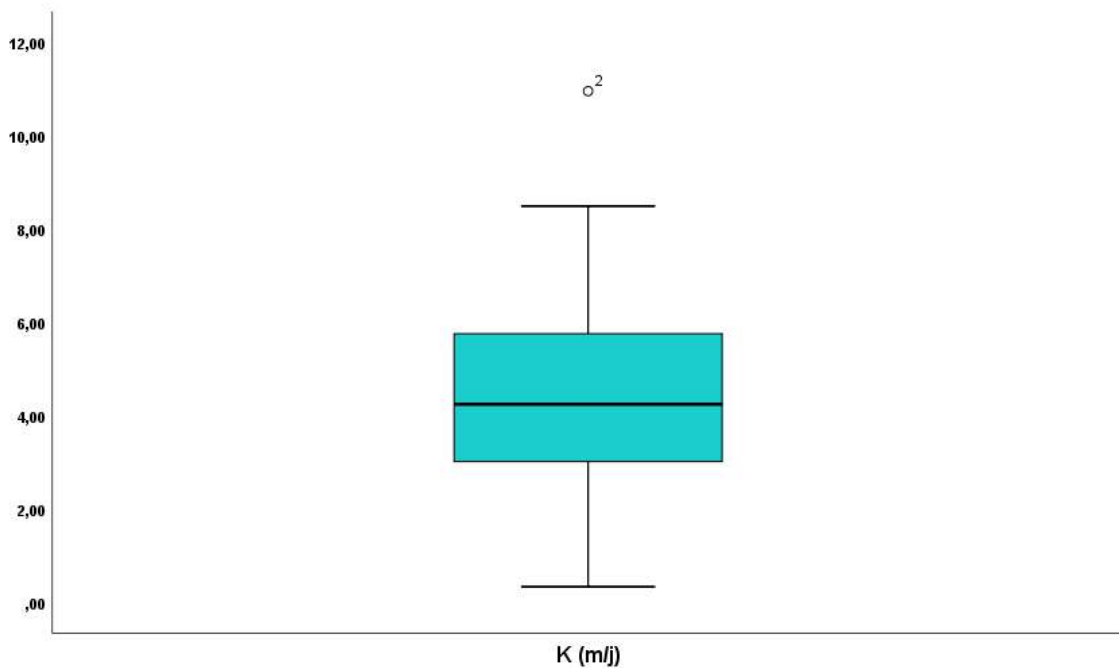


Figure V-9: Box plots de la perméabilité des sols de Ouargla

La variation spatiale de la perméabilité des sols de Ouargla est due à plusieurs paramètres qui affectant la perméabilité parmi lesquels la porosité qui diffère dans les sols étudiés, aussi le compactage de sol et aussi le degré de saturation de sol qui est dû aux précipitations, la remontée de la nappe et la fréquence d'irrigation qui influe sur la perméabilité du sol en la réduisant (Plus le sol est irrigué, il tend vers la saturation ce qui diminue son pouvoir d'infiltrer l'eau).

Il y a aussi d'autres facteurs souterrains qui peuvent affecter la perméabilité des sols comme la présence des obstacles mécaniques (dalle de calcaire et croûte gypseuse) et biologiques (racines) et hydrique (nappe).

La totalité des sols que nous avons étudiés sont des sols à dominance sableuse avec une perméabilité importante ce qui désigne un bon drainage et facilite le transfert des polluants vers les nappes d'eau souterraine. Cela est confirmé par les résultats de Musy et Soutter (1991) (Annexe VII), qui indique que les sols présentant une perméabilité comprise entre  $10^{-4}$  m/s et  $10^{-5}$  m/s sont des sols semi-perméables à dominance sableuse avec du gravier, caractérisés par une bonne possibilité de drainage.

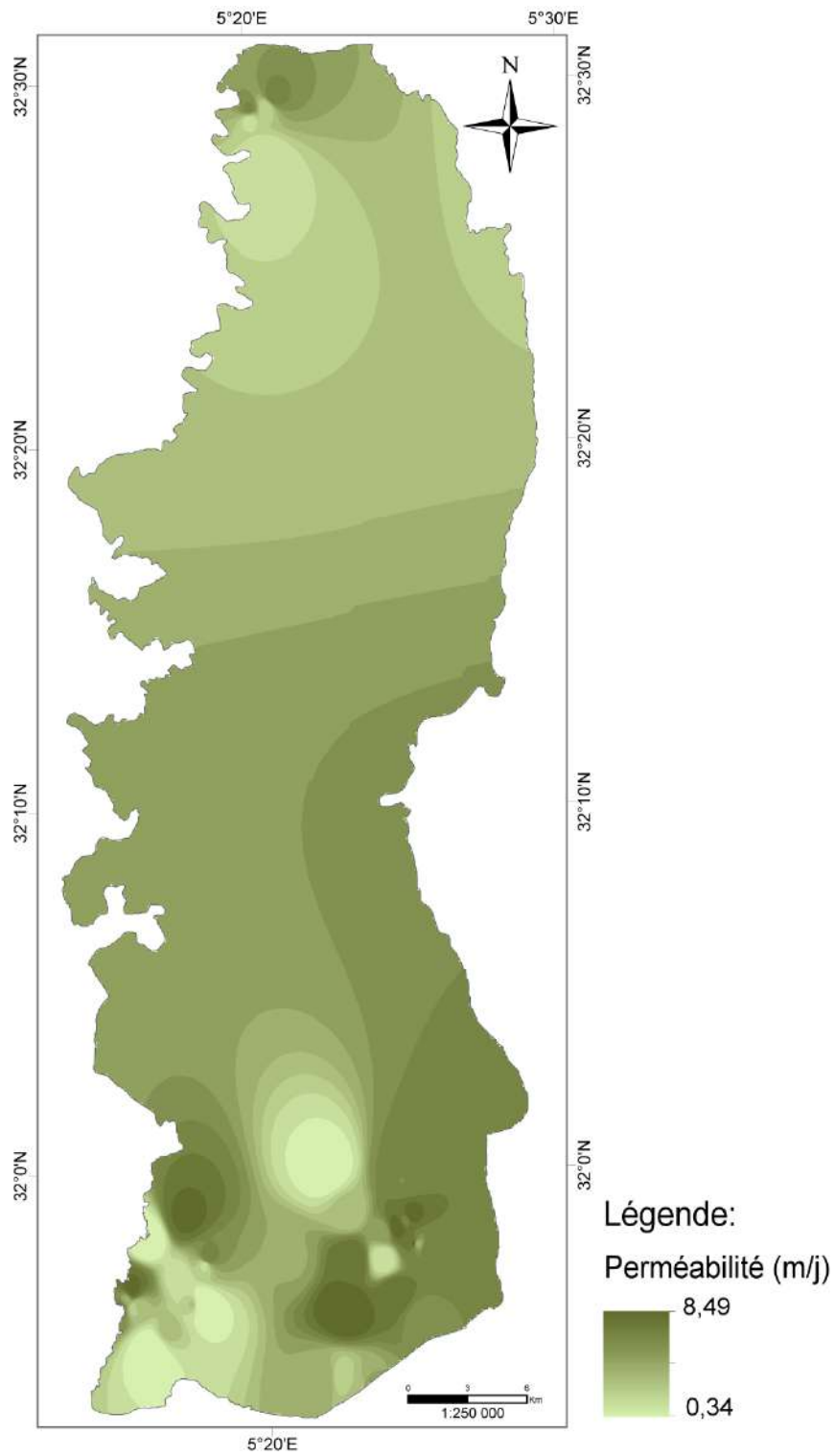


Figure V-10 : Carte de la perméabilité des sols de Ouargla

# **CHAPITRE VI**

## **MODELISATION DE LA PERMEABILITE DES SOLS**

## CHAPITRE VI : MODELISATION DE LA PERMEABILITE DES SOLS DE OUARGLA

On aborde dans ce chapitre l'ensemble des corrélations qui ont été effectuées entre les différentes variables mises à profit au cours de cette démarche et on procède également à la présentation des résultats d'analyses statistiques.

### VI.1. MATRICE DE CORRELATION

Les calculs statistiques sur l'ensemble des variables permettent de déduire des corrélations significatives qui sont positives ou négatives. Le tableau VI-1 résume l'ensemble des résultats obtenus. D'après la matrice de corrélation, on a remarqué que les corrélations suivantes sont statistiquement significatives:

- La corrélation du sable moyen avec la perméabilité des sols (K) est positive avec une valeur de 0,3
- Les corrélations du pédopaysages avec respectivement le sable très grossier (STG), le sable très fin (STF) et le total de sable sont toutes négatives et de l'ordre de (-0,51), (-0,6) et (-0,25)
- Les corrélations du pédopaysages avec le sable fin (SF), le limon et argile (L+A) sont positives et respectivement de l'ordre de (0,46) et (0,26).
- Les corrélations du sable très grossier (STG) avec le sable grossier et le sable très fin sont positives et de l'ordre respectivement de 0,34 et 0,26.
- Une corrélation négative entre le taux de STG et le taux de SF qui est de l'ordre de -0,61.
- Une corrélation négative entre le taux de SM et le taux de SG d'une valeur de -0,49.
- Les corrélations du SM avec respectivement le SF et de L+A sont négatives avec des valeurs de -0,49 et -0,50.
- Une corrélation positive entre le taux total du sable et le taux de SM, d'une valeur de 0,49.
- Une corrélation négative entre le taux de SF et le taux de STF de l'ordre de -0,51.
- Une corrélation négative entre le taux total du sable et le taux de L+A de l'ordre de -1.
- Une corrélation négative entre le taux d'humidité et la densité apparente d'une valeur de -0,66.

Tableau VI-1: Matrice de corrélation de Pearson entre les variables des sols de Ouargla.

		K (m/J)	pédopaysage	STG	SG	SM	SF	STF	ST	L+A
K (m/J)	R <sup>2</sup>	1								
pédopaysage	R <sup>2</sup>	-0,10	1							
	Sig.	0,47								
STG	R <sup>2</sup>	-0,16	<b>-0,51</b>	1						
	Sig.	0,25	0,00							
SG	R <sup>2</sup>	-0,14	0,15	<b>0,34</b>	1					
	Sig.	0,33	0,27	0,01						
SM	R <sup>2</sup>	<b>0,3</b>	-0,08	-0,05	<b>-0,49</b>	1				
	Sig.	0,03	0,56	0,72	0,00					
SF	R <sup>2</sup>	-0,15	<b>0,46</b>	<b>-0,61</b>	-0,12	<b>-0,48</b>	1			
	Sig.	0,28	0,00	0,00	0,39	0,00				
STF	R <sup>2</sup>	0,05	<b>-0,60</b>	0,26	-0,18	-0,11	<b>-0,51</b>	1		
	Sig.	0,7	0,00	0,06	0,19	0,41	0,00			
ST	R <sup>2</sup>	0,12	-0,25	0,06	-0,19	<b>0,49</b>	-0,05	-0,19	1	
	Sig.	0,38	0,07	0,64	0,16	0,00	0,71	0,17		
L+A	R <sup>2</sup>	-0,13	0,26	-0,07	0,19	<b>-0,49</b>	0,06	0,19	<b>-1</b>	1
	Sig.	0,34	0,06	0,62	0,17	0,00	0,65	0,18	0,00	

## VI.2. ANALYSE EN COMPOSANTE PRINCIPALE (ACP)

La méthode de l'ACP permet de réduire un grand nombre de variables quantitatives ou qualitatives en un plus petit nombre de facteurs orthogonaux pour interpréter la matrice de corrélation (Jackson and Somers, 1991 ; Meglen, 1991, Cloutier et al., 2008). C'est une méthode statistique qui se propose de trouver les vecteurs propres dans la matrice des variables ainsi que leurs valeurs propres. Le premier vecteur (F1) exprime la valeur la plus importante qui représente un pourcentage très élevé de la variance totale du nuage des points, tandis que le deuxième vecteur (F2) exprime la partie de la variance résiduelle. La Figure (VI-1) montre l'expression des liens entre les variables.

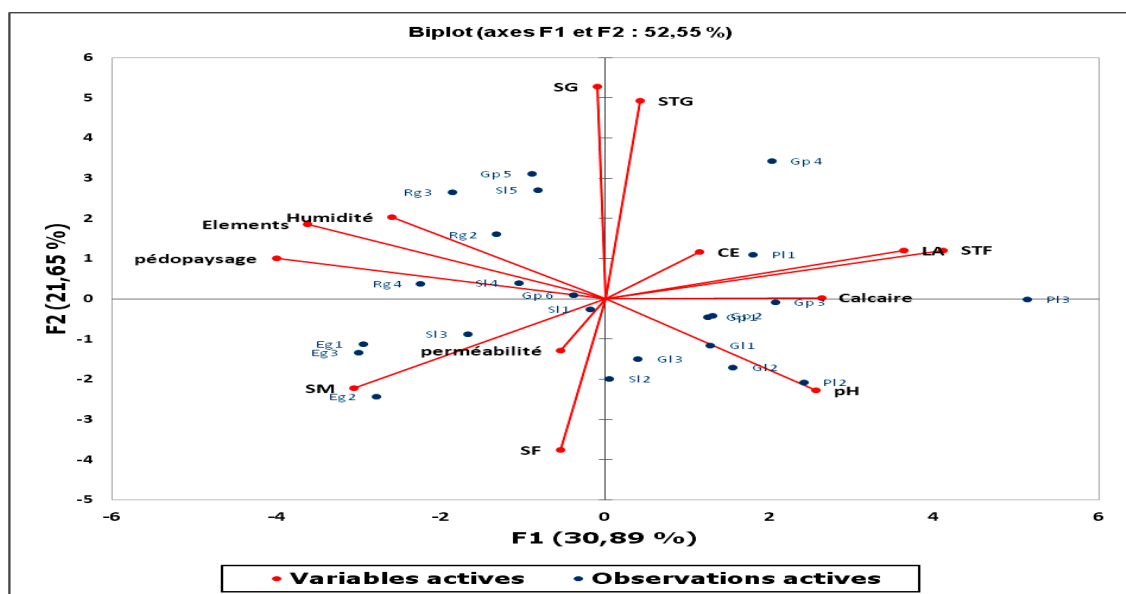


Figure VI-1: Projection des variables et des individus sur le plan factoriel F1/ F2.



Les axes factoriels F1 et F2 expriment 52,55 % de la variance totale. Le premier facteur F1 représente (30,89 %) de la variance totale du système, déterminé par STG, CE, L+A, STF et le calcaire total). Le facteur F2 représente 21,65 % de la variance totale du système, représenté par le pédopaysage, le total du sable et SG.

### VI.3. MODELISATION DE LA PERMEABILITE DES SOLS

La régression linéaire est utilisée pour estimer l'effet de chaque caractéristique du sol sur la perméabilité et modéliser la perméabilité.

#### VI.3.1. Effet de la teneur du sol en sable très grossier (STG) sur la perméabilité

Le tableau (VI-2) montre que le coefficient de STG est de -0,066. Le constant de perméabilité est de 4,722 m/j. Ceci indique que si la teneur en STG augmente de 1 %, la valeur de la perméabilité diminue avec 0,066 m/j, c'est-à-dire que la teneur en STG a un effet négatif de 0,066 sur la perméabilité du sol. Cela nous permet de sortir le model suivant :

$$K = 4,722 + (-0,066 \times \% \text{ STG})$$

Tableau VI-2: Résultats de la régression linéaire (STG-K).

Modèle	Coef. non standardisés		Coef. standardisés	t	P
	B	Erreur stand.	Bêta		
Constante	4,722	0,391		12,086	0,000
STG	-0,066	0,057	-0,162	-1,174	0,246

Le tableau (VI-3) montre que ce modèle n'explique que 2,6 % de la variante de la perméabilité (R-deux= 0,026). Pour améliorer la qualité de ce modèle il faut rajouter d'autres variables. Du fait que la valeur de P est supérieure à 0,1 (Tableau VI-2) ce modèle n'est pas significatif.

Tableau VI-3: Récapitulatif de modèle (STG-K).

Modèle	R	R-deux	R-deux ajusté	Erreur stand. d'estimation
STG-K	0,162	0,026	0,007	2,16990

#### VI.3.2. Effet de la teneur du sol en sable grossier (SG) sur la perméabilité

Le tableau (VI-4) montre que le coefficient de SG est -0,037 et le constant de perméabilité est 4,763 m/j. Ceci indique que si la teneur en SG augmente avec 1 % la valeur de la perméabilité diminue avec 0,037 m/j, c'est-à-dire que la teneur en SG a un effet négatif de 0,037 sur la perméabilité du sol. Cela nous permet de sortir le model suivant :

$$K = 4,763 + (-0,037 \times \% SG)$$

Tableau VI-4: Résultats de la régression linéaire (SG-K).

Modèle	Coef. non standardisés		Coef. standardisés	t	P
	B	Erreur stand.	Bêta		
Constante	4,763	0,456		10,449	0,000
SG	-0,037	0,038	-0,136	-0,982	0,331

Le tableau (VI-5) montre que ce modèle n'explique que 1,9 % de la variante de la perméabilité (R-deux= 0,019). Pour améliorer la qualité de ce modèle il faut rajouter d'autres variables. Ce modèle n'est pas significatif du fait que la valeur de P est supérieure à 0,1 (Tableau VI-4).

Tableau VI-5: Récapitulatif de modèle (SG-K).

Modèle	R	R-deux	R-deux ajusté	Erreur stand. d'estimation
SG-K	0,136	0,019	-0,001	2,17854

### VI.3.3. Effet de la teneur du sol en sable moyen (SM) sur la perméabilité

Le tableau (VI-6) montre que le coefficient de SM est 0,045 et le constant de perméabilité est 3,102 m/j. Ceci indique que si la teneur en SM augmente avec 1 % la valeur de la perméabilité augmente avec 0,045 m/j, c'est-à-dire que la teneur en SM a un effet positif de 0,045 sur la perméabilité du sol. Cela nous permet de sortir le modèle suivant :

$$K = 3,102 + (0,045 \times \% SM)$$

Tableau VI-6 : Résultats de la régression linéaire (SM-K).

Modèle	Coef. non standardisés		Coef. standardisés	t	P
	B	Erreur stand.	Bêta		
Constante	3,102	0,664		4,672	0,000
SM	0,045	0,021	0,296	2,213	0,031

Ce modèle est très significatif du fait que la valeur de P est inférieure à 0,05 (P= 0,03) (Tableau VI-6) mais le tableau (VI-7) montre que ce modèle n'explique que 8,8 % de la variante de la perméabilité (R-deux= 0,088) ce qui exige l'addition d'autres variables pour améliorer sa qualité.

Tableau VI-7 : Récapitulatif de modèle (SM-K).

Modèle	R	R-deux	R-deux ajusté	Erreur stand. d'estimation
SM-K	0,296	0,088	0,070	2,10050

#### VI.3.4. Effet de la teneur du sol en sable fin (SF) sur la perméabilité

Le tableau (VI-8) montre que le coefficient de SF est -0,022 et le constant de perméabilité est 5,408 m/j. Ceci indique que si la teneur en SF augmente avec 1 % la valeur de la perméabilité diminue avec 0,022 m/j, c'est-à-dire que la teneur en SF a un effet négatif de 0,022 sur la perméabilité du sol. Cela nous permet de sortir le model suivant :

$$K = 5,408 + (-0,022 \times \% SF)$$

Tableau VI-8: Résultats de la régression linéaire (SF-K).

Modèle	Coef. non standardisés		Coef. standardisés	t	P
	B	Erreur stand.	Bêta		
Constante	5,408	0,942		5,742	0,000
SF	-0,022	0,020	-0,152	-1,100	0,276

Le tableau (VI-9) montre que ce modèle n'explique que 2,3 % de la variante de la perméabilité (R-deux= 0,023). Pour améliorer la qualité de ce modèle il faut rajouter d'autres variables. Ce modèle n'est pas significatif du fait que la valeur de P est supérieure à 0,1 (Tableau VI-8)

Tableau VI-9: Récapitulatif de modèle (SF-K).

Modèle	R	R-deux	R-deux ajusté	Erreur stand. d'estimation
SF-K	0,152	0,023	0,004	2,17340

#### VI.3.5. Effet de la teneur du sol en sable très fin (STF) sur la perméabilité

Le tableau (VI-10) montre que le coefficient de STF est 0,013 et le constant de perméabilité est 4,302 m/j. Ceci indique que si la teneur en STF augmente avec 1% la valeur de la perméabilité augmente avec 0,013 m/j, c'est-à-dire que la teneur en STF a un effet positif de 0,013 sur la perméabilité du sol. Cela nous permet de sortir le model suivant :

$$K = 4,302 + (0,013 \times \% STF)$$

Tableau VI-10: Résultats de la régression linéaire (STF-K).

Modèle	Coef. non standardisés		Coef. standardisés	t	P
	B	Erreur stand.	Bêta		
Constante	4,302	0,437		9,840	0,000
STF	0,013	0,034	0,054	0,389	0,699

Le tableau (VI-11) montre que ce modèle n'explique que 0,3 % de la variante de la perméabilité (R-deux= 0,003). Pour améliorer la qualité de ce modèle il faut rajouter d'autres variables. Ce modèle n'est pas significatif du fait que la valeur de P est supérieure à 0,1 (P= 0,699) (Tableau VI-10).

Tableau VI-11: Récapitulatif de modèle (STF-K).

Modèle	R	R-deux	R-deux ajusté	Erreur stand. d'estimation
STF-K	0,054	0,003	-0,017	2,19580

### VI.3.6. Effet de la teneur total du sol en sable sur la perméabilité

Le tableau (VI-12) montre que le coefficient de taux de total du sable est 0,081 et le constant de perméabilité est -3,435 m/j. Ceci indique que la teneur totale en sable a un effet positif de 0,081 sur la perméabilité du sol. Cela nous permet de sortir le model suivant :

$$K = -3,435 + (0,081 \times \% \text{ total du sable})$$

Tableau VI-12: Résultats de la régression linéaire (Total du sable-K)

Modèle	Coef. non standardisés		Coef. standardisés	t	P
	B	Erreur stand.	Bêta		
Constante	-3,435	8,952		-0,384	0,703
Total du sable	0,081	0,092	0,122	0,879	0,384

Le tableau (VI-13) montre que ce modèle n'explique que 1,5 % de la variante de la perméabilité (R-deux= 0,015). Pour améliorer la qualité de ce modèle il faut rajouter d'autres variables. Ce modèle n'est pas significatif du fait que la valeur de P est supérieure à 0,1 (P= 0,384) (Tableau VI-12).

Tableau VI-13: Récapitulatif de modèle (Total du sable-K)

Modèle	R	R-deux	R-deux ajusté	Erreur stand. d'estimation
Total du sable-K	0,122	0,015	-0,004	2,18259

### VI.3.7. Effet de la teneur du sol en limon et argile (L+A) sur la perméabilité

Le tableau (VI-14) montre que le coefficient de L+A est -0,088 et le constant de perméabilité est 4,662 m/j. Ceci indique que si la teneur en L+A augmente avec 1 % la valeur de la perméabilité diminue avec 0,088 m/j, c'est-à-dire que la teneur en L+A a un effet négatif de 0,088 sur la perméabilité du sol. Cela nous permet de sortir le model suivant :

$$K = 4,662 + (-0,088 \times \% (L+A))$$

Tableau VI-14 : Résultats de la régression linéaire (L+A-K)

Modèle	Coef. non standardisés		Coef. standardisés	t	P
	B	Erreur stand.	Bêta		
Constante	4,662	0,388		12,023	0,000
L+A	-0,088	0,092	-0,133	-0,961	0,341

Le tableau (VI-15) montre que ce modèle n'explique que 1,8% de la variante de la perméabilité (R-deux= 0,018). Pour améliorer la qualité de ce modèle il faut rajouter d'autres variables. Ce modèle n'est pas significatif du fait que la valeur de P est supérieure à 0,1 (P= 0,341) (Tableau VI-14).

Tableau VI-15 : Récapitulatif de modèle (L+A-K).

Modèle	R	R-deux	R-deux ajusté	Erreur stand. d'estimation
L+A-K	0,133	0,018	-0,001	2,17940

### VI.3.8. Effet de la teneur du sol en eau (H) sur la perméabilité

Le tableau (VI-16) montre que le coefficient de la teneur en eau est -4,277 et le constant de perméabilité est 5,930 m/j. Ceci indique que si la teneur en eau augmente avec 1% la valeur de la perméabilité diminue avec 4,277 m/j, c'est-à-dire que l'humidité du sol a un effet négatif de 4,277 sur la perméabilité du sol. Cela nous permet de sortir le model suivant :

$$K = 5,930 + (-4,277 \times \% (H))$$

Tableau VI-16: Résultats de la régression linéaire (H-K)

Modèle	Coef. non standardisés		Coef. standardisés	t	P
	B	Erreur stand.	Bêta		
Constante	5,930	0,839		7,066	0,000
H	-4,277	3,983	-0,252	-1,074	0,298

Le tableau (VI-17) montre que ce modèle n'explique que 6,4 % de la variante de la perméabilité (R-deux= 0,064). Pour améliorer la qualité de ce modèle il faut rajouter d'autres variables. Ce modèle n'est pas significatif du fait que la valeur de P est supérieure à 0,1 (P= 0,298) (Tableau VI-16).

Tableau VI-17 : Récapitulatif de modèle (H-K).

Modèle	R	R-deux	R-deux ajusté	Erreur stand. d'estimation
H-K	0,252	0,064	0,008	1,94649

### VI.3.9. Effet de la densité apparente du sol sur la perméabilité

Le tableau (VI-18) montre que le coefficient de la densité apparente est 0,655 et le constant de perméabilité est 4,183 m/j. Ceci indique que si la densité apparente augmente avec 1 g/cm<sup>3</sup> la valeur de la perméabilité augmente avec 0,655 m/j, c'est-à-dire que la densité apparente du sol a un effet positif de 0,655 sur la perméabilité du sol. Cela nous permet de sortir le model suivant :

$$K = 4,183 + (0,655 \times \text{Densité apparente})$$

Tableau VI-18: Résultats de la régression linéaire (Densité apparente-K).

Modèle	Coef. non standardisés		Coef. standardisés	t	P
	B	Erreur stand.	Bêta		
Constante	4,183	3,015		1,387	0,183
Densité apparente	0,655	1,984	0,080	0,330	0,745

Le tableau (VI-19) montre que ce modèle n'explique que 0,6 % de la variante de la perméabilité (R-deux= 0,006). Pour améliorer la qualité de ce modèle il faut rajouter d'autres variables. Ce modèle n'est pas significatif du fait que la valeur de P est supérieure à 0,1 (P= 0,745) (Tableau VI-18).

Tableau VI-19: Récapitulatif de modèle (Densité apparente-K).

Modèle	R	R-deux	R-deux ajusté	Erreur stand. d'estimation
densité apparent e-K	0,08	0,006	-0,052	2,00499

### VI.3.10. Effet des caractéristiques du sol sur la perméabilité (model multi-variables)

Pour avoir un modèle multi variables qui permet la détermination de la perméabilité du sol à partir leurs propriétés nous avons fait un test de régression étape par étape (stepwize) en incluant tous les paramètres. Le test a exclu tous les paramètres qui n'ont pas un effet significatif sur la perméabilité. Le seul paramètre introduit est teneur en sable moye (VI-20). Cela peut être expliqué par la différence des conditions de mesures dont on a mesuré la perméabilité in situ dans des sols bien structurés alors que les paramètres physicochimiques ont été mesurés au laboratoire dont les échantillons sont remaniés et ont une structure particulière.

Tableau VI-20: Variables exclus

Variables	Bêta In	P
STG	,040	,869
SG	,040	,859
SF	-,052	,823
STF	,038	,865
total du sable	-,089	,718
L+A	,089	,718
Densité apparente	,032	,885
Humidité	-,142	,527

Les résultats obtenus pour la teneur en SM montre que le coefficient de SM est 0,045 et le constant de perméabilité est 3,102 m/j. Ceci indique que si la teneur en SM augmente avec 1 % la valeur de la perméabilité augmente avec 0,045 m/j, c'est-à-dire que la teneur en SM a un effet positif de 0,045 sur la perméabilité du sol. Cela nous permet de sortir le model suivant :

$$K = 3,102 + (0,045 \times \% SM)$$

Ce modèle est très significatif du fait que la valeur de P est inférieure à 0,05 (P= 0,03). Ce modèle n'explique que 8,8 % de la variante de la perméabilité (R-deux= 0,088) (Tableau VI-6 et tableau VI-7).

# **CONCLUSION GENERALE**



## CONCLUSION GENERALE

L'importance croissante des problématiques environnementales entraîne un regain d'intérêt pour les sols. Les nombreux aléas, auxquels ils sont soumis, les fragilisent et affectent leurs propriétés. Une gestion et une protection optimales des sols passent par une connaissance approfondie de leur variabilité spatiale, y compris l'identification de zones vulnérables. L'objectif des travaux présentés était de déterminer la perméabilité des sols vis-à-vis des différents pédopaysages dans la région de Ouargla et l'élaboration de la carte de la perméabilité en vue d'en préserver des ressources hydro-édaphiques de la région en assurant une bonne gestion de l'irrigation et de drainage et protéger les eaux souterraines contre la pollution.

La caractérisation physicochimique des sols de la région de Ouargla montre qu'ils sont sableux et peux argileux, neutre à moyennement alcalins, peu humides, salés à extrêmement salés avec des faibles teneurs en calcaire.

La région est caractérisée par six pédopaysages ; Plateau, Glacis, Reg, Erg, Chott et Sebka et lit d'oued ; spécifiques à sa forme de cuvette. Ces pédopaysages se diffèrent l'un de l'autre par l'altitude, la répartition spatiale et l'état de surface.

Les mesures de la perméabilité des sols *in situ* par la méthode de Porchet montrent une variabilité de la perméabilité d'un pédopaysage à l'autre. Ils nous ont permis de classer les sols des pédopaysages dans l'ordre décroissant : sols d'Erg, les sols du Plateau, les sols de Reg, les sols de chott et Sebka, les sols de lits d'oueds et les sols des Glacis qui sont les moins perméables.

La carte de la perméabilité des sols de Ouargla montre une variation spatiale de la perméabilité dû à la structure et la porosité du sol, son état de saturation, la présence des nappes et du couvert végétal mais à la totalité ce sont des sols semi perméables à dominance sableuse ce qui désigne un bon drainage et facilite le transfert des polluants vers les nappes d'eau souterraine. Lors des mesures de la perméabilité du sol, les écoulements horizontaux peuvent poser certains problèmes tels que la perturbation de l'écoulement vertical, mais comme le phénomène est partagé sur l'ensemble des points de mesures, il ne peut pas fausser les mesures de perméabilité.

Sur le plan statistique, L'ANOVA suivie par le test Tukey montre que cette variabilité n'est significative qu'entre les sols d'Erg et ceux de Chott et Sebka et Glacis.

La matrice de corrélations met en évidence des corrélations statistiquement significatives ; positive entre le taux de sable moyen (SM) et la perméabilité et des corrélations positives ou négatives entre les autres paramètres.

L'ACP montre que les axes factoriels F1 et F2 expriment 52,55% de la variance totale. Le premier facteur F1 représente (30,89%) de la variance totale du système, déterminé par STG, CE, L+A, STF et le calcaire total. Le facteur F2 représente 21,65% de la variance totale du système, représenté par le pédopaysage, le total du sable et SG.

Les tests de régression font sortir des équations empiriques pour la perméabilité. Ces modèles montrent que le STG, SG, SF, STF, L+A, le total du sable, l'Humidité et la densité apparente ont un effet positif ou négatif non significatif sur la perméabilité du sol. Le modèle de la perméabilité par le sable moyen (SM) montre un effet positif, significatif à 95% de la teneur en SM sur la perméabilité.

Les recherches effectuées pour ce travail nous ont permis de constater que d'importantes difficultés se dressent par fois au moment de recueillir les informations nécessaires au bon déroulement de ce type d'activité. A signaler, l'absence des sources d'eau et des accès au quelque type de pédopaysages, le manque des données sur les pédopaysages de la région (une seule étude Hamdi-Aïssa (2001)). Plusieurs voies de recherches fondamentales et appliquées sont à proposer en vue d'affiner la connaissance du fonctionnement des sols la cuvette de Ouargla et de l'impact de l'anthropisation et du changement climatique sur ces sols.

- Des mesures de la perméabilité par d'autres méthodes telle que les essais de pompage et la méthode de double anneau sont recommandés pour estimer la perméabilité des sols afin d'éliminer l'écoulement horizontale.
- L'étude de la variation de la perméabilité en fonction de la fréquence d'irrigation.
- Mesure de la perméabilité des eaux différentes (eau douce, eau saline...)
- Le contrôle de la gestion des ressources en eaux et en sols est le garant de la durabilité de l'agriculture saharienne. Les cartes élaborées dans cette étude seront un outil important dans toutes futures investigations relatives à la gestion de la qualité des ressources en eaux et en sols et aux divers aspects de vulnérabilité à la salinisation et à la pollution du système hydro-agro-édaphique dans la cuvette.
- Des études approfondies des sols de différents pédopaysages dans la région de Ouargla sont à entreprendre afin de comprendre le fonctionnement du système et pouvoir aller plus loin en étudiant ces pédopaysages avec une plus grande finesse en utilisant une démarche diachronique tenant compte de l'évolution temporelle des sols.

Tout futur projet agricole ou étude environnementale doit prendre en considérations la perméabilité des sols pour assurer la protection des ressources hydro-édaphiques dans les écosystèmes et les agro-écosystèmes arides afin de garantir la durabilité de ces systèmes fragiles.

**REFERENCES**  
**BIOBIBLIOGRAPHIQUES**

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Abderrahmane, N. (1997). Synthèse sur la piézométrie et l'hydrochimie de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla.
2. Aliev, M. (1972). Structures géologiques et perspectives en pétrole et en gaz au Sahara Algérien (Tome 1).
3. Aljaradin M., Berndtsson R., Persson M., & Bouksila F. (2011). Spatial Analysis of Infiltration Experiment. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(7), 729–742.
4. Alyamani, M. S., & Şen, Z. (1993). Determination of hydraulic conductivity from complete grain-size distribution curves. *Groundwater*, 31(4), 551-555.
5. Amrani K. (2021). Gestion de l'eau d'irrigation dans le Bas-Sahara algérien: le paradoxe hydrique de la palmeraie d'Ouargla. *Annales de Géographie*, 2, 77–104.
6. Angulo-Jaramillo, R., Vandervaere, J. P., Roulier, S., Thony, J. L., Gaudet, J. P., & Vauclin, M. (2000). Field measurement of soil surface hydraulic properties by disc and ring infiltrometers: A review and recent developments. *Soil and Tillage Research*, 55(1-2), 1-29.
7. Aumassip, G., Dagonne, A., Estorges, P., Lefevre-Witier, P., Mahrouf, M., Marmier, F., Nesson, C., Rouvillois-Brigol, M. et Trécolle, G., 1972a. Aperçus sur l'évolution du paysage quaternaire et le peuplement de la région de Ouargla. *Libyca XX*, pp. 205-257.
8. BAGNOULS, F. & Gaussen, H. (1953). Saison sèche et indice xéothermique. Toulouse, França: Université de Toulouse, Faculté des Sciences.
9. Ballais, J. L. (2010). Des oueds mythiques aux rivières artificielles: l'hydrographie du Bas-Sahara algérien. *Physio-Géo. Géographie physique et environnement*, (Volume 4), 107-127.
10. Bel, F. et Dermagne F., 1966. Etude géologique du Continental terminal. Dossier de la Direction de l'énergie et des Carburants (Ministère de l'Industrie et de l'Energie). Alger, 22p.
11. Ben Brahim, L., 1997. Caractéristiques des derniers événements sur le bassin de M'zab (crues juin 1991, avril 1994 et septembre 1997). Rapport interne ANRH-Ouargla, 8p
12. Berkali I., Walter C., Michot D., & Djili K. (2014). Seasonal monitoring of soil salinity by electromagnetic conductivity in irrigated sandy soils from a Saharan oasis. *Soil Research*, 52(8), 769–780.
13. Berkali, I. (2016). Dynamique spatiotemporelle de la salinité de sols sableux irrigués en milieu aride (Doctoral dissertation, Ecole Nationale Supérieure Agronomique).
14. Beuf, S., Biju-Duval, B., de Charpal, O., RoGNON, P., Gariel, O., & Bennacef, A. (1971). Les grès du Paléozoïque Inférieur au Sahara: Sédimentation et discontinuités, évolution structurale d'un craton.

15. Bornard, & Gardel. (2003). La Vallée de Ouargla. Etudes d'assainissement des eaux résiduaires, pluviales et d'irrigation Mesures complémentaires de lutte contre la remontée de la nappe phréatique. Estimation du rôle des palmeraies à la montée de la nappe dans la cuvette de Ouargla.
16. Bouhanna A. 2021. Contribution à l'étude de l'impact de la réutilisation agricole des eaux usées épurées sur la nappe phréatique: cas de la région de Ouargla (Doctoral dissertation). Université Kasdi Merbah Ouargla.
17. Boumaraf, B. (2013). Caractéristiques et fonctionnement des sols dans la vallée de Oued Righ, Sahara Nord Oriental Algérie (Doctoral dissertation, Reims).
18. Boutelli M. H., Seyd, A. H. (2014). Etude de la Minéralisation et de la Granulométrie des Sols de la Sebkha de Ouargla. *Journal of Advanced Research in Science and Technology*, 1(2), 78–87.
19. Bracène, R., & de Lamotte, D. F. (2002). The origin of intraplate deformation in the Atlas system of western and central Algeria: from Jurassic rifting to Cenozoic–Quaternary inversion. *Tectonophysics*, 357(1-4), 207-226.
20. Briere, P.R. (2000) Playa, playa lake, sabkha: proposed definitions for old terms, *Journal of Arid Environments* 45, 1–7.
21. Castany, G. (1982). Bassin sédimentaire du Sahara septentrional (Algérie-Tunisie). Aquifères du continental intercalaire et du complexe terminal.
22. Charikh, M., 2015. Estimation et cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines au milieu aride application à la cuvette de Ouargla. Mém. Magister. Univ. de Ouargla, 66p.
23. Chossat J. C. (2005). La mesure de la conductivité hydraulique dans les sols: choix des méthodes. Éd. Tec & doc.
24. CLOUTIER, V., LEFEBVRE, R., THERRIEN, R. & SAVARD, M.M., 2008. Multivariate statistical analysis of
25. Conrad, G. (1969) L'évolution continentale posthercynienne du Sahara algérien (Saoura, Erg Chech, Tanezrouft, Ahnet-Mouydir), serie Geologie No. 10, Paris: Centre National de la Recherche Scientifique, CNRS.
26. Cooke, R.U., Warren, A et Goudie, A.S. 1993. Desert geomorphology. U.C.L. Press, Londres, 526 p.
27. Cooke, R.U., Warren, A. and Goudie, A.S. (1993). Desert Geomorphology, London: UCL Press.
28. Cornet, A., & Gouscov, N. (1952). Les eaux du Crétacé inférieur continental dans le Sahara algérien. *Nappe dite "Albienne")-1952-26 pages-La géologie et les problèmes de l'eau en Algérie. XIXe Congrès géologique international, 2.*
29. Cornet, A., 1961. Initiation à l'hydrogéologie saharienne. Cours ronéoté destiné aux officiers du cours préparatoire aux Affaires sahariennes. S.E.S. Birmandreis, Alger, 108p.

30. Cornet, A., 1964. Introduction à l'hydrogéologie saharienne. Géog. Phys. et Géol.Dyn., vol. VI, fasc. 1, 5-72.
31. Côte M. 1998. Des oasis malades de trop d'eau. Sécheresse, 9, 123-130.
32. Daddi Bouhoun M., Saker M. L., Hacini M., Boutoutaou D., Ould El Hadj M. D. (2013). The soil degradation in the Ouargla basin: a step towards the desertification of the palm plantations (north East Sahara Algeria). International Journal of the Environment and Water, 2(1), 93–98.
33. Daddi Bouhoun, M. (2010). Contribution à l'étude de l'impact de la nappe phréatique et des accumulations gypso-salines sur l'enracinement et la nutrition du palmier dattier dans la cuvette de Ouargla (Sud Est algérien). Th. Doc., Université BADJI Mokhtar, Annaba.
34. Dajoz R. 1971. Précis d'écologie. Dunod. Paris. *Publications de la Société Linnéenne de Lyon*, 43(6), 180-181.
35. Daoud, Y., & Halitim, A. (1994). Irrigation et salinisation au Sahara algérien. Science et changements planétaires/Sécheresse, 5(3), 151-160.
36. Das, N. N., Mohanty, B. P., & Efendiev, Y. (2010). Characterization of effective saturated hydraulic conductivity in an agricultural field using Karhunen-Loève expansion with the Markov chain Monte Carlo technique. Water Resources Research, 46(6).
37. Dekkiche, B. (1974). Contribution à l'étude des sols du Hodna et corrélations géochimiques des eaux de la nappe (Doctoral dissertation, Thèse de doctorat Gent. Belgique 211p).
38. Derruau, M. (2010). *Les formes du relief terrestre: Notions de géomorphologie*. 8<sup>ème</sup> éd. Paris: Armand Colin.
39. Dewolf Y., Bourrie G. (2008). Les formations superficielles. Génèse. Typologie. Classification. Paysages et environnements. Ressources et risques. Ellipses.
40. Djili, B. (2018). Contribution à l'étude des sols alluviaux des bassins du M'zab: Approche morpho-analytique, organisation spatiale et intérêt environnemental (Doctoral dissertation).
41. Dubief, J. (1952). Le vent et le déplacement du sable au Sahara. *Trav. Inst. Rech. Sahariennes*, 8, 123-162.
42. Dubief, J., 1953. Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara. Ed., Direction du service de la colonisation et de l'hydraulique, Service des études scientifiques. Algérie, 457p.
43. Dubief, J. (1959). *Le climat du Sahara* (Vol. 1). Université d'Alger, Institut de recherches sahariennes.
44. Dubief, J., 1963. Le climat du Sahara. Hors-série, Institut de recherches sahariennes. Mémoire Hors-série, Algérie, 275p.
45. Dutil, P., 1971. Contribution à l'étude des sols et des paléosols du Sahara. Thèse de Doctorat. Faculté des sciences de l'université de Strasbourg. 346p.

46. Edmunds, W., Guendouz, A., Mamou, A., Moulla, A., Shand, P. et Zouari, K., 2003. Groundwater evolution in the continental intercalaire aquifer of southern Algeria and Tunisia: trace element and isotopic indicators. *Applied Geochemistry* 18, 805-822.
47. Elhakim, A. F. (2016). Estimation of soil permeability. *Alexandria Engineering Journal*, 55(3), 2631-2638.
48. ERESS. 1972.UNESCO. Projet d'étude des Ressources en Eau du Sahara Septentrional. Rapport final, 7 plaquettes. Paris, 116p.
49. Fairbridge, R.W. (1968). Hamada, reg, serir, gibber, saï. In: *Geomorphology. Encyclopedia of Earth Science*. Springer, Berlin, Heidelberg.
50. Fitte, P., Durville, G., & VIGNARD, E. (1947). Une Station du Sébilien III, à Reggan Taourirt, dans le Tanezrouft, Sahara Central. *Bulletin de la Société préhistorique de France*, 44(9/10), 298-313.
51. geochemical data as indicative of the hydro-geochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system. *Journal of Hydrology*, 353: 294-313.
52. Gevin, P., Mongereau, N., & Truc, G. (1975). La Hamada du Dra (Sahara algérien, frontière algéro-marocaine): état des connaissances actuelles (1975). *Travaux et Documents des Laboratoires de Géologie de Lyon*, 4(1), 305-319.
53. Goudie A.S. (2002). *Great Warm Deserts of the World. Landscapes and evolution*. Oxford: Oxford University Press.
54. Goudie A.S. (2005). The drainage of Africa since the Cretaceous. *Geomorphology* 67, 437-456.
55. Goudie A.S. (2007). Mega-yardangs: a global analysis. *Geography Compass* 1, 65-81.
56. Goudie, A.S. (1999).The history of desert dune studies over the last 100 years, in A.S. Goudie, I. Livingstone and S. Stokes (eds) *Aeolian Environments, Sediments and Landforms*, 1-13, London: Wiley.
57. Graf, W. L., & Lecce, S. A. (1988). *Fluvial processes in dryland rivers* (Vol. 346). New York: Springer-Verlag.
58. Guendouz, A., Moulla, A., Edmunds, W., Zouari, K., Shands, P. et Mamou, A., 2003. Hydrogeochemical and isotopic evolution of water in the complex terminal aquifer in Algerian Sahara. *Hydrogeology Journal* 11, 483-495.
59. Guendouz, A., Reghis, Z., & Moulla, A. S. (1992). Etude hydrochimique et isotopique des eaux souterraines de la cuvette de Ouargla. *Rapport*, 65p.
60. Guiraud, R. (1975). l'evolution post-triasique de l'avant-pays de la chaine alpine en algerie d'apres l'etude du bassin du hodna et des regions voisines.
61. Hachicha, M., Bouksila, F., Zayani, K., & Mhiri, A. (1996). Étude comparative de la perméabilité mesurée par les méthodes de Reynolds, Porchet et MzÃ¼ntz dans le cas de sols argileux affectés par la salinité. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 7(3), 209-215.

62. Hadjkouider, M. 2019. Géochimie et minéralogie des formations et des eaux de la nappe superficielle de Ouargla (Doctoral dissertation). Université Ouargla
63. Hamdi-Aïssa B., Girard M. C. (2000). Utilisation de la télédétection en régions sahariennes, pour l'analyse et l'extrapolation spatiale des pédopaysages. *Science et Changements Planétaires/Sécheresse*, 11(3), 179–188.
64. Hamdi-Aïssa B., Vallès V., Aventurier, A., & Ribolzi, O. (2004). Soils and brine geochemistry and mineralogy of hyperarid desert playa, Ouargla Basin, Algerian Sahara. *Arid Land Research and Management*, 18(2), 103–126.
65. Hamdi-Aïssa, B. 2001. Le fonctionnement actuel et passé des sols du Nord Sahara (cuvette d'Ouargla). Approche micro-morphologique, géochimique et minéralogique et organisation spatiale. Ph .D dissertation, Institut National Agronomique, Paris Grignon, 307p.
66. Hamdi-Aïssa, B., & Fedoroff, N. (1997). Salt affected soil functioning at the Ouargla oasis (North Sahara Algeria). In *International Symposium on Sustainable Management of salt affected soil* (ed. El-Gala, A., & Blum, WEH) pp (pp. 153-154).
67. Hussain, F., & Nabi, G. (2016). Empirical formulae evaluation for hydraulic conductivity determination based on grain size analysis. *Pyrex Journal of Research in Environmental Studies*, 3(3), 26-32.
68. Idder T. (2007). Le problème des excédents hydriques à Ouargla: situation actuelle et perspectives d'amélioration. *Science et Changements Planétaires/Sécheresse*, 18(3), 161–167.
69. Idder, T. 1998. La dégradation de l'environnement urbain liée aux excédents hydriques au Sahara Algérien. Impact des rejets d'origine agricole et urbaine et technique de remédiations proposées. L'exemple de Ouargla. Thèse Doct., Université d'Angers
70. Iversen, B. V., Schjønning, P., Poulsen, T. G., & Moldrup, P. (2001). In situ, on-site and laboratory measurements of soil air permeability: Boundary conditions and measurement scale. *Soil Science*, 166(2), 97-106.
71. Jabro, J. D. (1992). Estimation of saturated hydraulic conductivity of soils from particle size distribution and bulk density data. *Transactions of the ASAE*, 35(2), 557-560.
72. Jackson, D. A., and K. M. Somers. 1991. Putting things in order: the ups and downs of detrended correspondence analysis. *The American Naturalist* 137:707-712.
73. Jaeger, F. (1939). *Die Trockenseen der Erde*, Petermanns Mitteilungen Ergänzungshelt (Les lacs asséchés de la terre, supplément de communication de Petermann). 236, 1–159.
74. Jraya, M. R. (2013). Le désert algérien : Etude géographique. *Al-Hikma Journal for Environmental and Geographical Studies*. Vol 1. p. 263-288.
75. Kaçki, M., Ryłko, M. S., Hayes, J. G., & Sullivan, C. R. (2022). Measurement Methods for High-Frequency Characterizations of Permeability, Permittivity, and



- Core Loss of Mn-Zn Ferrite Cores. IEEE Transactions on Power Electronics, 37(12), 15152-15162.
76. Karabi, M. (2017). Fonctionnement microbiologique des sols oasiens. Cas de quelques sols de la région de Ouargla (Doctoral dissertation).
77. Kinsman, D.J.J. (1969) Modes of formation, sedimentary associations and diagnostic features of shallow water and supratidal evaporites, American Association Petroleum Geologists Bulletin 53, 830–840.
78. Köhne J. M., Alves Júnior J., Köhne S., Tiemeyer B., Lennartz B., Kruse J. (2011). Double-ring and tension infiltrometer measurements of hydraulic conductivity and mobile soil regions. Pesquisa Agropecuária Tropical, 41, 336–347.
79. Koull N., Halilat M. T. (2016). Effets de la matière organique sur les propriétés physiques et chimiques des sols sableux de la région d'Ouargla (Algérie). Etude et Gestion Des Sols, 23, 9–23.
80. Le Houero, H.N., 1995. Bioclimatologie et biogéographie des steppes arides du Nord de l'Afrique. Diversité biologique, développement durable et désertisation. Options méditerranéennes. Série Bn=° 10. Ed. IAM. Montpellier (CIHEAM). 396 p.
81. Le Houérou, H. N. (2009). *Bioclimatology and biogeography of Africa* (Vol. 506). Berlin: Springer.
82. Lelubre, M. 1952. Recherches sur la géologie de l'Ahaggar central et occidental (Thèse). Bull, 93 p.
83. Mabbutt, J.A. (1977) Desert Landforms, An Introduction to Systematic Geomorphology, Cambridge, MA: MIT Press.
84. Mainguet, M., & Jacqueminet, C. (1984). Le Grand Erg Occidental et le Grand Erg Oriental. Classification des dunes, balance sédimentaire et dynamique d'ensemble. Travaux de l'Institut de Géographie de Reims, 59(1), 29-48.
85. Malin, M.C and Edgett, K.S. (2000) Evidence for recent groundwater seepage and surface runoff on Mars, Science 288, 2,330–2,335.
86. Mathieu C., Pieltain F., Jeanroy E. (2003). Analyse chimique des sols: Méthodes choisies. Tec & doc.
87. McKee, E.D. (ed.) (1979) A Study of Global Sand Seas, United States Geological Survey Professional Paper No. 1,052.
88. Mechri, M. L., & Chihi, S. (2014). Effect of heat on the crystalline phases in sand dunes of Ouargla region. Ann Sci. Technol., 6(2), 172-177.
89. Meglen, R. R. (1991). Examining large databases: a chemometric approach using principal component analysis. Journal of chemometrics, 5(3), 163-179.
90. Monod, T. 1992. Du désert. Sécheresse, 3(1), 7-24.
91. Moulla, A. S., Guendouz, A., & Reghis, Z. (1997). Hydrochemical and isotopic investigation of rising piezometric levels of saharan phreatic aquifers in the Oued-Souf region (Grand Erg Oriental basin, Algeria). Water in the Mediterranean.

- Collaborative Euro-Mediterranean Research: State of the Art, Results and Future Priorities.
92. Musy A., Soutter M. (1991). *Physique du sol*. Presses polytechniques et universitaires romandes. <https://books.google.dz/books?id=eGuqqoyF2bgC>
  93. Nagy, L., Tabácks, A., Huszák, T., Mahler, A., & Varga, G. (2013, September). Comparison of permeability testing methods. In *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris (Vol. 1, pp. 399-402)*.
  94. Neal, J.T. (1975) Playa surface features as indicators of environment, in J.T. Neal (ed.) *Playas and Dried Lakes*, 363–380, *Benchmark Papers in Geology*, Stroudsburg, PA: Dowden, Hutchinson and Ross.
  95. Nesson, C. (1978). L'évolution des ressources hydrauliques dans les oasis du Bas-Sahara algérien.
  96. Norme NF ISO 11465. 1994. AFNOR.
  97. Norme NF ISO X31-103. 1988. AFNOR.
  98. Norme NF ISO11265. 1996. AFNOR
  99. Norme NF X 31-108. 2002. AFNOR.
  100. Norme NFX 31-107. 2003. AFNOR.
  101. NormeNF ISO 11048. 1995. AFNOR.
  102. Omeiri, N. 2015. Diagnostic components of salinity and soil fertility of the palm of the Ksar of Ouargla. *Revue des BioRessources*. Vol 5 N 1.
  103. ONM (Office nationale de météorologie- Station de Ouargla). 2020.
  104. Onur, E. M. (2014). Predicting the permeability of sandy soils from grain size distributions (Doctoral dissertation, Kent State University).
  105. OSS (Observatoire du Sahara et du Sahel), 2008. *Système aquifère du Sahara septentrionale (Algérie, Tunisie, Lybie) : gestion commune d'un bassin transfrontière*.
  106. Ouled Elhadj-Youcef H. et Ouakad N., 2020. Modélisation du vent de surface à travers une étude de la répartition des dunes de sable aux alentours de la ville de Ouargla. Thèse de doctorat. Université Kasdi Merbah. Ouargla.
  107. Ozenda, P. (1991). *Flora and vegetation of the Sahara*. CNRS.
  108. Parsons, A.J., & Abrahams, A.D. (2009). *Geomorphology of desert environments*. Springer, Dordrecht.
  109. Pease, P.P. and Tchakerian, V.P. (2002) Composition and sources of sand in the Wahiba Sand Sea, Sultanate of Oman, *Annals of the Association of American Geographers* 92, 416–434.
  110. Porchet, M., & Laferrere, H. (1935). Détermination des caractéristiques hydrodynamiques des sols en place. *Mémoire et notes techniques*. Annales du Ministère de l'Agriculture, France, 64, 5-68.

111. Prospero, J.M., Ginoux, P., Torres, O., Nicholson, S.E. and Gill, T.E. (2002) Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the Nimbus-7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product, *Reviews of Geophysics* 40, 1–29.
112. Roger, B., Robert, F., & Hervé, T. (1993). Les mots de la géographie, dictionnaire critique. Paris, Reclus-La Documentation française, 3e éd, 381-382.
113. Rouvillois-Brigol M. Le pays de Ouargla (Sahara algérien). *Revue des mondes musulmans et de la Méditerranée*, 1977, vol. 24, no 1, p. 288-291.
114. Salarashayeri, A. F., & Siosemarde, M. (2012). Prediction of soil hydraulic conductivity from particle-size distribution. *International Journal of Geological and Environmental Engineering*, 6(1), 16-20.
115. Shepherd, R. G. (1989). Correlations of permeability and grain size. *Groundwater*, 27(5), 633-638.
116. Slimani R., Guendouz A. (2015). Groundwater vulnerability and risk mapping for the Phreatic aquifer in the Ouargla Oasis of Algerian Sahara using GIS and GOD method. *International Journal of Agricultural Science and Research (IJASR)*, 1(5), 149–158.
117. Slimani R., Guendouz A., Trolard F., Moulla A. S., Hamdi-Aïssa B., Bourrié, G. (2017). Identification of dominant hydrogeochemical processes for groundwaters in the Algerian Sahara supported by inverse modeling of chemical and isotopic data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(3), 1669–1691.
118. Slimani, R. (2016). Etude qualitative des ressources en eaux souterraines et cartographie de la vulnérabilité environnementale d'un aquifère au climat aride méditerranéen: cas de la cuvette de Ouargla, Algérie (doctoral dissertation). Université de Ouargla.
119. Tchakerian, V.P. (1995) The resurgence of aeolian geomorphology, in V.P. Tchakerian (ed.) *Desert Aeolian Processes*, London: Chapman and Hall.
120. Thomas, D.S.G. 1997. *Arid Zone Geomorphology (2nd Edn)*. Chichester: John Wiley & Sons.
121. Unesco. (1972). *Études des ressources en eau du Sahara septentrional*. Programme des Nations-Unies pour le Développement Élément Fonds Spécial.
122. Warren, J.K. (1989) *Evaporite Sedimentology*, Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall.
123. Werner, B.T. and Kocurek, G. (1999) Bedform spacing from defect dynamics, *Geology* 27, 727–730.
124. Wilson, I.G. 1971. Desert sand flow basins and a model for the development of ergs. *Geographical journal*: 137 (2), 180-199.
125. Yelles-Chaouche, A., Boudiaf, A., Djellit, H., & Bracene, R. (2006). La tectonique active de la région nord-algérienne. *Comptes Rendus Geoscience*, 338(1-2), 126-139.

126. Youcef, F., & Hamdi-Aïssa, B. (2014). Paleoenvironmental reconstruction from palaeolake sediments in the area of Ouargla (Northern Sahara of Algeria). *Arid Land Research and Management*, 28(2), 129-146.
127. Zidi, C., & Hachicha, M. (1997). Régime de la nappe superficielle et incidences sur la salure des sols et la production des dattes dans l'oasis de Tarfaya (Kébili). ES-297, Direction des Sols, Tunis. 24p.

# **ANNEXES**

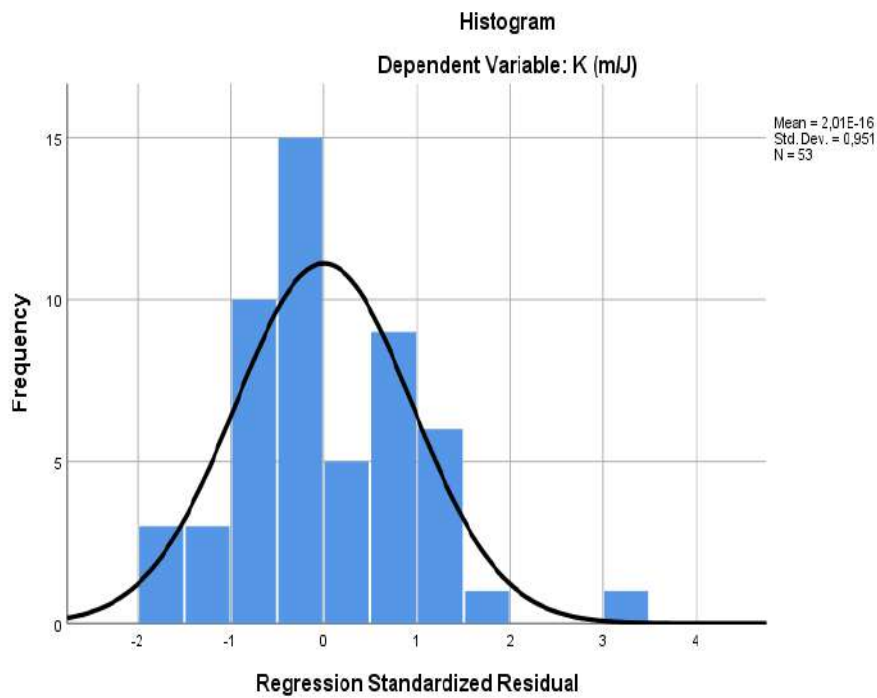
**ANNEXE I** : Caractéristiques physicochimiques des sols de la toposéquence

profil	A	LF	LG	SF	SG	Cl	SO4	HCO3	Na	Ca	Mg	K
	%					mmol/l						
p1	1,02	4,32	20,15	55,23	18,3	38,34	9,58	4,8	24,08	11,83	3,31	0,13
p2	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
P3	0,85	2,54	23	45,2	25,65	1123,24	126,34	1,45	1169,44	20,82	49,54	67,22
p4	1,2	2,2	27,5	46,3	21,23	482,84	63,49	1,66	467,83	22,46	28,82	41,07
p5	2,5	2,5	0,85	63,95	26,35	4798,41	203,91	4,02	4449,06	19,2	315,6	91,59
p6	0	5	8,85	58,15	26,9	343,34	38,08	1,88	309,3	28,72	22,9	8,57
p7	5,8	11,2	57,2	20,58	3,3	4152,09	1300,97	8,51	5216,87	2,63	763,44	13,16
p8	6,05	12,9	61,2	16,3	1,32	879,91	202,01	8,4	931,6	15,16	147,96	34,48
moyenne	2,488	5,808	28,392	43,672	17,578	1688,31	277,768	4,388	1795,454	17,26	190,224	36,602
max	6,05	12,9	61,2	63,95	26,9	4798,41	1300,97	8,51	5216,87	28,72	763,44	91,59
min	0	2,2	0,85	16,3	1,32	38,34	9,58	1,45	24,08	2,63	3,31	0,13

**ANNEXE II : Analyses descriptives des caractéristiques physicochimiques du sol**

		<b>Sable(%)</b>		Limon+ Argile (%)		Humidité (%)		pH		CE (mS/cm)		Calcaire total (%)	
		St	ES	St	ES	St	ES	St	ES	St	ES	St	ES
Moyenne		97,8667	0,06488	2,1333	0,06488	22,9400	0,78275	7,4260	0,01990	5,1320	0,23097	3,6431	0,17625
Intervalle de confiance à 95 % pour la moyenne	BI	97,7391		2,0056		21,3996		7,3868		4,6775		3,2962	
	BS	97,9944		2,2609		24,4804		7,4652		5,5866		3,9900	
Moyenne tronquée à 5 %		97,9388		2,0612		22,2237		7,4211		4,7920		3,3028	
Médiane		98,1000		1,9000		20,1000		7,4000		4,2500		2,6650	
Variance		1,263		1,263		183,809		0,119		16,004		9,320	
Ecart type		1,12378		1,12378		13,55762		0,34475		4,00048		3,05281	
Minimum		92,50		0,30		1,50		6,70		0,21		0,26	
Maximum		99,70		7,50		66,20		8,20		23,20		18,56	
Plage		7,20		7,20		64,70		1,50		22,99		18,30	
Plage interquartile		1,39		1,39		16,60		0,50		5,10		3,01	
Asymétrie		-1,162	0,141	1,162	0,141	0,788	0,141	0,208	0,141	1,269	0,141	1,787	0,141
Kurtosis		2,140	0,281	2,140	0,281	0,037	0,281	-0,784	0,281	1,784	0,281	3,524	0,281

**ANNEXE III : Histogramme de fréquence de la perméabilité et la courbe de normalité**



**Annexe IV: Résultat du test de normalité**

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>		
	Statistique	df	P
K (m/j)	,104	53	,200*

**Annexe V: Analyses descriptives de la perméabilité des sols**

		Statistique	Erreur Standard	
K (m/j)	moyenne	4,43	,29914	
	95% Confidence intervalle de la moyenne	Borne inférieure	3,8250	
		Borne supérieure	5,0255	
	5% Trimmed Mean	4,3469		
	Médiane	4,2463		
	Variance	4,743		
	Std. Déviation	2,17780		
	Minimum	,34		
	Maximum	10,96		
	Range	10,62		
	Interquartile Range	2,90		
	Skewness	,617	,327	
	Kurtosis	,290	,644	



**ANNEXE VI : Résultats de test Tukey**

(I) pédopaysage	(J) pédopaysage	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
Plateau	Reg	1,73644	,86838	,282	-,7247	4,1976
	Erg	-1,34042	1,09269	,736	-4,4373	1,7564
	Chott et Sebkha	1,51908	,92075	,474	-1,0905	4,1286
	lit d'oued	2,06478	1,01648	,267	-,8161	4,9457
Reg	Plateau	-1,73644	,86838	,282	-4,1976	,7247
	Erg	-3,07686*	,91974	,013	-5,6836	-,4702
	Chott et Sebkha	-,21736	,70693	,998	-2,2209	1,7862
	lit d'oued	,32835	,82777	,995	-2,0177	2,6744
Erg	Plateau	1,34042	1,09269	,736	-1,7564	4,4373
	Reg	3,07686*	,91974	,013	,4702	5,6836
	Chott et Sebkha	2,85950*	,96934	,038	,1122	5,6068
	lit d'oued	3,40521*	1,06070	,019	,3990	6,4114
Chott et Sebkha	Plateau	-1,51908	,92075	,474	-4,1286	1,0905
	Reg	,21736	,70693	,998	-1,7862	2,2209
	Erg	-2,85950*	,96934	,038	-5,6068	-,1122
	lit d'oued	,54571	,88256	,971	-1,9556	3,0470
lit d'oued	Plateau	-2,06478	1,01648	,267	-4,9457	,8161
	Reg	-,32835	,82777	,995	-2,6744	2,0177
	Erg	-3,40521*	1,06070	,019	-6,4114	-,3990
	Chott et Sebkha	-,54571	,88256	,971	-3,0470	1,9556

\*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

**ANNEXE VII** : Ordre de grandeur de la conductivité hydraulique dans différents sols  
(Musy et Soutter, 1991)

Ks (m/s)	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-9</sup>	10 <sup>-10</sup>	10 <sup>-11</sup>
Perméabilité	Perméable			Semi-perméable		Imperméable					
Type de sol	Gravier sans sable ni éléments fins			Sable avec gravier Sable grossier à sable fin		Sable très fin Limon grossier à limon argileux			Argile limoneuse à argile homogène		
Possibilité de drainage	Excellentes			Bonne		Moyenne à faible			Faible à nulle		